

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONARME KISA KİRİŞLERDE KESME DAYANIMININ  
ÇAPRAZ KESME DONATILARI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Hakan ÖZTÜRK**

**Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR**

**Aralık 2016**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


BETONARME KISA KİRİŞLERDE KESME DAYANIMININ  
ÇAPRAZ KESME DONATILARI İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Hakan ÖZTÜRK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez ..../..../2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Muzaffer ELMAS  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr.  
Naci ÇAĞLAR  
Üye

  
Prof. Dr.  
Murat PALA  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Yusuf SÜMER  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Zehra Şule GARİP  
Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hakan ÖZTÜRK

27.12.2016

## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim her aşamasında büyük sabır ve anlayışla ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle ufkumu açarak beni aydınlatan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel ve nümerik çalışma sürecimde her türlü yardımı esirgemeyen Arş. Gör. Aydın DEMİR, Yrd. Doç. Dr. Yusuf SÜMER, Yrd. Doç. Dr. Tamer DİRİKGİL, Arş. Gör. Gökhan DOK, Arş. Gör. Abdulhalim AKKAYA, Arş. Gör. Hüseyin ULUGÖL, Arş. Gör. Mustafa ÖZSAĞIR, Arş. Gör. Haluk Emre ALÇİÇEK, Arş. Gör. Cemal YILMAZ, Arş. Gör. Bekir KURŞUNET, Arş. Gör. Kutalmış Recep AKÇA'ya ve deney numunelerimin üretiminde özverili çalışmalarından dolayı Sayın Mustafa AKDEMİR ve ekibine teşekkürü borç bilirim. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında yardımcı olan laboratuvar çalışanlarımız ve değerli öğrencilerimize teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli anne, baba ve kardeşlerime sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No:2014-50-02-021) teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiii
TABLolar LİSTESİ .....	xx
ÖZET .....	xxi
SUMMARY .....	xxii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
1.1. Tez İçerik Planı .....	3
BÖLÜM 2.	
ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI .....	5
BÖLÜM 3.	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	8
3.1. Betonarme Bağ Kirişleri.....	8
3.2. Betonarme Kirişler .....	15
3.3. Sonlu Elemanlar .....	23
3.4. Literatür Değerlendirmesi ve Çalışmanın Önemi.....	26
BÖLÜM 4.	
BETONARME KİRİŞLERDE KESME DAVRANIŞI.....	28
4.1. Kesme Donatısız Kirişler .....	29

4.1.1. Kesme donatısız kirişlerin davranışları .....	32
4.2. Kesme Donatılı Kirişler .....	33
4.2.1. Kesme donatılı kirişlerin davranışları .....	34
4.3. Kesme Donatısı Hesabı .....	35
4.4. Betonarme Bağ Kirişleri .....	39
4.5. Kesme Donatılı Kirişler İçin Davranış Modelleri .....	43
4.5.1. Klasik kafes kiriş modeli (Ritter-Mörsch modeli).....	43
4.5.2. Plastik kafes kiriş analojisi .....	47
4.5.3. Çubuk analojisi yöntemi (Strut and Tie model) .....	49
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>53</b>
5.1. Deneylerde Kullanılan Numuneler .....	53
5.2. Deney Numunelerin Hazırlanması .....	55
5.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri .....	57
5.3.1. Beton .....	58
5.3.2. Donatı .....	59
5.4. Deney Düzeneğinin Hazırlanması .....	61
5.5. Kullanılan Alet ve Teçhizatlar .....	63
5.6. Yükleme Yöntemi .....	63
<b>BÖLÜM 6.</b>	
<b>NÜMERİK MODELLEME .....</b>	<b>64</b>
6.1. Sonlu Elemanlar Metodu .....	64
6.2. ABAQUS Programı .....	66
6.3. Beton Malzeme Modeli .....	67
6.3.1. Beton hasar plastisite modeli (BHP) .....	67
6.3.1.1. Beton basınç ve çekme davranışı .....	67
6.3.1.2. Beton çekme sertleşmesi .....	71
6.3.1.3. Beton çatlama enerjisi kriteri .....	72
6.3.1.4. Beton akma fonksiyonu .....	73

6.3.1.5. Plastik akma potansiyeli .....	75
6.4. Donatı Malzeme Modeli .....	76
6.5. Sonlu Elemanlar Çözüm Stratejisi .....	77

## BÖLÜM 7.

DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI .....	79
7.1. Seri-1 .....	79
7.1.1. R100-1 .....	80
7.1.2. S200-1 ve SX200-1 .....	81
7.1.3. S400-1 ve SX400-1 .....	83
7.1.4. S800-1 ve SX800-1 .....	85
7.1.5. Seri-1 sonuçları .....	87
7.2. Seri-2 .....	93
7.2.1. R100-2 .....	94
7.2.2. S200-2 ve SX200-2 .....	95
7.2.3. S400-2 ve SX400-2 .....	98
7.2.4. S800-2 ve SX800-2 .....	100
7.2.5. Seri-2 sonuçları .....	102
7.3. Seri-3 .....	109
7.3.1. S200X400-3 ve S200X800-3 .....	110
7.3.2. S100X200-3, S100X400-3 ve S100X800-3 .....	112
7.3.3. Seri-3 sonuçları .....	115

## BÖLÜM 8.

PARAMETRİK ÇALIŞMA VE SONUÇLARI .....	124
8.1. Sonlu Eleman Modeli .....	124
8.1.1. Beton basınç davranış modeli .....	124
8.1.2. Beton çekme davranış modeli .....	126
8.1.3. Beton basınç ve çekme hasar parametreleri .....	127
8.1.4. Donatı davranış modeli .....	127
8.1.5. Geometrik model ve sınır şartlarının belirlenmesi .....	128
8.2. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması .....	131

8.2.1. Seri-1 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması.....	131
8.2.1.1. R100-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	132
8.2.1.2. S200-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	133
8.2.1.3. SX200-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	134
8.2.1.4. S400-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	135
8.2.1.5. SX400-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	137
8.2.1.6. S800-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	138
8.2.1.7. SX800-1 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	139
8.2.1.8. Seri-1 deney numuneleri SEA sonuçları .....	140
8.2.2. Seri-2 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması .....	143
8.2.2.1. R100-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	143
8.2.2.2. S200-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	145
8.2.2.3. SX200-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	146
8.2.2.4. S400-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	147
8.2.2.5. SX400-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	149
8.2.2.6. S800-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	150
8.2.2.7. SX800-2 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	151
8.2.2.8. Seri-2 deney numuneleri SEA sonuçları .....	153
8.2.3. Seri-3 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması .....	155
8.2.3.1. S200X400-3 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	156
8.2.3.2. S200X800-3 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	157
8.2.3.3. S100X200-3 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	158
8.2.3.4. S100X400-3 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	160
8.2.3.5. S100X800-3 kirişinin SEA ile doğrulanması .....	161
8.2.3.6. Seri-3 deney numuneleri SEA sonuçları .....	162
8.3. Parametrik Çalışma Modelleri .....	165
8.3.1. Eğilme donatısı çap modelleri .....	166
8.3.2. Eğilme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri.....	169
8.3.3. Çapraz kesme donatısı çap modelleri .....	172
8.3.4. Çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri .....	174
8.3.5. Etriye-çapraz kesme donatısı çap-akma dayanımı modelleri ...	176



BÖLÜM 9.

SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 180

9.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler ..... 184

KAYNAKLAR..... 186

ÖZGEÇMİŞ ..... 203

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$A$	: Alan, nümerik model
$A_c$	: Kiriş gövde kesit alanı
ACI	: American Concrete Institute
AFRP	: Aramid Fiber Reinforced Polymer
$A_o$	: Kesme için gerekli etriye alanı
ark.	: Arkadaşları
$A_s$	: Çekme donatısı alanı
$A'_s$	: Basınç donatısı alanı
$A_{sb}$	: Dengeli donatı oranı
$A_{sd}$	: Bağ kirişinde çapraz donatı demetinin her birinin toplam alanı
$A_{sw}$	: Etriye donatı alanı
$A_{vd}$	: Her bir donatı demetindeki toplam donatı alanı
$a$	: Eşdeğer basınç bloğu derinliği, kesme açıklığı
$a_v$	: Kesme açıklığı
$b$	: Etkili tabla genişliği
BA	: Betonarme
BHP	: Beton hasar plastisite
$b_w$	: Kiriş gövde genişliği
$c$	: Tarafsız eksen derinliği
C	: Basınç çubuğu
$c_b$	: Dengeli durumda tarafsız eksen derinliği
$c_c$	: Net beton örtüsü
CF	: Carbon Fiber
CFF	: Carbon Fiber Fabric
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer

C3D8R	: Üç serbestlik dereceli 8 düğüm noktalı doğrusal kübik eleman
$d$	: Faydalı yükseklik
$d_b$	: Eğik donatı mesafesi
$d_c$	: Basınç hasar parametresi
$d_{max}$	: Maksimum agrega çapı
$d_t$	: Çekme hasar parametresi
$d'$	: Beton basınç yüzünden basınç donatısı ağırlık merkezi mesafesi
$d''$	: Çekme ve basınç donatısı ağırlık merkezleri arası uzaklık
$d\emptyset$	: Dönme açısı
$E$	: Elastisite modülü, deney numunesi
$E_c$	: Beton elastisite modülü
$EI$	: Eğilme rijitliği
$E_s$	: Donatı elastisite modülü
$F_{ax}$	: Üst başlık kesme kuvveti
$f_c$	: Beton basınç dayanımı
$F_c$	: Basınç bölgesinde betona uygulanan bileşke kuvvet
$f'_c$	: Beton basınç dayanımı
$f_{cd}$	: Beton tasarım basınç dayanımı
$F_{ce}$	: Basınç çubuğu kesme kuvveti
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı
$f_{cm}$	: Beton ortalama basınç dayanımı
$f_{ctd}$	: Beton tasarım çekme dayanımı
$f_{ctk}$	: Beton karakteristik çekme dayanımı
$F_d$	: Tasarım yükü
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
FRP	: Fiber Reinforced Polymer
$F_s$	: Çekme bileşke kuvveti, asal çekme gerilmesi
FS	: Fixed support (Ankastre mesnet)
$F'_s$	: Basınç bölgesinde donatılara uygulanan bileşke kuvvet
$f_t$	: Beton çekme dayanımı
$f_{su}$	: Donatı çekme dayanımı

$f_{sy}$	: Donatı akma dayanımı
$F_{sw}$	: Kesme donatıları tarafından taşınan kesme kuvveti
$f_y$	: Donatı akma dayanımı
$f_{yd}$	: Boyuna donatı tasarım akma dayanımı
$f_{yk}$	: Boyuna donatı karakteristik akma dayanımı
$f_{ywd}$	: Enine donatı tasarım akma dayanımı
$f_{ywk}$	: Enine donatı karakteristik akma dayanımı
GÇ	: Kesit göçme sınırı
$G_f$	: Çatlama enerjisi
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer
$h$	: Kesit yüksekliği
$h_k$	: Kiriş yüksekliği
$k$	: Rijitlik
kN	: Kilo Newton
KKKM	: Klasik kafes kiriş modeli
$k_1$	: Basınç bloğu katsayısı
$l_k$	: Kiriş sarılma bölgesi uzunluğu
$l_n$	: Kolon veya perde yüzleri arasında kalan kiriş serbest açıklığı
$l_b$	: Kenetlenme boyu
$M$	: Eğilme momenti
$M_d$	: Tasarım momenti
mm	: Milimetre
$M_d$	: Hesap moment kapasitesi
MPa	: Mega Pascal ( $N/mm^2$ )
$N$	: Eksenel kuvvet
$N_d$	: Tasarım eksenel kuvveti
$n$	: Etriye kol sayısı
P	: Uygulanan yük
PKKM	: Plastik kafes kiriş modeli
R	: Referans
S	: Çapraz kesme donatısız numune

$s$	: Kesme donatısı adım mesafesi
$S_d$	: Diyagonal donatı demetindeki toplam donatı alanı
SE	: Sonlu eleman
SEA	: Sonlu eleman analizi
SEM	: Sonlu eleman metodu
SI	: Statically indeterminate
$s_k$	: Kiriş sarılma bölgesi enine donatı adım mesafesi
$s_0$	: Kiriş ve kolonlarda orta bölge enine donatı adım mesafesi
SS	: Simply support
STM	: Strut and tie model
SX	: Çapraz kesme donatılı numune
T	: Çekme çubuğu, kesme kuvveti
TDY2007	: Türk Deprem Yönetmeliği 2007
T3D2	: İki noktalı doğrusal üç boyutlu çubuk eleman
TS500	: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları
$V$	: Kesme kuvveti
$V_c$	: Betonun kesme dayanımına katkısı
$V_{cc}$	: Çatlamamış beton tarafından taşınan kesme kuvveti
$V_{cd}$	: Çekme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti
$V_{ci}$	: Çatlak yüzeyinde oluşan çatlak içi gerilmeler
$V_{cr}$	: Kesitin kesmede çatlama dayanımı
$V_d$	: Tasarım kesme kuvveti
$V_n$	: Kesme dayanımı
$V_r$	: Kolon kiriş veya perde kesitinin kesme dayanımı
$V_u$	: Maksimum kesme kuvveti
$V_w$	: Kesme dayanımına kesme donatısı katkısı
$w$	: Çatlak genişliği
$W_s$	: Basınç çubuğu genişliği
$z$	: Moment kolu
$\alpha$	: Basınç çubuğu eğimi, Diyagonal donatı eğimi
$\alpha_f$	: Gerilme-çatlak genişliği parametresi

$\beta$	: Kesme donatısı eğimi
$\gamma$	: Diyagonal donatı açısı
$\gamma_{mc}$	: Beton için malzeme katsayısı
$\gamma_{ms}$	: Donatı için malzeme katsayısı
$\Delta$	: Yer değiştirme (mm)
$\epsilon$	: Akma yüzeyi eksantirisitesi
$\epsilon$	: Birim şekil değiştirme
$\epsilon_c$	: Beton şekil değiştirmesi
$\epsilon_{ci}$	: Beton inelastik şekil değiştirme
$\epsilon_{ci}^{\sim in}$	: Basınç etkisinde inelastik şekil değiştirme
$\epsilon_c^{\sim pl}$	: Basınç etkisinde plastik şekil değiştirme
$\epsilon_t^{\sim pl}$	: Çekme etkisinde plastik şekil değiştirme
$\epsilon_s$	: Çekme donatısı şekil değiştirmesi
$\epsilon_{0t}^{el}$	: Hasar görmemiş malzeme için elastik şekil değiştirme
$\epsilon_t^{\sim ck}$	: Çatlama birim şekil değiştirmesi
$\epsilon_t$	: Toplam birim şekil değiştirme
$\rho$	: Çekme donatısı oranı, eğrilik yarıçapı
$\rho'$	: Basınç donatısı oranı
$\rho_b$	: Dengeli donatı oranı
$\emptyset$	: Donatı Çapı
$\emptyset_l$	: Boyuna donatı çapı
$\emptyset_w$	: Enine donatı çapı
$\theta$	: Basınç çubuğu açısı
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma_c$	: Basınç gerilmesi
$\sigma_{cc}$	: Basınç gerilmesi
$\sigma_{co}$	: Maksimum elastik basınç gerilmesi
$\sigma_{ct}$	: Beton çekme gerilmesi
$\sigma_{cu}$	: Maksimum beton basınç gerilmesi
$\sigma_s$	: Donatı çekme gerilme
$\sigma_{sw}$	: Etriye çekme gerilmesi

$\sigma_t$	: Çekme gerilmesi
$\sigma_{to}$	: Eksenel çekme gerilmesi, güç tükenme gerilmesi
$\tau$	: Kayma gerilmesi
$\tau_s$	: Kayma gerilmesi
$\sum F_{sw}$	: Eğik çatlakın kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamı
$K$	: Eğrilik
$K_u$	: Maksimum eğrilik
$K_y$	: Akma eğriliği
$\delta$	: Yer değiştirme
$\delta_m$	: Tepe noktası yer değiştirme
$\delta_u$	: Maksimum yer değiştirme
$\delta_y$	: Akma yer değiştirmesi
$\psi$	: Dilasyon/genleşme açısı
$q_{ci}$	: Çatlak içi kesme gerilmeleri
$\bar{q}$	: Eşdeğer Mises etkili gerilmesi
$\bar{p}$	: Hidrostatik basınç gerilmesi
$\mu$	: Vizkozite parametresi

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Önerilen çapraz donatı uygulaması iki boyutlu görünüm.....	5
Şekil 2.2. Önerilen çapraz donatı uygulaması üç boyutlu görünüm.....	5
Şekil 2.3. Önerilen çapraz donatı uygulaması üstten görünüm.....	6
Şekil 2.4. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-1.....	7
Şekil 2.5. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-2.....	7
Şekil 2.6. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-3.....	7
Şekil 3.1. Paulay ve Binney'e ait bağ kirişi donatı detayı.....	9
Şekil 3.2. Aktan'a ait kiriş detayları.....	10
Şekil 3.3. Barney ve ark. ait bağ kirişi donatı detayı.....	11
Şekil 3.4. Galano ve Vignoli'ye ait bağ kirişi donatı detayları.....	12
Şekil 3.5. Adebar ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayı.....	13
Şekil 3.6. Canbolat ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayları.....	14
Şekil 3.7. Fortney ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayı.....	14
Şekil 3.8. Yang ve ark.'na ait kiriş detayı.....	16
Şekil 3.9. Kakaletsis ve ark.'na ait çerçeve detayı.....	16
Şekil 3.10. Ghallab ve ark.'na ait kiriş detayı.....	17
Şekil 3.11. Corte ve Boel'e ait kiriş detayı.....	18
Şekil 3.12. Karayannis ve Chalioris'e ait kiriş detayı.....	19
Şekil 3.13. Al-Nasra ve Asha'ya ait kiriş detayları.....	20
Şekil 3.14. Al-Nasra ve ark.'na ait kesme donatı tipi.....	21
Şekil 3.15. Colajanni ve ark.'na ait kiriş detayı.....	22
Şekil 3.16. Dirikgil'e ait kısa kolon donatı detayları.....	23
Şekil 4.1. Basit kesme etkisi altında asal gerilmeler.....	29
Şekil 4.2. a/d oranının kesme dayanımına etkisi.....	30
Şekil 4.3. Çatlama ve kırılma momentleri.....	30



Şekil 4.4. Kirişlerde $7.0 < a/d$ oranının kiriş davranışına etkisi.....	31
Şekil 4.5. Kirişlerde $3.0 < a/d < 7.0$ oranının kiriş davranışına etkisi.....	31
Şekil 4.6. Kirişlerde $1.5 < a/d < 3.0$ oranının kiriş davranışına etkisi.....	32
Şekil 4.7. Kirişlerde $a/d < 1.5$ oranının kiriş davranışına etkisi.....	32
Şekil 4.8. Kesme donatısız kiriş.....	33
Şekil 4.9. Kesme donatılı kiriş.....	34
Şekil 4.10. Mesnetlenme türleri.....	36
Şekil 4.11. Bağ kirişli perde duvarlı system.....	39
Şekil 4.12. Perde ve çerçeve duvar davranışı.....	40
Şekil 4.13. Bağ kirişi hasar mekanizması.....	40
Şekil 4.14. Diyagonal donatılı betonarme bağ kirişi.....	41
Şekil 4.15. Bağ kirişlerinde kullanılan özel donatı demeti.....	42
Şekil 4.16. Klasik kafes kiriş modeli.....	43
Şekil 4.17. Betonarme kirişte kafes sistem benzeşimi.....	44
Şekil 4.18. Düşey ve eğik etriye.....	44
Şekil 4.19. Etriyelerdeki gerilmelerin değişimi.....	47
Şekil 4.20. Plastik kafes kiriş modeli.....	47
Şekil 4.21. Plastik kafes kiriş analogisinde iç kuvvetler.....	48
Şekil 4.22. B ve D bölgeleri.....	51
Şekil 4.23. Strut and tie model.....	52
Şekil 5.1. TDY2007 referans deney numunesi ve kesiti.....	53
Şekil 5.2. Kalıpların hazırlanması.....	55
Şekil 5.3. Donatıların hazırlanması.....	56
Şekil 5.4. Donatıların kalıplara yerleştirilmesi.....	56
Şekil 5.5. Beton dökülmesi.....	56
Şekil 5.6. Küp numune alımı.....	57
Şekil 5.7. Hazırlanmış deney numuneleri.....	57
Şekil 5.8. Beton basınç deneyleri.....	58
Şekil 5.9. Seri-1 beton basınç dayanımı deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	58
Şekil 5.10. Seri-2 beton basınç dayanımı deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	59
Şekil 5.11. Seri-3 beton basınç dayanımı deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	59
Şekil 5.12. Donatı çekme deneyleri.....	60

Şekil 5.13. Ø8 donatı çubuğu çekme deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	60
Şekil 5.14. Ø12 donatı çubuğu çekme deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	61
Şekil 5.15. Ø16 donatı çubuğu çekme deneyi $\sigma$ - $\epsilon$ eğrisi.....	61
Şekil 5.16. Deney düzeneği.....	62
Şekil 5.17. Loadcell, analog ve dijital yer değiştirme ölçerler.....	63
Şekil 6.1. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar.....	65
Şekil 6.2. Beton için aksenal çekme davranışı.....	68
Şekil 6.3. Beton için aksenal basınç davranışı.....	69
Şekil 6.4. Betonun çekme sertleşmesi davranışı.....	71
Şekil 6.5. Betonun çatlama sonrası çekme davranışı.....	72
Şekil 6.6. Betonun iki aksenli gerilme-güç tükenme zarfı.....	74
Şekil 6.7. Drucker-Prager plastik potansiyel fonksiyonu.....	76
Şekil 6.8. Aksenal çekme etkisindeki donatı davranış modeli.....	77
Şekil 6.9. Newton-Raphson yöntemi.....	78
Şekil 7.1. R100-1 referans kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	80
Şekil 7.2. R100-1 referans kirişine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	81
Şekil 7.3. S200-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	81
Şekil 7.4. SX200-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	82
Şekil 7.5. S200-1 ve SX200-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	83
Şekil 7.6. R400-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	83
Şekil 7.7. SX400-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	84
Şekil 7.8. S400-1 ve SX400-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	85
Şekil 7.9. S800-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	85
Şekil 7.10. SX800-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	86
Şekil 7.11. S800-1 ve SX800-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	87
Şekil 7.12. Seri-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	88
Şekil 7.13. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre maksimum yük oranları.....	89
Şekil 7.14. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre maksimum yer değiştirme oranları.....	90
Şekil 7.15. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre yer değiştirme sünekliği oranları.....	91
Şekil 7.16. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre enerji tüketim oranları.....	91

Şekil 7.17. Seri-1 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme.....	92
Şekil 7.18. R100-2 referans kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	94
Şekil 7.19. R100-2 referans kirişi yük-yer değiştirme grafiği.....	95
Şekil 7.20. S200-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	96
Şekil 7.21. SX200-2 kirişleri deney öncesi ve deney sonrası.....	96
Şekil 7.22. R100-2, S200-2 ve SX200-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.	97
Şekil 7.23. S400-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	98
Şekil 7.24. SX400-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	98
Şekil 7.25. R100-2, S400-2 ve SX400-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.	99
Şekil 7.26. S800-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	100
Şekil 7.27. SX800-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	100
Şekil 7.28. R100-2, S800-2 ve SX800-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.	101
Şekil 7.29. Seri-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	102
Şekil 7.30. Seri-2 deney numuneleri R100-2'e göre maksimum yük oranları.....	103
Şekil 7.31. Seri-2 deney numuneleri R100-2'e göre maksimum yer değiştirme oranları.....	104
Şekil 7.32. Seri-2 deney numuneleri R100-2'e göre yer değiştirme sünekliği oranları.....	105
Şekil 7.33. Seri-2 deney numuneleri R100-2'e göre enerji tüketim oranları.....	106
Şekil 7.34. Seri-2 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme.....	107
Şekil 7.35. Seri-2 kesme kuvveti deney ve hesap sonuçları.....	109
Şekil 7.36. S200X400-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	110
Şekil 7.37. S200X800-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	110
Şekil 7.38. R100-2, S200X400-3 ve S200X800-3 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	111
Şekil 7.39. S100X200-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	112
Şekil 7.40. S100X400-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	113
Şekil 7.41. S100X800-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası.....	113
Şekil 7.42. R100-2 ve Seri-3 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	115
Şekil 7.43. Seri-3 ve R100-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği.....	116
Şekil 7.44. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yük oranları.....	117

Şekil 7.45. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yer değiştirme oranları.....	118
Şekil 7.46. Seri-3 deney numuneleri R100-2'e göre yer değiştirme sünekliği oranları.....	119
Şekil 7.47. Seri-3 deney numuneleri R100-2'e göre enerji tüketim oranları.....	120
Şekil 7.48. Seri-3 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme.....	121
Şekil 7.49. Seri-3 kesme kuvveti deney ve hesap sonuçları.....	123
Şekil 8.1. Beton basınç etkisi altında gerilme-inelastik şekil değiştirme davranışı	125
Şekil 8.2. Çatlak sonrası betonun gerilme-çatlak genişliği ( $\sigma_{ct-w}$ )davranışı.....	126
Şekil 8.3. Beton basınç hasar parametresi.....	127
Şekil 8.4. Beton çekme hasar parametresi.....	127
Şekil 8.5. Donatı gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme davranışı.....	127
Şekil 8.6. 2x2x2 integrasyon noktasına sahip 8 düğüm noktalı kübik eleman.....	128
Şekil 8.7. 1x1x1 integrasyon noktasına sahip 8 düğüm noktalı kübik eleman.....	129
Şekil 8.8. 2 düğüm noktalı 3 boyutlu lineer çubuk eleman.....	129
Şekil 8.9. ABAQUS sonlu eleman beton modeli.....	130
Şekil 8.10. ABAQUS sonlu eleman donatı modeli.....	130
Şekil 8.11. ABAQUS sonlu eleman çözüm ağı modeli.....	130
Şekil 8.12. R100-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	132
Şekil 8.13. R100-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	132
Şekil 8.14. S200-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	133
Şekil 8.15. S200-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	133
Şekil 8.16. SX200-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	134
Şekil 8.17. SX200-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	135
Şekil 8.18. S400-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	136
Şekil 8.19. S400-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	136
Şekil 8.20. SX400-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	137
Şekil 8.21. SX400-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	137
Şekil 8.22. S800-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	138
Şekil 8.23. S800-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	138
Şekil 8.24. SX800-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	139
Şekil 8.25. SX800-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	140

Şekil 8.26. Seri-1'e ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	141
Şekil 8.27. Seri-1'e ait SEA sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	141
Şekil 8.28. R100-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	144
Şekil 8.29. R100-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	144
Şekil 8.30. S200-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	145
Şekil 8.31. S200-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	145
Şekil 8.32. SX200-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği....	146
Şekil 8.33. SX200-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	147
Şekil 8.34. S400-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	148
Şekil 8.35. S400-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	148
Şekil 8.36. SX400-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği....	149
Şekil 8.37. SX400-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	149
Şekil 8.38. S800-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği.....	150
Şekil 8.39. S800-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	151
Şekil 8.40. SX800-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği....	152
Şekil 8.41. SX800-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	152
Şekil 8.42. Seri-2'e ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	153
Şekil 8.43. Seri-2'e ait SEA sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	153
Şekil 8.44. S200X400-3 deney ve sonlu eleman analizi yük- yer değiştirme grafiği.....	156
Şekil 8.45. S200X400-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	156
Şekil 8.46. S200X800-3 deney ve sonlu eleman analizi yük- yer değiştirme grafiği.....	157
Şekil 8.47. S200X800-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	158
Şekil 8.48. S100X200-3 deney ve sonlu eleman analizi yük- yer değiştirme grafiği.....	159
Şekil 8.49. S100X200-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	159
Şekil 8.50. S100X400-3 deney ve sonlu eleman analizi yük- yer değiştirme grafiği.....	160
Şekil 8.51. S100X400-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	160
Şekil 8.52. S100X800-3 deney ve sonlu eleman analizi yük- yer değiştirme grafiği.....	161

Şekil 8.53. S100X800-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması.....	162
Şekil 8.54. Seri-3'e ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	163
Şekil 8.55. Seri-3'e ait SEA sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği.....	163
Şekil 8.56. SX200-2 kirişi eğilme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	167
Şekil 8.57. SX400-2 kirişi eğilme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	168
Şekil 8.58. SX800-2 kirişi eğilme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	168
Şekil 8.59. SX200-2 eğilme donatısı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	170
Şekil 8.60. SX400-2 eğilme donatısı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	170
Şekil 8.61. SX800-2 eğilme donatısı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	171
Şekil 8.62. SX200-2 çapraz kesme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	172
Şekil 8.63. SX400-2 çapraz kesme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	173
Şekil 8.64. SX800-2 çapraz kesme donatı çapı yük-yer değiştirme grafiği.....	173
Şekil 8.65. SX200-2 çapraz donatı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	175
Şekil 8.66. SX400-2 çapraz donatı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	175
Şekil 8.67. SX800-2 çapraz donatı çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	176
Şekil 8.68. SX200-2 etriye-çapraz çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	177
Şekil 8.69. SX400-2 etriye-çapraz çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	178
Şekil 8.70. SX800-2 etriye-çapraz çap-akma dayanımı yük- yer değiştirme grafiği.....	178

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Seri-1 ve Seri-2 deney matrisi.....	54
Tablo 5.2. Seri-3 deney matrisi.....	55
Tablo 5.3. Beton basınç dayanımı.....	59
Tablo 5.4. Donatı akma dayanımı.....	61
Tablo 7.1. Seri-1 deney sonuçları.....	88
Tablo 7.2. Seri-1 deney sonuçları yük- yer değiştirme yüzde karşılaştırılması.....	93
Tablo 7.3. Seri-2 deney sonuçları.....	103
Tablo 7.4. Seri-2 deney sonuçları yük- yer değiştirme yüzde karşılaştırılması.....	107
Tablo 7.5. Seri-2 deney ve hesap sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri.....	108
Tablo 7.6. Seri-3 deney sonuçları.....	116
Tablo 7.7. Seri-3 deney sonuçları yük- yer değiştirme yüzde karşılaştırılması.....	121
Tablo 7.8. Seri-3 deney ve hesap sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri.....	122
Tablo 8.1. Beton malzeme modeli için ABAQUS’de kullanılan parametreler.....	125
Tablo 8.2. Beton malzeme modeli için ABAQUS’de belirlenen parametreler.....	131
Tablo 8.3. R100-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	133
Tablo 8.4. S200-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	134
Tablo 8.5. SX200-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	135
Tablo 8.6. S400-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	136
Tablo 8.7. SX400-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	138
Tablo 8.8. S800-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	139
Tablo 8.9. SX800-1 kirişi deney ve SE sonuçları.....	140
Tablo 8.10. Seri-1 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri.....	142
Tablo 8.11. Seri-1 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri.....	142
Tablo 8.12. R100-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	144
Tablo 8.13. S200-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	146

Tablo 8.14. SX200-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	147
Tablo 8.15. S400-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	148
Tablo 8.16. SX400-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	150
Tablo 8.17. S800-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	151
Tablo 8.18. SX800-2 kirişi deney ve SE sonuçları.....	152
Tablo 8.19. Seri-2 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri.....	154
Tablo 8.20. Seri-2 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri.....	155
Tablo 8.21. S200X400-3 kirişi deney ve SE sonuçları.....	157
Tablo 8.22. S200X800-3 kirişi deney ve SE sonuçları.....	158
Tablo 8.23. S100X200-3 kirişi deney ve SE sonuçları.....	159
Tablo 8.24. S100X400-3 kirişi deney ve SE sonuçları.....	161
Tablo 8.25. S100X800-3 kirişi deney ve SE sonuçları.....	162
Tablo 8.26. Seri-3 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri.....	164
Tablo 8.27. Seri-3 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri.....	164
Tablo 8.28. Parametrik çalışma modelleri.....	166
Tablo 8.29. Eğilme donatısı çapı parametrik modelleri.....	167
Tablo 8.30. Seri-2 numuneleri eğilme donatı çapı parametrik SE sonuçları.....	169
Tablo 8.31. Eğilme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modelleri.....	169
Tablo 8.32. Seri-2 numuneleri eğilme donatı çap-akma dayanımı SE sonuçları..	171
Tablo 8.33. Çapraz kesme donatısı çapı parametrik modelleri.....	172
Tablo 8.34. Seri-2 numuneleri çapraz kesme donatı çapı SE sonuçları.....	174
Tablo 8.35. Çapraz kesme donatısı çap-akma dayanımı parametrik modelleri...	174
Tablo 8.36. Seri-2 çapraz kesme donatı çap ve akma dayanımı SE sonuçları.....	176
Tablo 8.37. Etriye ve çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri....	177
Tablo 8.38. Seri-2 etriye-çapraz donatı çap ve akma dayanımı SE sonuçları.....	179



## ÖZET

Anahtar kelimeler: Betonarme kısa kiriş, çapraz kesme donatısı, kesme, sonlu eleman analizi

Betonarme yapı elemanlarında kesme etkisi ile oluşan güç tükenmesi, eğilme etkisi ile oluşan güç tükenmesinden daha gevreklerdir. Bu elemanlarda moment kapasitesi genellikle yeterli olmasına karşın kesme kuvvetleri bazı durumlarda önemli değerlere ulaşabilmektedir. Bu kesme kuvvetleri, mimari zorunluluk nedeniyle yapılan betonarme kısa kirişlerde, çok katlı yapıların zemin katlarındaki kirişlerde ve boşluklu perdelerin bağ kirişlerinde kesme kapasitelerini aşarak gevrek kesme kırılması tehlikesini arttırmaktadır. Bu durum dikkate alındığında, özellikle betonarme kısa kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmasının bir zorunluluk olduğu görülmektedir.

Deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu tez kapsamında, betonarme kısa kirişlerin tasarımını ve kesme kapasitelerinin artırılmasını amaçlayan yeni bir çapraz kesme donatısı yaklaşımı ortaya konulmaktadır. Çalışmada alternatif bir uygulama olarak kiriş enine donatılarının (etriyelerin) çapraz kesme donatıları ile bağlanması yöntemi önerilmektedir. Çalışmada 19 adet betonarme kısa kiriş deneysel ve nümerik olarak test edilmiştir. Bu numuneler üç seri şeklinde gruplandırılmıştır. Birinci ve ikinci seride 7'şer, üçüncü seride ise 5 adet numune bulunmaktadır. Deneysel çalışmanın yanısıra 76 adet nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Birinci seride basit mesnetli sistem, ikinci ve üçüncü seride ise birinci dereceden hiperstatik sistem kullanılmıştır. Aynı malzeme özelliklerine sahip her bir serinin etriye açıklıkları 100mm, 200mm, 400mm ve 800mm olacak şekilde çapraz kesme donatılı ve çapraz kesme donatısız olarak hazırlanmıştır. Betonarme kirişlerin enkesit boyutları 250x500mm olup kiriş uzunluğu 2250mm'dir. Kesme kritik davranış elde edebilmek amacıyla kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı ( $a/d$ ) 1,5 olarak belirlenmiştir.

Betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımının artırılması için alternatif olarak önerilen çapraz kesme donatılarının etkinliği yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar sonucu elde edilen sayısal ve görsel veriler yardımı ile ortaya konulmuştur.

# **IMPROVING THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE SHORT BEAMS WITH DIAGONAL SHEAR REINFORCEMENT**

## **SUMMARY**

Keywords: Reinforced concrete short beam, diagonal shear reinforcement, shear, finite element analysis

Behavior of reinforced concrete (RC) structural members under shear effect are more brittle than that of flexure. Among those members, although the moment capacity is generally sufficient for RC short beams, the shear capacity may become insufficient. The shear forces increase the risk of brittle shear failure in reinforced concrete short beams, which may be constructed, due to architectural necessities, in beams on the ground floor of multi-story structures, and in coupling beams on shear walls. Therefore it is necessary to carry out more studies that particularly aim to increase the shear strength capacity of reinforced concrete short beams.

Within the scope of this experimental and numerical thesis, a new diagonal shear reinforcement configuration that aims to design and increase the shear capacity of reinforced concrete short beams is proposed. In the study, the method of connecting the transverse reinforcements of the beams with the diagonal shear reinforcements is suggested as an alternative technic. In the study, 19 RC short beams in total were experimentally tested and numerically simulated. These specimens are grouped into three-series. Both first and second series have 7, the third series has 5 specimens. In addition to the experimental work, 76 numerical analyzes were carried out. A simply supported beam system was used in the first series while in the second and third series the supports were statically indeterminate to first degree. Each series that have the same material properties and stirrup spacings of 100mm, 200mm, 400mm, and 800mm were produced with and without diagonal shear reinforcement. The cross section of the beam is 250x500mm with total length of 2250mm. In order to obtain a shear critical behaviour, shear span to effective height ratio ( $a/d$ ) was considered as 1,5 for all specimens.

Efficiency of diagonal shear reinforcement, proposed as an alternative technique to increase the shear strength of reinforced concrete short beams, is presented by means of numerical and visual data which are obtained from the experimental and numerical study results.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Betonarme yapıların taşıyıcı sistemleri kolon, kiriş ve perdelerden oluşmaktadır. Betonarme yapı davranışının anlaşılabilmesi için yapıyı oluşturan kolon, kiriş, perde vb. elemanların davranışlarının çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Taşıyıcı sistemin güvenliği açısından statik ve dinamik yükler etkisinde betonarme yapı ve yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışının iyi bir şekilde bilinmesi oldukça önemlidir [1, 2].

Betonarme yapıların davranışında sünek ve gevrek kırılma olarak tanımlanan iki kırılma tipi hâkimdir. Kırılma öncesinde büyük plastik deformasyonların oluşması elemanın sünek kırılma ile güç tükenmesine ulaştığını göstermektedir. Gevrek kırılma ise çok az veya hiç plastik deformasyon yapmadan ani olarak göçmeye ulaşmasını ifade etmektedir. Gevrek kırılma, yapının enerji tüketim mekanizmalarının sağlıklı bir şekilde işlevini yerine getirmesini önleyerek yapının sünekliğinin önemli oranda azalmasına neden olmaktadır [3].

Kesme dayanımındaki yetersizlik nedeniyle yapı elemanlarında gevrek kırılma meydana gelir. Kesme kırılması eğilmeye oranla çok daha gevrek bir kırılma türüdür. Deprem etkisi sonucu yapı elemanlarında oluşan kesme kuvvetleri, taşıyıcı elemanlara rijitlikleri oranında aktarılır. Serbest boyu azalan betonarme taşıyıcı elemanlar artan rijitlikleri nedeni ile tasarımda dikkate alınan kesme kuvvetinden daha büyük bir kesme kuvveti ile karşı karşıya kalır. Taşıyıcı sistem elemanlarında statik ve dinamik etkiler nedeni ile oluşan kesme kırılmasının kesinlikle önlenmesi ve bu elemanların taşıma kapasitelerine hiçbir zaman kesme kırılmasıyla ulaşmayacak biçimde tasarlanmaları gerekmektedir [4].

Betonarme kirişlerde moment kapasitesi genellikle yeterli olmasına karşın, kesme dayanımındaki yetersizlik nedeni ile gevrek kesme kırılması meydana gelmektedir. Özellikle kısa kirişlerde kesme dayanımındaki yetersizlik ve bunun sonucu meydana gelen gevrek kırılma çok daha önemlidir. Çok katlı yapıların zemin kat kirişleri ile mimari zorunluluk ve iki perde arasında bağ kirişi yapılması gibi nedenlerle kısa kirişler oluşturulmaktadır.

Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler ile ilgili çalışmalar genellikle mevcut betonarme kirişlerin kesme kapasitesi, dayanım ve sünekliğinin artırılmasına yönelik onarım ve güçlendirme çalışmalarıdır. Bu güçlendirme çalışmaları betonarme manto, çelik lif, çelik levha yapıştırma, kelepçe, lifli polimerler (FRP, CFRP, GFRP, AFRP) ve türevleri kullanılarak yapılmaktadır [3]. Literatürde tasarım aşamasındaki betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının artırılmasına yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalar farklı donatı konfigürasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir [5-13]. Fakat bu çalışmalarda deprem yönü ve uygulanabilirlik gibi eksiklikler bulunmaktadır. Bu olumsuzlukları giderecek alternatif bir donatı konfigürasyonuna ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, kısa kiriş davranışı gösteren betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve sünekliğinin artırılmasına yönelik yeni, basit ve etkin bir uygulama olarak “çapraz kesme donatısı” önerilmektedir. Yeni bir tasarım düzeni ortaya çıkarması bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilen çapraz kesme donatısının kiriş davranışına etkisi öncelikle deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde zaman, bütçe, iş gücü ve gerekli ekipmanların temin edilmesi gibi zorluklar nedeniyle deney sayısı 19 ile sınırlandırılmıştır. Önerilen çapraz kesme donatısının etkisini daha yaygın ve detaylı olarak inceleyebilmek amacıyla ayrıca sonlu elemanlar yardımıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çapraz kesme donatısı uygulamasının önerildiği, deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu çalışma, literatürde yapılan birçok çalışmanın dışında, donatı detaylandırması ile betonarme kısa kirişlerin tasarım aşamasına yönelik olarak alternatif bir uygulama olması amacı ile yapılmıştır.

## 1.1. Tez İçerik Planı

Dokuz bölümden oluşan bu tez çalışmasının her bir bölümüne ait içerik aşağıda sıralanmıştır.

Betonarme yapı taşıyıcı sistemlerini oluşturan yapı elemanları ve bu elemanlarda meydana gelen kırılma türlerinin anlatıldığı Bölüm 1’de betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımı ve sünekliğinin artırılması için önerilen çapraz kesme donatısı hakkında kısa bilgi verilmiştir.

Çalışmanın amaç ve kapsamının anlatıldığı Bölüm 2’de betonarme kirişlerde deprem etkisiyle oluşan kesme kuvvetlerini karşılamak üzere tasarım aşamasında yerleştirilen çapraz kesme donatıları ve bu donatıların eleman davranışına yapacağı etkiler aktarılmıştır.

Bölüm 3’de kesme davranışı gösteren betonarme kirişler ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi sunulmuştur. Yapılmış olan deneysel ve nümerik çalışmalarda betonarme manto, çelik lif, çelik levha yapıştırma, kelepçe, lifli polimerler (FRP, CFRP, GFRP, AFRP) ve türevleri ve farklı donatı konfigürasyonları dikkate alınarak, literatür değerlendirmesi yapılmıştır.

Betonarme kirişlerin kesme, basınç ve çekme dayanımları ile kesme gerilmeleri ve asal çekme gerilmeleri hakkında bilgilerin verildiği Bölüm 4’de kesme donatısız ve kesme donatılı kirişler ile bu kirişlerin davranışları anlatılmıştır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranına ( $a/d$ ) bağlı olarak kirişlerin davranışları ve çatlakların oluşumları şekillerle sunulmuştur. Kesme donatısız ve kesme donatılı kirişler için davranış hesap modelleri aktarılmıştır.

Deneysel çalışma programının açıklandığı Bölüm 5’de deneysel çalışmalar ile ilgili işlemler, numune üretimi, deney düzeneği, kullanılan cihazlar ile kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve yükleme prosedürü anlatılmıştır.

Nümerik çalışma programının açıklandığı Bölüm 6'da sonlu elemanlar yöntemi, beton ve donatı malzeme davranış modelleri ile çalışmada kullanılan modelleme tekniği hakkında bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 7'de deneysel çalışma sonucu elde edilen veriler kullanılarak çapraz donatılı kirişler referans numunelerle kıyaslanmaktadır. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak sonuçlar, grafikler ve tablolar halinde yorumlanmıştır. Deney numuneleri için yükleme süresince oluşan çatlak gelişimleri, yük, yer değiştirme, süneklik ve enerji tüketim kapasitelerine ait değerlendirmeler anlatılmıştır. Tez kapsamında yeni bir tasarım düzeni olan çapraz kesme donatılarının betonarme kirişlerinin davranışlarına etkisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

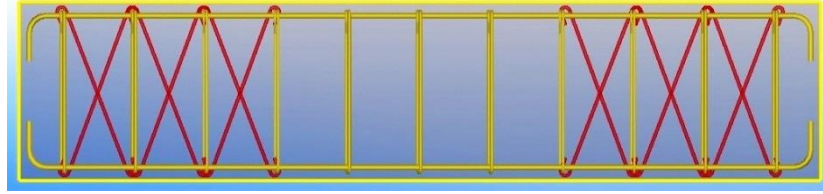
Deneyle yapılan betonarme kısa kirişler için nümerik ve parametrik çalışmaların gerçekleştirildiği Bölüm 8'de elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaların yanısıra aynı boyut ve malzeme özelliklerine sahip betonarme kısa kirişler için parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deneysel, nümerik ve parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak tez çalışmasının genel bir değerlendirilmesinin yapıldığı Bölüm 9'da ayrıca yapılacak sonraki çalışmalar için öneriler verilmiştir.

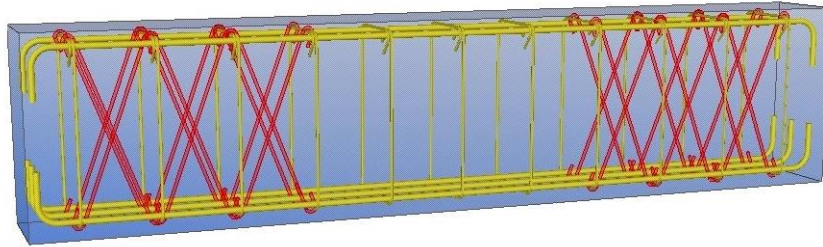
## BÖLÜM 2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Betonarme yapısal elemanlarda kesme kırılması, istenmeyen gevrek bir davranışa neden olur. Kesme etkisi ile oluşan güç tükenmesi, eğilme etkisi ile oluşan güç tükenmesi durumundan daha gevrek bir şekilde gelişir. Bu sebeple gevrek güç tükenmesi oluşumunu önlemek için elemanın kesme dayanımı artırılmalıdır [14, 15].

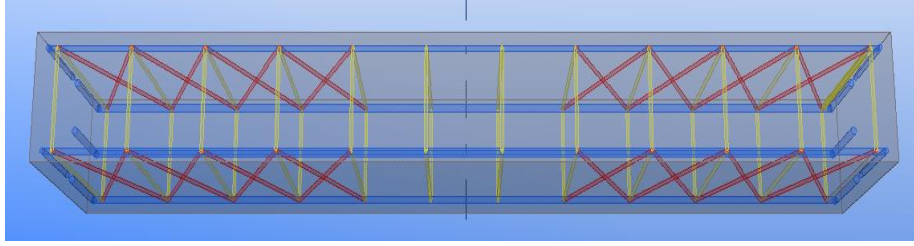
Deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu tez kapsamında betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımını arttırmak amacıyla çapraz kesme donatısı uygulaması önerilmektedir. Çapraz kesme donatıları kirişlerin yan yüzeylerinde enine donatılar arasına bağlanarak yerleştirilmiştir. Çapraz kesme donatıları deprem nedeni ile oluşabilecek kesme kuvvetlerinin tersinir etkilerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 2.1., Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.).



Şekil 2.1. Önerilen çapraz donatı uygulaması iki boyutlu görünüm



Şekil 2.2. Önerilen çapraz donatı uygulaması üç boyutlu görünüm



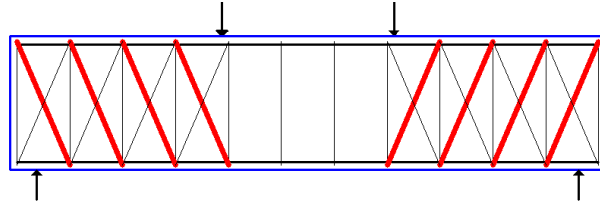
Şekil 2.3. Önerilen çapraz donatı uygulaması üstten görünüm

Yönetmeliklerde depremin tersinir etkisi nedeniyle kesme kuvvetlerinin yön değiştireceği bilinmekte ve bunun için pilye ve eğik etriye uygulamaları önerilmemektedir. Pilyelerin bazı kesitlerde yoğunlaştırılmasının, depremin sadece tek yönüne karşı (bir yönlü kesme kuvveti taşıması) etkin olması ve deprem yön değiştirdiğinde etkinliğini kaybetmesi nedeniyle deprem bölgelerinde kullanılmasına izin verilmemektedir [15]. Ayrıca, literatürde bulunan etriyelerin eğik olarak uygulandığı çalışmalarda da pilye uygulamasına benzer sonuçlar görülmektedir. Eğik etriyelerin asal çekme gerilmeleri yörüngesinde uygulanmasından dolayı kirişin kesme kapasitesinde belirgin artışlar elde edilmiştir. Fakat deprem etkisinin tersinir özelliği nedeniyle kesme kuvvetinin yön değiştirmesi sonucu, bu eğik donatıların kesme kuvveti taşıyabilme etkileri kaybolmaktadır [16].

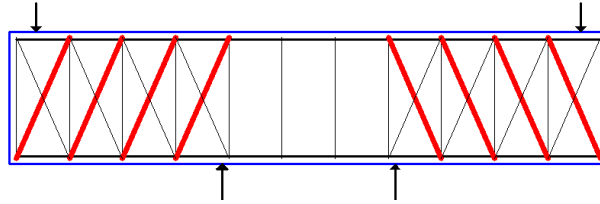
Bu çalışmada önerilen çapraz kesme donatısı uygulamasında ise asal çekme gerilmeleri yörüngesine yerleştirilecek olan donatılar, çapraz uygulanacağından kesme kuvvetinin yön değiştirmesi sonucunda bile etkinliğini kaybetmeyeceği öngörülmektedir.

Önerilen çapraz kesme donatısı gözönüne alındığında, yön değiştiren kesme kuvveti etkilerini dikkate alan deney düzenekleri ve oluşacak olan kesme kuvvetlerini karşılayan çapraz kesme donatı elemanları Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi her iki deney düzeneği ve sonuçlarının benzer olması nedeniyle, deney düzeneklerinden sadece birinin yapılması yeterli olacaktır. Bunun yanı sıra, deneysel çalışmaların gerçekleştirileceği Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarı'nın imkânları da dikkate alındığında yüklemenin monolitik ve tek yönlü olması zorunluluğu bulunmaktadır.



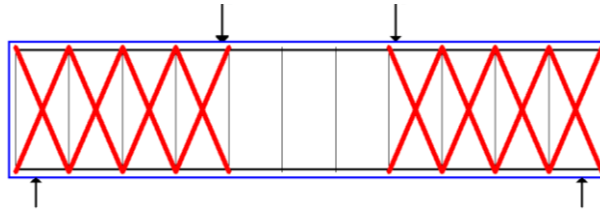


Şekil 2.4. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-1



Şekil 2.5. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-2

Deney düzeneği oluşturulurken yukarıda belirtilen sınırlamaların ve uygulamada önerilen çapraz kesme donatı elemanlarının her ikisinin de kullanılacağı dikkate alındığında yüklemenin tek yönlü yapılmasına ve deney numunelerinin Şekil 2.6.'de görüldüğü gibi oluşturulmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.6. Deney düzeneği ve etkin çapraz donatılar-3

Sonuç olarak, bu çalışma ile deprem etkisinin tersinir özelliğini dikkate alan, kolay uygulanabilir ve alternatif bir yöntem olarak çapraz kesme donatıları önerilmektedir. Çapraz kesme donatılarının kiriş yan yüzeylerinde enine donatılara bağlanması ile oluşturulan tasarımla betonarme kısa kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılması ve yeni bir tasarım yönteminin uygulamaya kazandırılması amaçlanmaktadır.

## **BÖLÜM 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Betonarme kısa kirişlerle ilgili gerçekleştirilen deneysel çalışmaların büyük bir kısmı onarım ve güçlendirme çalışmalarından oluşmakla birlikte bunların çok az bir kısmı donatı tasarımına yöneliktir. Onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanılan tekniklerden bazıları, betonarme manto, çelik lif, çelik levha yapıştırma, kelepçe, lifli polimerler (FRP, CFRP, GFRP, AFRP) ve türevleridir. Donatı tasarımına yönelik çalışmalar ise betonarme perde bağ kirişlerinde önerilen çapraz donatılar ve betonarme kirişler için önerilen farklı donatı konfigürasyonlarını kapsayan deneysel çalışmalardır.

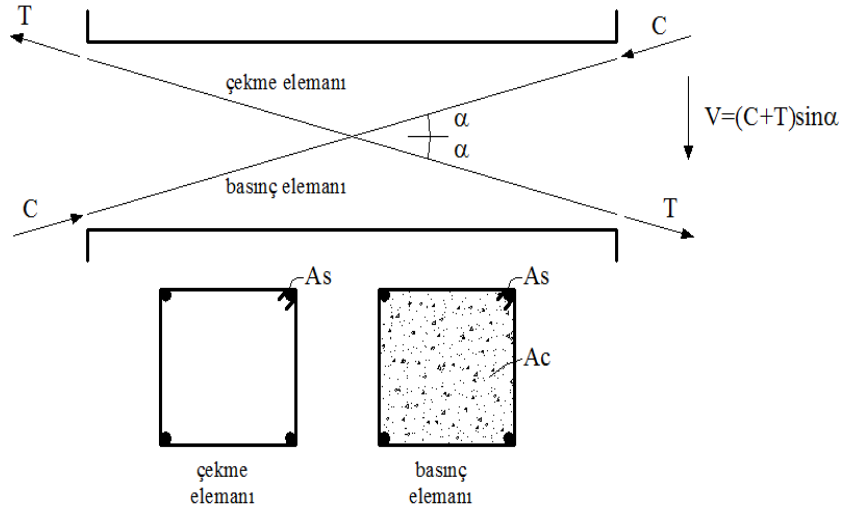
Literatürde kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme ve eğilme dayanımları ile süneklik düzeylerinin artırılması amacıyla yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları, betonarme manto [17-22], çelik lif uygulaması [23-34], çelik levha yapıştırılması [35-53], FRP ve türevi sargılamalar ile [54-90], kelepçe uygulamaları [91-96] şeklinde sayılabilir.

### **3.1. Betonarme Bağ Kirişleri**

Betonarme bağ kirişleri orta ve yüksek katlı yapıların yatay yük direncini artırmak için kullanılan betonarme perde duvarları kat seviyelerinde birbirine bağlayan betonarme kısa ve derin kirişler olarak tanımlanmaktadır. Betonarme bağ kirişleri çevrimsel yük etkisi altında büyük kesme kuvvetleri ile karşı karşıya kalır. Kesme dayanımının iyileştirilmesi amacıyla betonarme perde bağ kirişlerinde yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur [97-106].

Paulay ve Binney [98], tarafından kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı 1 ve daha küçük olan betonarme perde bağ kirişlerinde tekrarlı yük etkisiyle oluşan hasarı

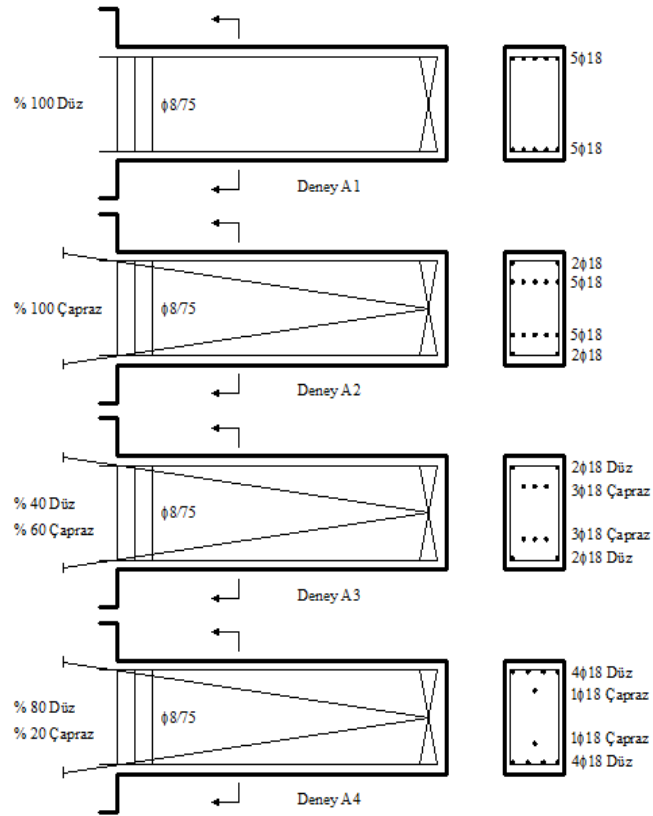
önleyebilmek için alışılmış eğilme donatısı yerine çapraz donatı yerleştirilerek tersinir kesme etkilerini kirişin bağlı olduğu elemana aktarma çalışmaları deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 3.1.). Alışılmış eğilme donatısı kullanılan kirişlerde çevrimsel yükten sonra kiriş kesme direnci ve enerji tüketimi azalmıştır. Çapraz donatı kullanılan kirişlerde ise histeretik davranışta son derece olumlu veriler elde edilmiştir [101].



Şekil 3.1. Paulay ve Binney'e ait bağ kirişi donatı detayı [98]

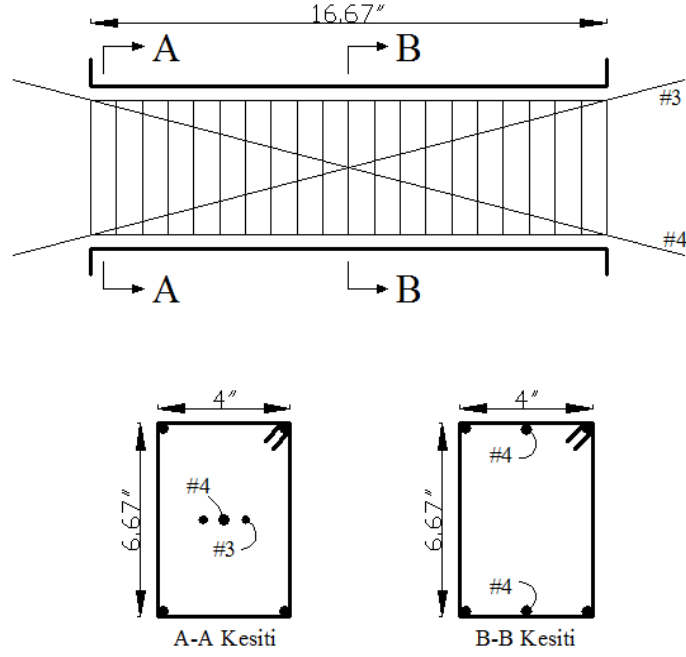
Aktan [101], tarafından yapılan çalışmanın ilk amacı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı 3-3,5 arasında olan kirişlerde çapraz donatının yararlı olup olmadığının belirlenmesidir. İkinci amaç ise bu özellikteki kirişlerde çapraz ve düz eğilme donatılarının birlikte kullanılması durumunda davranışın araştırılması ve iki değişik tip donatının hesap yöntemleri için öneriler geliştirilmesidir. Çalışmada tersinir kesme kuvveti uygulanan kirişlerin direnç, rijitlik ve enerji tüketimi incelenmiştir. Çalışma 4 adet deneyden oluşmaktadır. Deney elemanları olarak betonarme bir perde blokuna saptanan 250x500mm boyutlarında konsol kirişler seçilmiştir. Tüm elemanlarda sargı donatısı, perde bloğu donatısı ve boyuna donatı oranları değiştirilmemiş ve aynı beton karışımı kullanılmıştır. Tek değişken boyuna donatının düzenlemesi olmuştur (Şekil 3.2.). Yapılan deneyler sonucunda deney elemanlarının akma dayanım değerleri %10 oranında artarken maksimum ötelenme değerleri %40 oranında artmıştır. Çapraz donatıların kirişin çevrimsel yüklemesinde davranışa olumlu katkısı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca deney sonuçları dikkate alınarak düz ve çapraz donatı katkısını ayrı ayrı hesaplayan kiriş taşıma gücü yaklaşımı

uygulanmıştır. Hesaplanan değerler %3 hata oranı ile belirlenmiştir. Çalışmada sargı donatılarının kesme kuvvetlerini akmadan taşıyabildiği ancak dengeli bir histeresis davranışın elde edilemediği belirtilmiştir [101].



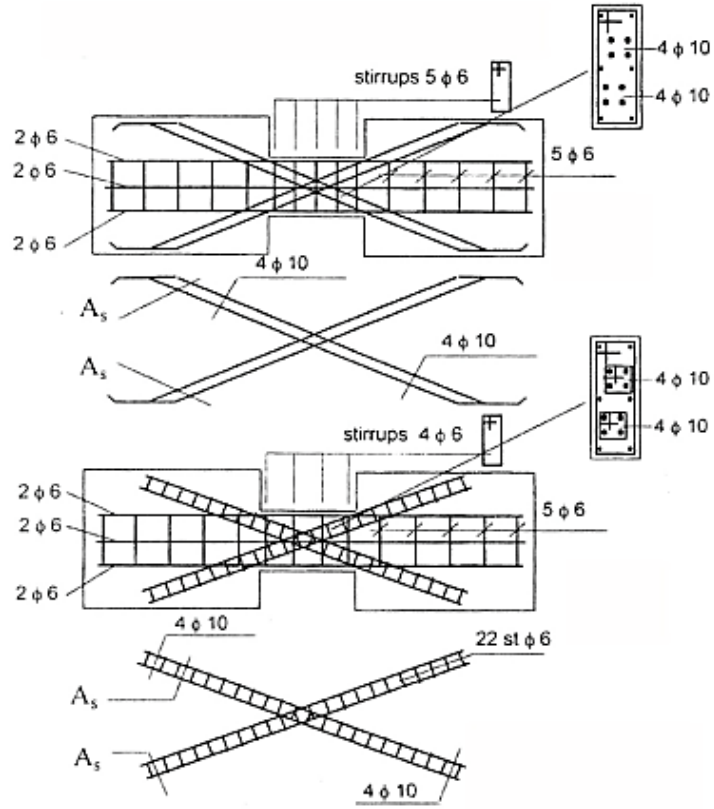
Şekil 3.2. Aktan'a ait kiriş detayları [101]

Barney ve ark. [102], sekiz adet betonarme kiriş numunesi üzerinde çevrimsel yükleme deneyi yapmıştır. Bu kirişlerden iki tanesi (C6 ve C8 numuneleri) diyagonal donatıya sahiptir. C6 numunesi tipik bağ kirişini temsil etmesi açısından net açıklığın kiriş yüksekliğine oranı 2,5 alınmıştır. Boyuna donatılar etriyelerle sarılmış ancak kirişin bağlandığı perde duvarlara ankre edilmemiştir (Şekil 3.3.). Deney sonucunda diyagonal donatının burkulması ve betonun ezilmesi nedeniyle test edilen deney kirişinin performansının sınırlı seviyede kaldığı belirtilmiştir.



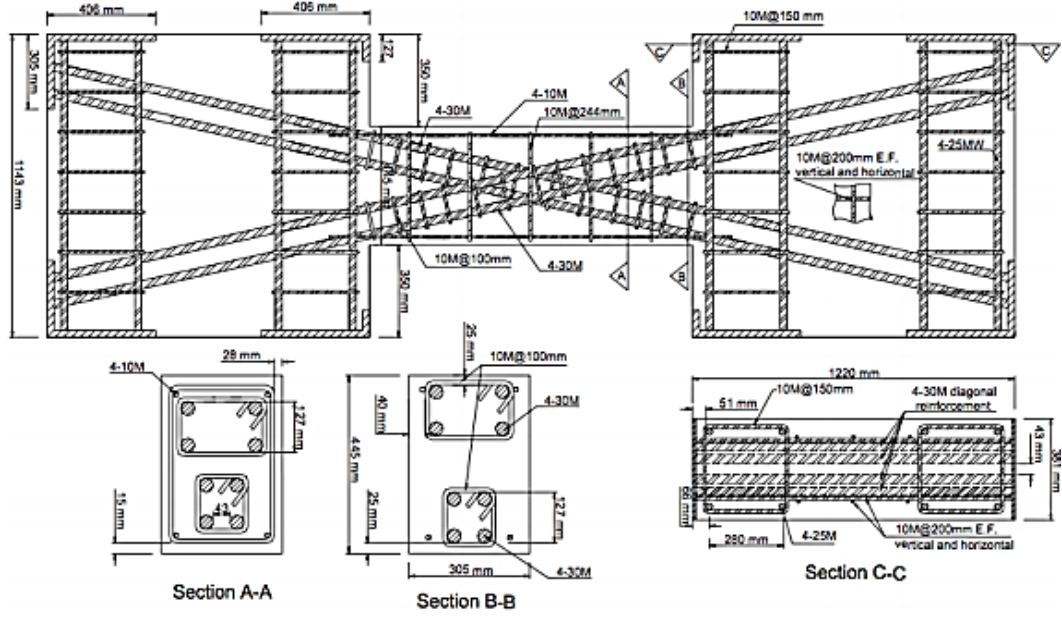
Şekil 3.3. Barney ve ark. ait bağ kirişi donatı detayı [102]

Galano ve Vignoli [103], tarafından farklı donatı detayları ve malzeme özellikleri kullanarak iki farklı diyagonal donatılı bağ kirişi deneyi yapılmıştır. Kirişlerin kesme açıklığının kiriş yüksekliğine oranı 0,75 alınmıştır. Kirişler arasındaki en önemli fark diyagonal donatı gruplarındaki enine donatı oranıdır. Donatı demetlerindeki donatı alanları aynı alınarak perde duvara ankrajı sağlanmıştır (Şekil 3.4.). Uygulanan tekrarlı yük etkisinde enine donatı ile sargılanmayan diyagonal donatı demeti nedeniyle beton basınç çubuğunda ezilme sonucu hasar meydana gelmiştir. Diyagonal donatı demeti enine donatı ile sargılanan bağ kirişinde ise bu durum gözlenmemiştir. Diyagonal donatı demetinin enine donatılarla sargılanması ve bağ kirişi içerisine yerleştirilmesi işçilik açısından pratik değildir.



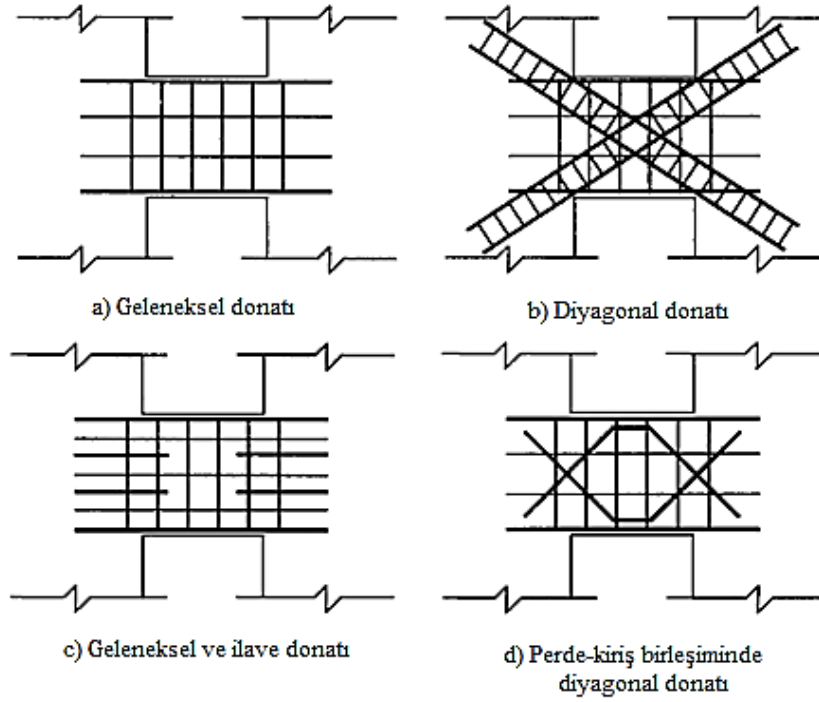
Şekil 3.4. Galano ve Vignoli'ye ait bağ kirişi donatı detayları [103]

Adebar ve ark. [104], tarafından yapılan deneylerde birebir olarak hazırlanan kirişler için net açıklığın kiriş yüksekliğine oranı 2,74 alınmıştır. Kullanılan her iki diyagonal demet donatı alanları aynı alınmış ve her ikisi de kapalı etriyelerle sarılmıştır. Kiriş montaj ve boyuna donatıları perdeler içerisine ankre edilmiştir (Şekil 3.5.). Uygulanan yatay yük sonucunda büyük yer değiştirme değerlerine ulaşılmış (145mm) ve diyagonal donatının burkulması ve betonun ezilmesi nedeniyle önemli hasar oluşmuştur.



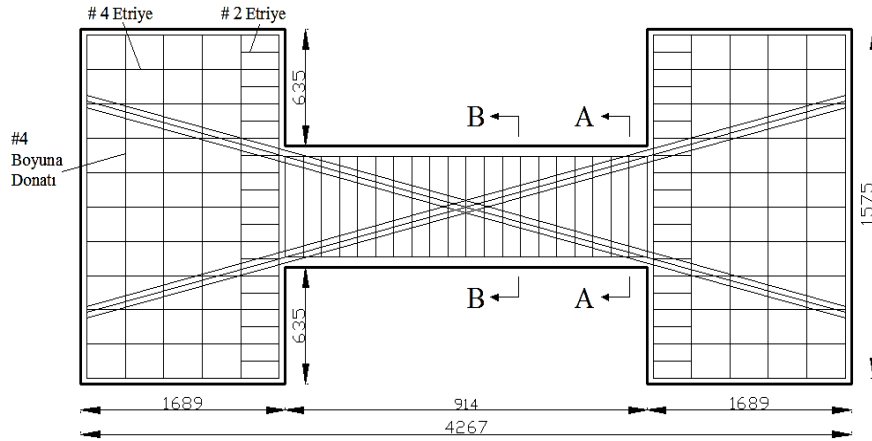
Şekil 3.5. Adebar ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayı [104]

Canbolat ve ark. [105], tarafından net açıklığın kesit yüksekliğine oranı 1 olan çok kısa diyagonal donatılı bağ kirişi testi yapılmıştır. Her bir diyagonal donatı demeti aynı kesit alanına sahip olup enine donatılarla sargılanmıştır. Kiriş montaj ve boyuna donatıları ile birlikte diyagonal donatıların tümü perde duvar içerisine ankre edilmiştir (Şekil 3.6.). Yapılan deney sonuçlarına göre diyagonal donatı demetlerinde herhangi bir burkulma ve ankraj problemi gözlenmemiştir. Büyük yer değiştirme değerlerinde bağ kirişleri tarafından oldukça önemli derece enerji sönümlenme gerçekleştirildiği görülmüştür.



Şekil 3.6. Canbolat ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayları [105]

Fortney ve ark. [106], tarafından net açıklığın kiriş yüksekliğine oranı 3,0 olan bağ kirişi çevrimsel yük etkisi altında test edilmiştir. Diyagonal donatı demetleri eşit olarak alınmış ve perde duvarlar içerisine ankre edilmiş ve çevrimsel yük uygulanmıştır (Şekil 3.7.). Deneysel sonuçları ACI318-05 ile karşılaştırılmıştır. Diyagonal donatı oranının artmasıyla çevrimsel davranışta yüksek süneklik elde edilmiştir. Büyük yer değiştirme değerlerine kadar donatılarda herhangi bir burkulma gözlenmemiştir. Ancak kiriş uzunluğu boyunca yerel eğilme ve kesme çatlakları oluşmuştur.



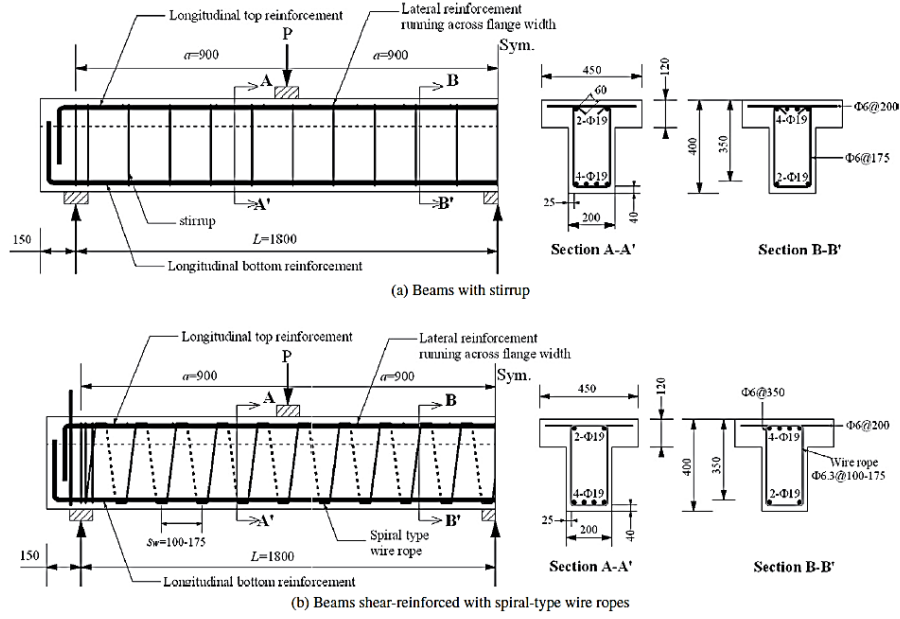
Şekil 3.7. Fortney ve ark.'na ait bağ kirişi donatı detayı [106]



### 3.2. Betonarme Kirişler

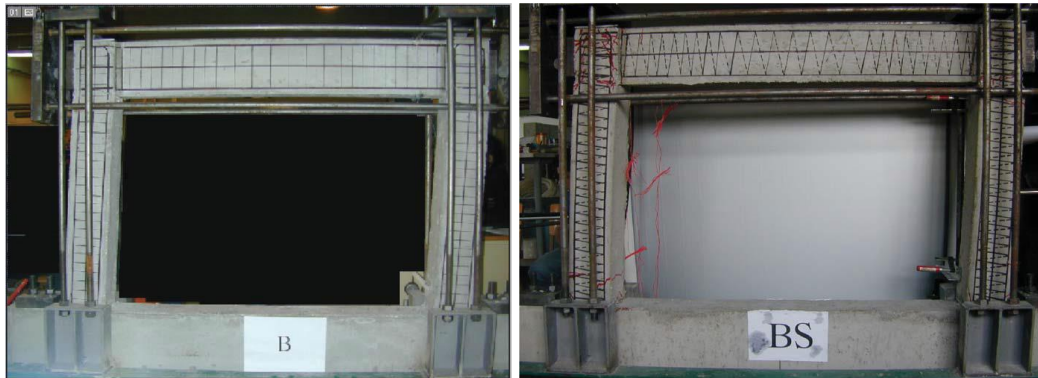
Betonarme kirişler, betonarme yapılarda kolon ve perde gibi düşey taşıyıcı elemanları birbirine bağlayan eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisindeki elemanlardır. Kirişlerde aksel kuvvet değerinin çok küçük olması gerekmektedir. Bununla birlikte bazı durumlarda kesme kuvveti, eğilme momentine oranla daha kritik değerlere ulaşabilmektedir. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme ve eğilme dayanımları ile süneklik düzeylerinin artırılması amacıyla tasarım aşamasında gerçekleştirilen donatı detaylandırmasına ait bazı çalışmalar aşağıda sunulmuştur [5, 7-12] ve [93, 107-110].

Yang ve ark. [5], tarafından yapılan çalışmada yüksek dayanımlı ve yüksek sünekliğe sahip spiral çelik tel halatların betonarme kirişlerin içerisinde etriye olarak kullanılması incelenmiş ve bu kirişlerin oldukça iyi kesme davranışı gösterdiği belirtilmiştir. Çelik tel halatlı T-kesitli betonarme kirişler kesme dayanımının belirlenmesi için test edilmiştir. 1800mm uzunluğundaki T-kesitli kirişe orta noktadan yükleme yapılmıştır. Test edilen kirişlerin kesme kapasiteleri yönetmeliklerde verilen plastisite teorisi denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre etriye olarak spiral çelik tel halat kullanımının kirişlerin sünekliğini artırdığı ve çatlak oluşumunda oldukça etkili olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.8.).



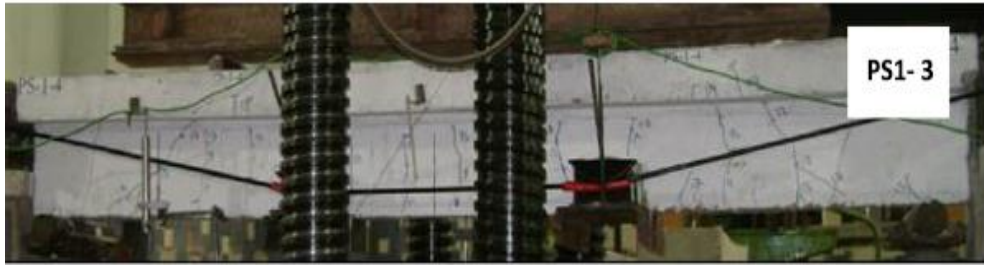
Şekil 3.8. Yang ve ark.'na ait kiriş detayı [5]

Kakaletsis ve ark. [6], tarafından yapılan çalışmada iki farklı kesme donatı tipi tek açıklıklı tek katlı kiriş ve kolon çerçeve sistemin yatay kapasitesini belirlemek amacıyla test edilmiştir. Kesme donatılarından biri standart etriye diğeri ise spiral kesme donatısı olarak seçilmiştir. Farklı dolgu malzemelerine sahip 1/3 ölçekli çerçeve elemanlar çevrimsel yük etkisi altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda spiral donatılı çerçeve sistemler geleneksel etriye sistemine oranla daha etkili ve daha sünek davranış göstermiştir. Yatay yük kapasitesine bakıldığında ise spiral donatılı çerçeve sistemde çok az bir artış meydana gelmiştir (Şekil 3.9.).



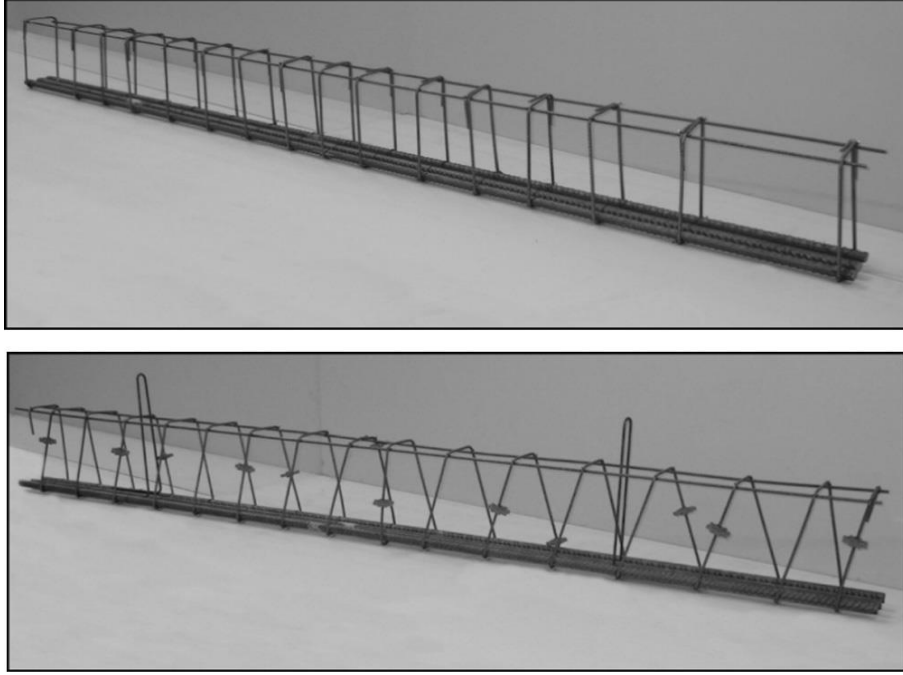
Şekil 3.9. Kakaletsis ve ark.'na ait çerçeve detayı [6]

Ghallab ve ark. [12], tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişlerin kesme ve eğilme dayanımlarını artırmak amacıyla dıştan öngermeli parafil halatlar kullanılmıştır. Toplam beş adet kirişin dördü parafil halat ile güçlendirilmiş ve hasar oluşuncaya kadar yükleme yapılmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı, kesme davranışı üzerinde en büyük etkiye sahip olmuştur. Ayrıca parafil halat kullanılan kirişlerde elde edilen kesme çatlağı oluşum yük değeri %200 ve maksimum yük değeri %75 artmıştır. Deneylelerden elde edilen kesme kuvveti değerleri yönetmeliklerden hesaplanan değerler ile karşılaştırılmış ve yönetmelik sonuçlarının güvenli tarafta olduğu belirtilmiştir (Şekil 3.10.). Çalışmada kullanılan parafil halatlar kesit içerisinde olmayıp dışarıdan uygulanan bir güçlendirme niteliğindedir. Tek yönlü kesme kuvveti karşılaması ve kesit dışına uygulanması nedenleriyle etkin ve sağlıklı değildir.



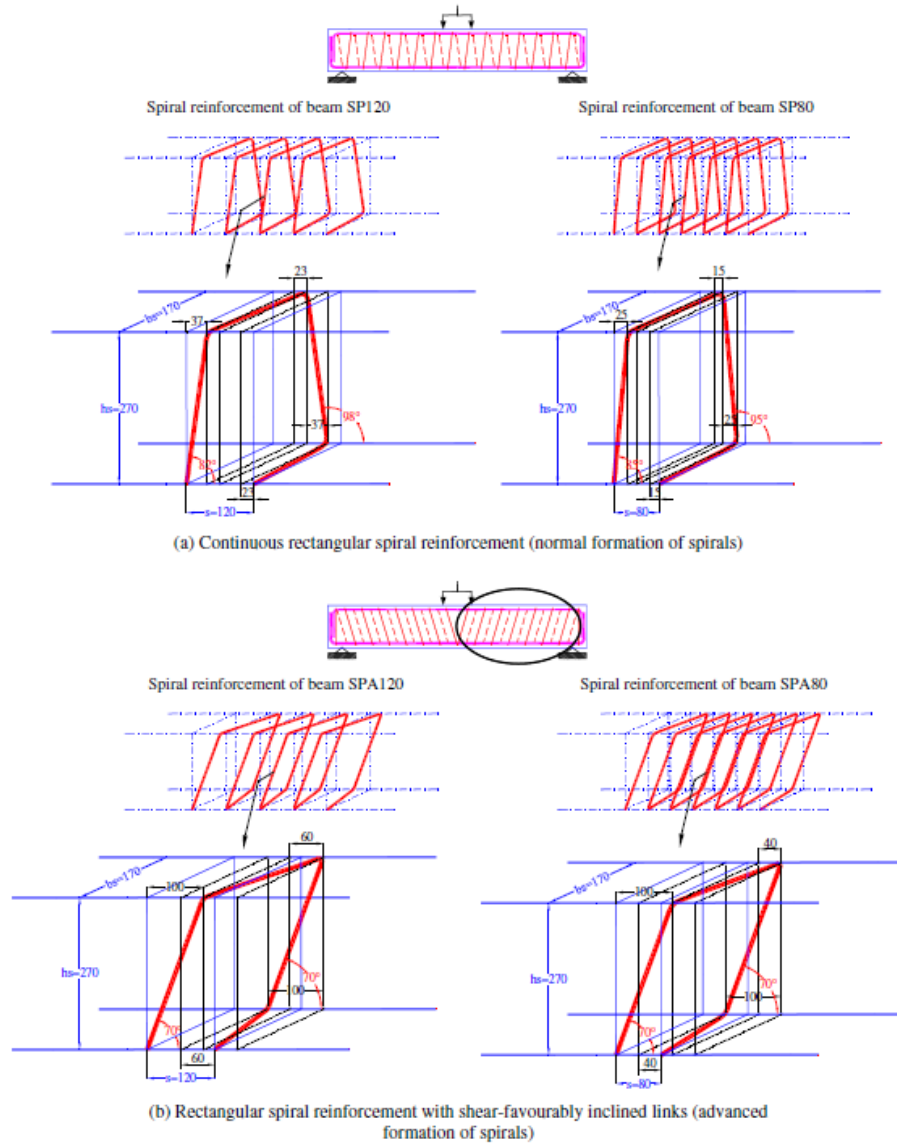
Şekil 3.10. Ghallab ve ark.'na ait kiriş detayı [12]

Corte ve Boel [7], yaptıkları çalışmada betonarme kirişlerin kesme donatıları genellikle geleneksel etriyelerden oluştuğu, bireysel etriye yerine devamlı spiral kafes etriye üretiminin maliyeti düşürebileceği düşüncesi ile spiral kesme donatılı 24 adet betonarme kirişi 4 noktalı eğilme deneyine tabii tutmuşlardır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı 2,5 ve 3 olarak alınmıştır. Kiriş boyutları 150x286x2400mm şeklindedir. Deney süresince çatlak oluşumu ve kırılma mekanizması incelenmiştir. Test sonuçlarına göre spiral şekilli kesme donatısının geçerli bir alternatif olduğu ve uluslararası yönetmeliklerde kullanılabileceği belirtilmektedir (Şekil 3.11.). Kullanılan spiral kafes etriyeler tek yönlü kesme kuvveti karşılaması ve uygulanabilirlik zorluğu nedeni ile etkin ve pratik olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.11. Corte ve Boel'e ait kiriş detayı [7]

Karayannis ve Chalioris [8], yaptıkları çalışmada etriye görevi gören sürekli spiral donatılı dikdörtgen kesitli sekiz adet betonarme kirişin kesme davranışını monotonik yük altında deneysel olarak incelemişlerdir. 200x300x1840mm boyutlarındaki numunelerin kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı 3 olarak alınmış ve dört nokta yükleme deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına bakıldığında sürekli spiral donatılı betonarme kirişlerin taşıma gücü ve kesme performanslarında artış belirlenmiştir. 120 ve 80mm aralıklarla yerleştirilen sürekli spiral donatılı kirişlerin kesme kapasiteleri sırasıyla %17,2 ve %21,7 oranında artmıştır. Ayrıca bu kirişlerin süneklik değerleri 2,1 ve 2,6 oranında artış göstermiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Karayannis ve Chalioris'e ait kiriş detayı [8]

Al-Nasra ve Asha [9], yaptıkları deneysel çalışmada, kesme davranışı belirlenmek üzere dört farklı kesme donatısı tasarımına sahip dokuz adet betonarme kirişi test etmişlerdir. Bu çalışmada, 200x250x2000mm boyutlarındaki numunelerin kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı 2,5 olarak alınmış ve bu kirişlere dört nokta yükleme deneyi uygulanmıştır. Bu kesme donatıları standart etriye, boyuna donatıya kaynaklı ve bulonlu donatı çubuğu olarak dikkate alınmıştır. Tüm kirişler kesme dayanımı ve düşey yer değiştirme açısından karşılaştırılmıştır. Eğik olarak uygulanan etriyelerin kirişlerin kesme dayanımını arttırdığı gözlenmiştir. Eğik etriyeli kirişlerde oluşan kesme çatlakları ve genişliğinin standart etriyeli kirişlere göre daha az olduğu

tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada eğik etriyeli kirişlerin standart etriyeli kirişlere göre daha olumlu davranış sergilemesi, eğik donatının asal çekme gerilmeleri yörüngesinde uygulanmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 3.13.). Kullanılan kaynaklı ve bulonlu eğik donatılar tek yönlü kesme kuvveti karşılması nedeniyle etkin olmadığı görülmektedir.



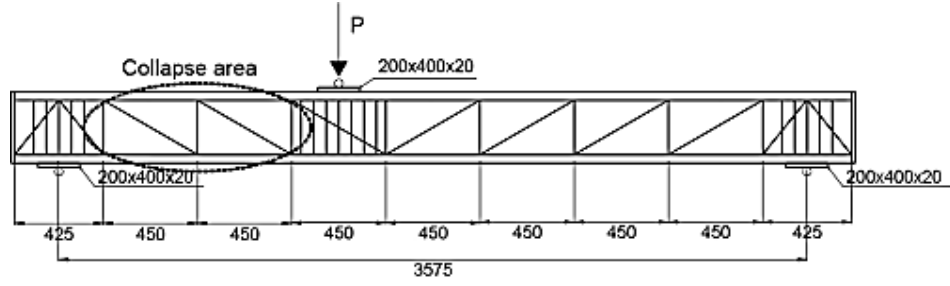
Şekil 3.13. Al-Nasra ve Asha'ya ait kiriş detayları [9]

Al-Nasra ve ark. [10], tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmak amacıyla yeni bir kesme donatı tipi kullanılmıştır. Bu sistemde eğik donatılar, montaj ve boyuna donatıya kaynaklanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yeni kesme donatısı tipi geleneksel etriye sistemi ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada sehim ve çatlak gelişimi de belirlenmiştir. Önerilen yeni kesme donatısı tipi betonarme kirişin kesme kapasitesine önemli katkılar sağlayarak, sehimleri azaltmış ve çatlak gelişimini kontrol altına almıştır. Bu sistemin geleneksel etriye sistemine oranla daha büyük avantaj sağladığı ifade edilmektedir (Şekil 3.14.). Kullanılan kaynaklı eğik donatılar tek yönlü kesme kuvveti karşılması nedeniyle etkin olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.14. Al-Nasra ve ark.'na ait kesme donatı tipi [10]

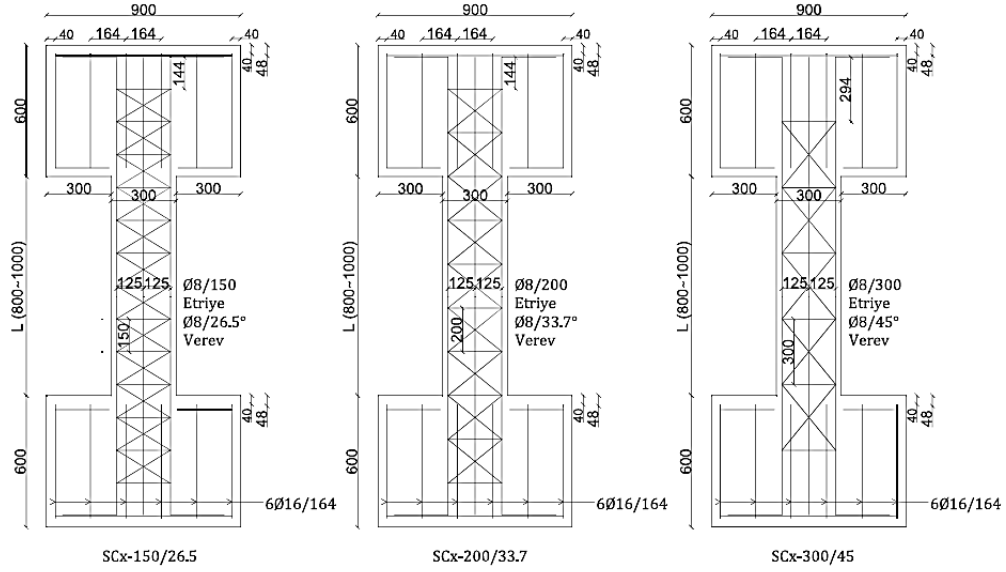
Colajanni ve ark. [11], yaptıkları çalışmada, 9 adet betonarme kirişi kesme davranışını belirlemek amacıyla test etmişlerdir. Tüm kirişler 316x500x4000mm boyutlarında hazırlanmış olup kirişlerde üstte boyuna donatı altta çelik levha ve ikisini kaynakla birbirine bağlayan çapraz gövde donatıları bulunmaktadır. Numuneler A, B ve C olmak üzere üç farklı tipte hazırlanmıştır. Birinci tip kirişte altta boyuna donatı bulunmazken ikinci tip kirişlerde 3Ø40 ve üçüncü tip kirişlerde 5Ø40 donatı kullanılmıştır. Tüm kirişlerde 4Ø40 üst donatı kullanılmıştır. Mesnet ve yükleme noktası yakınlarında yaklaşık 6Ø10 etriye kullanılmıştır. Ayrıca kirişlerin her iki ucunda düşey çelik plakalar yerleştirilmiştir. İki noktadan yer değiştirme ölçerler kullanılarak yük-yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, ayrıca ABAQUS programı ile kesitler modellenerek çelik taban plakası için farklı çelik-beton ara yüzleri kullanılmış ve kirişlerin kesme dayanımı için parametrik bir araştırma da yapılmıştır. Bu çalışma neticesinde eğilme momentleri A, B ve C numuneleri için sırası ile 925, 1090 ve 1100 kNm, kesme dayanımları ise 350 ve 500kN arasında olduğu gözlemlenmiştir. Tip B ve Tip C numunelerinin kesme ve eğilme kapasiteleri açısından Tip A ya göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 3.15.). Kullanılan çelik taban plakalı ve eğik donatılı kiriş tek yönlü kesme kuvveti karşılaması nedeniyle etkin ve uygulanabilir olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.15. Colajanni ve ark.'na iat giriş detayı [11]

Dirikgil [13], tarafından yapılan çalışmada betonarme kısa kolonların verev donatılarla tasarlanmasına ilişkin deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sekiz adet betonarme kısa kolonu içeren iki seriden oluşmaktadır. Serilerdeki kısa kolon yükseklikleri 800 ve 1000mm olup referans kolon 100mm, verev donatılı kolonlar ise 150, 200 ve 300mm etriye adım mesafesine sahiptir. Deney sonuçlarına bakıldığında kısa kolonlarda etriye aralarına yerleştirilen verev donatılar, kısa kolon performansının iyileştirilmesinde ve gevrek davranış oluşumunun azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca verev donatılar kesitin kesme kapasitesini artırmanın yanı sıra rijitliği artırarak yatay yük etkisiyle betonda meydana gelen deformasyonları azaltmaktadır. Nümerik çalışma sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerine bakıldığında başlangıç noktası-tepe yük değeri arasındaki kısım oldukça başarılı bir şekilde modellenmiştir. Ancak tepe noktası sonrası meydana gelen dayanım kaybını yansıtmamanın mümkün olmadığı belirtilmektedir (Şekil 3.16.).





Şekil 3.16. Dirikgil'e ait kısa kolon donatı detayları [13]

### 3.3. Sonlu Elemanlar

Sonlu eleman analizleri mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan sayısal hesaplama yöntemidir. Geometrisi karmaşık yapılar daha basit yapılara dönüştürülerek küçük parçalara ayrılır ve alt çözüm bölgeleri oluşturularak hassas hesaplar yapılır. Betonarme yapı ve yapı elemanlarının doğrusal olmayan analizlerini yapmak için son yıllarda inşaat mühendisliğinde yaygın olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Literatürde yapısal elemanların modellenmesi ve doğrusal olmayan analizleri konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır [40, 111-132]. Bu çalışmalardan bazıları burada sunulmuştur.

Adhikary ve Mutsuyoshi [40], tarafından yapılan çalışmada alt yüzeyine epoksi ile çelik plaka yapıştırılarak güçlendirilen betonarme kirişler için sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. 200x250x2160mm boyutlarında deneyleri yapılmış betonarme kirişler modellenmiştir. Hazırlanan sonlu eleman modeli ile çelik plakalarla güçlendirilen kirişlerin hasar mekanizmasının belirlenebildiği belirtilmiştir. Yük-yer değiştirme ve plakada meydana gelen şekil değiştirme eğrilerinin deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirtilmektedir.

Chen ve ark. [131], tarafından yapılan çalışmada beton-etriye, beton-çekme donatısı ve beton-FRP olmak üzere 3 farklı arayüz modeli kullanılarak kesme dayanımı artırılan betonarme kirişler için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu üç farklı model için sıyrılma aderansı incelenmiştir. Analizler sonucunda her üç model içinde aderans davranışının, betonarme kirişin kesme davranışı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu ifade edilmektedir. FRP ile güçlendirilen kirişlerin davranışları doğru bir şekilde elde edilirken etriye ve çekme donatısı ile beton arasındaki aderans davranışı için daha fazla çalışma yapılması gerektiği belirtilmektedir.

Sayed ve ark. [132], tarafından yapılan çalışmada FRP şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme davranış modeli 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Kiriş genişliği, beton dayanımı, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı, FRP kalınlığı ve güçlendirme konfigürasyonu (tam sargı, U sargı ve yan yüzeylere yapıştırma) gibi değişkenler dikkate alınarak 55 adet nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin doğrulanması için önceki deneysel çalışmalardan elde edilen 274 kiriş sonucu kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre önerilen modelin FRP şeritler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin belirlenmesinde başarılı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca yan yüzeylere yapıştırma, U sargı ve tam sargı şeklindeki üç farklı sargı modelinden elde edilen kesme dayanımları referans kirişe kıyasla sırasıyla %18,9, %17 ve %18,3 olarak belirlenmiştir.

Obeidah ve ark. [126], tarafından yapılan çalışmada kesme dayanımı yetersiz basit mesnetli betonarme kirişler dış yüzeyinden alüminyum levhalarla güçlendirilmiş ve kesme kapasitesinin belirlenmesi amacıyla 3 boyutlu sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Deneysel aşamada 4 adet kiriş alüminyum plakalarla güçlendirilerek dört nokta yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Nümerik aşamada ise 5 adet sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Sonlu eleman modelinde beton için çekme ve basınç davranışlarını içeren malzeme modeli ile alüminyum plaka ve donatı için akma davranış modeli dikkate alınmıştır. Ayrıca alüminyum plaka ile beton arasında aderans modeli tanımlanmıştır. Nümerik analiz sonucu bulunan yük-yer değiştirme eğrisi

deneysel çalışma sonucu ile karşılaştırılmıştır. Maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla %1,19 ve %4,31 hata ile belirlenmiştir.

Dirikil [13], tarafından deneysel çalışmaları gerçekleştirilen verev donatılı betonarme kısa kolonların performansları nümerik olarak incelenmiştir. Kısa kolon yükseklikleri 800 ve 1000mm olup referans kolon 100mm, verev donatılı kolonlar ise 150, 200 ve 300mm etriye adım mesafesine sahiptir. Boyuna donatısı 8Ø16, en kesit boyutları 300x300mm ve kesme oranı 1,33 ve 1,67 olan kısa kolonlar için üç boyutlu modeller oluşturulmuş ve tek doğrultuda itme analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmalarda ANSYS programından yararlanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda yatay yük-yatay yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Elde edilen itme eğrileri deneyler sonucu bulunan eğrilerin tepe noktalarını keserek devam ederken dayanım ve yer değiştirme değerlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu belirlenmiştir. Nümerik çalışma sonucunda deneysel çalışma sonuçlarında olduğu gibi verev donatıların etkinliğinin net bir şekilde ortaya konulduğu belirtilmektedir [13].

Demir ve ark. [128], tarafından T kesitli betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak amacıyla kullanılan çapraz kesme donatılarının etkinliğini araştırmak için sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Literatürden elde edilen kesme ve eğilme hasar durumuna sahip iki adet kiriş için öncelikle nümerik modellerin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu kirişlere çapraz kesme donatıları eklenerek parametrik çalışma yapılmıştır. Betonun inelastik davranışının tanımlanmasında beton hasar plastisite modeli ve donatı için pekleşmeyi dikkate alan elastik ve inelastik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Donatının beton içerisinde gömülü olduğu kabulü yapılmıştır. Nümerik çalışma sonucunda çalışmada önerilen çapraz kesme donatılarının kesme ve süneklik kapasitesine önemli katkısı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca çapraz kesme donatısının çap ve akma dayanımındaki artış sayesinde kesme dayanımı yetersiz kirişler eğilme hakim davranış göstermiştir. Kullanılan malzeme modelleri ve sonlu eleman tekniğinin betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesinde etkili ve güvenilir olduğu belirtilmektedir.

### 3.4. Literatür Değerlendirmesi ve Çalışmanın Önemi

Betonarme kirişler, bazı durumlarda yük etkisi altında oluşan kesme kuvvetlerini karşılayamayarak beklenen sünek davranış yerine gevrek bir davranış ortaya koyarlar. Bu şekilde gevrek davranış sergileyen betonarme kirişler için çok sayıda deneysel ve nümerik araştırmalar yapılmıştır.

Betonarme çok katlı yapıların zemin katlarında kirişlerin kesme kuvveti değerleri oldukça artmakta ve kritik değerlere ulaşabilmektedir. Bununla birlikte, betonarme yapılarda mimari zorunluluklar ve iki perde arasında bağ kirişi yapılması gibi nedenlerle kısa kirişler oluşturulabilmektedir. Betonarme kısa kirişlerde diğer kirişlere oranla kesme davranışı hakimdir. Bu durumda kesme kapasitesinin iyileştirilmesi ve özellikle betonarme kısa kirişlerde kesme davranışının incelenmesi ve bu kirişlerin kesme kapasitelerinin artırılması önem kazanmaktadır.

Betonarme kirişlerin dayanım ve kesme kapasitesinin artırılmasına yönelik olarak yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları genellikle betonarme manto, çelik lif, çelik levha yapıştırma, kelepçe, lifli polimer (FRP, CFRP, GFRP, AFRP) türevleri olarak sayılabilir. Bununla birlikte, sınırlı sayıda olmakla beraber farklı donatı konfigürasyonları kullanılarak betonarme kirişlerin dayanım ve kesme kapasitesinin artırılmasına yönelik deneysel ve nümerik çalışmalar da son yıllarda hızla artmaktadır.

Bu tez kapsamında, kısa kiriş davranışı gösteren betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve sünekliğinin artırılmasına yönelik olarak deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, literatürde yapılan birçok çalışmadan farklı olarak betonarme kısa kirişlerin tasarım aşamasında uygulanmak üzere yeni, basit ve etkin bir uygulama olarak “çapraz kesme donatısı” önerilmektedir. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan önemli özelliklerinden biri de alternatif bir donatı tasarım düzeni öneriyor olmasıdır. Önerilen çapraz kesme donatısı ile betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımında önemli iyileşmeler sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında betonarme kirişlerin 3 boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve bu modellerin doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Elde edilen

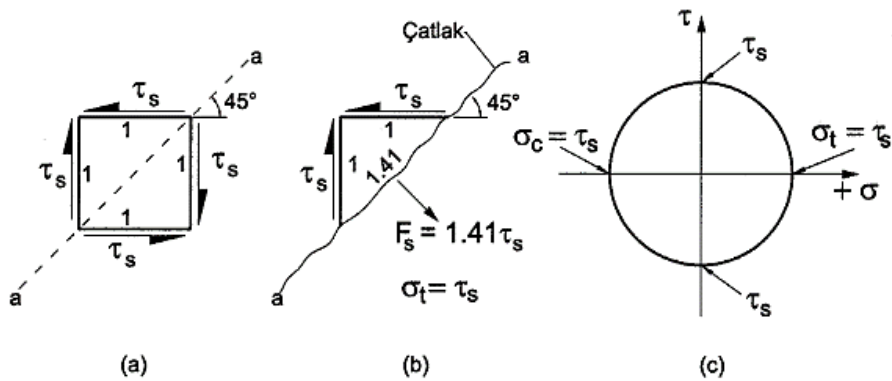
sonuçlar dikkate alındığında önerilen çapraz kesme donatılarının uygulamaya yönelik önemli katkılar sağlayacağı açıktır.

## BÖLÜM 4. BETONARME KİRİŞLERDE KESME DAVRANIŞI

Betonarme kirişlerin kapasitelerine sünek bir şekilde ulaşabilmesi için eğilme davranışı hâkim olan ve kesme kırılmasından kaçınılan bir tasarım yapılması gerekmektedir. Kesme kırılması eğilmeye oranla ani olarak meydana gelen gevrek bir kırılma şeklidir [15]. Kesme dayanımı yetersizliğinin birçok nedeni vardır. Bunlar; yetersiz kesit boyutları, beton kalitesi, kesme donatısı miktarı, korozyon gibi nedenlerden dolayı donatı miktar ve dayanımındaki azalış, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı ( $a/d$ ), mesnetlenme şekli, kirişlerdeki hesap yük değerinin artması, yapım ve detaylandırma hataları şeklinde sayılabilir [72].

Deprem etkisi ile oluşan kesme çatlakları eğik bir şekilde oluşur ve yaklaşık  $45^\circ$ 'lik bir açı yapar. Kesme çatlak genişliğinin fazla olması, kesme donatısının yetersiz olduğunu gösterir. Bu duruma gelmiş bir kesme çatlak oldukça tehlikelidir. Eğilme çatlakmasının neden olduğu kırılmanın sünek olmasına karşın, kesme çatlaklarının neden olduğu kırılma son derece gevrek ve tehlikeli olabilir [133].

Betonun kesme ve basınç dayanımları, çekme dayanımına oranla daha yüksek olduğundan basit kesme durumunda dahi kırılma, kesme gerilmelerinin etkideği yüzeye  $45^\circ$ 'lik açı yapan asal çekme gerilmeleri nedeniyle meydana gelir (Şekil 4.1.). Asal çekme gerilmeleri etkisiyle oluşan bu çatlak eğik çatlak ve buna neden olan gerilme de eğik çekme olarak isimlendirilir. Asal çekme gerilmelerinin neden olduğu eğik çatlaklar oldukça tehlikelidir ani ve gevrek kırılmaya neden olabilir [134].



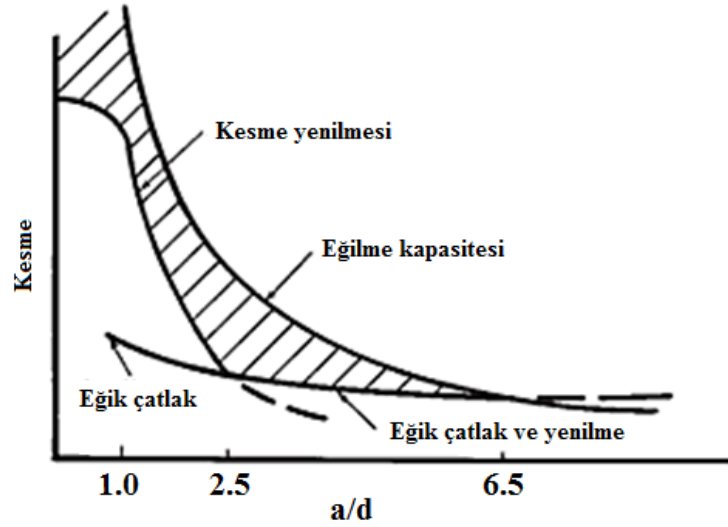
Şekil 4.1. Basit kesme etkisi altında asal gerilmeler [134]

Betonarmede önemli bir problem olan ve gevrek kırılmaya neden olan eğik çatlaklar, kesme gerilmelerinden değil asal çekme gerilmelerinden oluşmaktadır. Bu nedenle alınacak önlemler kesme gerilmeleri için değil çekme gerilmeleri için olmalıdır. Betonarme elemanlarda oluşan çatlama ve kırılmalara kesme gerilmelerinin etkisi ile oluşan asal çekme gerilmelerinin neden olduğu bilgisi ilk kez Ritter ve Mörsch tarafından ortaya konulmuştur [134-136].

#### 4.1. Kesme Donatısız Kirişler

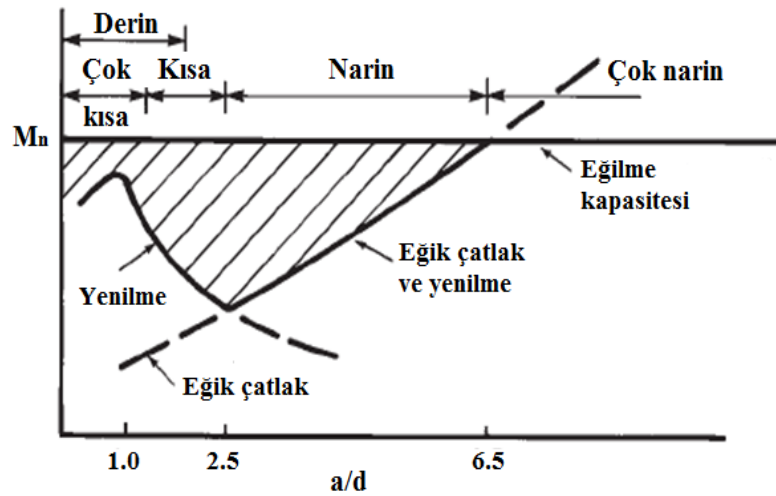
Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarında kesme gerilmeleri ne kadar küçük olursa olsun kesme donatısı bulundurulması zorunludur [137]. Ancak bu kısımda kesme donatısının davranışının anlaşılabilmesi için kesme donatısı bulunmayan betonarme kirişlerin davranışları hakkında bilgi verilmektedir.

Betonarme kirişte kesme kuvvetinin sabit olduğu kesme açıklığı,  $a$  boyu olarak isimlendirilir. Kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı ( $a/d$ ) ise çatlak eğiminin bir ölçüsü olarak alınabilir. Kesme kuvveti etkisinde kalan bir kirişin kırılma biçimi oldukça karmaşıktır (Şekil 4.2.). Bu kırılma türü, yükleme şekline, yükün mesnete olan uzaklığına ( $a$ ), kiriş faydalı yüksekliğine ( $d$ ), beton basınç dayanımına, kesme, basınç ve çekme donatı miktar ve düzenine bağlı olarak değişmektedir [16, 138].



Şekil 4.2.  $a/d$  oranının kesme dayanımına etkisi [138]

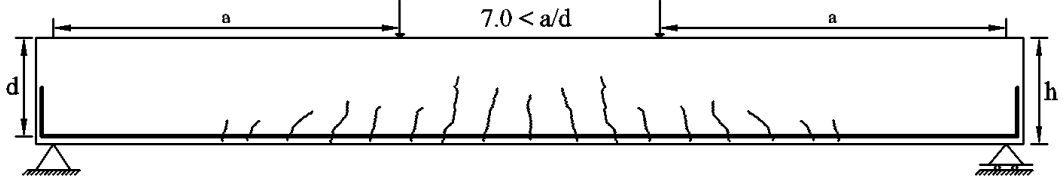
Kirişler kesme açıklığına bağlı olarak, çok kısa, kısa, narin ve çok narin olmak üzere 4 sınıfa ayrılabilir (Şekil 4.3.). Kısa kiriş terimi kısa ve çok kısa kesme açıklığına sahip kirişleri tanımlamaktadır. Çok kısa kesme açıklığı, kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı ( $a/d$ ) 0 ile 1 arasında olan kirişleri simgeler. Bu durumda eğik çatlak yük ile mesnet arasında oluşur. Şekil 4.3.'den görülebileceği gibi kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranı ( $a/d$ ) 2 ile 2,5 arasında olması durumunda kiriş davranışı oldukça önemli değişiklikler göstermektedir. Bu değerden daha büyük kesme açıklıklarında ise kirişte lineer gerilme dağılımı gösteren Bernoulli davranışı görülür [139].



Şekil 4.3. Çatlama ve kırılma momentleri [139]

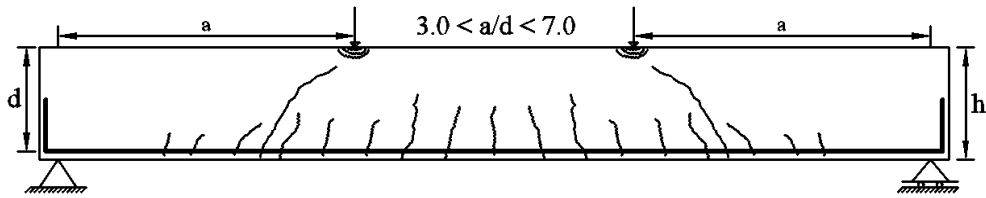


$a/d > 7,0$  olması durumunda kiriş eğilme etkisiyle taşıma gücüne erişecektir. Eğik çatlaklar oluşmadığı için oluşan kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi yoktur. Yani kesme açıklığı büyük olduğu için eğilme kapasitesine ulaşan kirişte kesme kuvveti düşük değerlerde kalmaktadır (Şekil 4.4.) [16, 134].



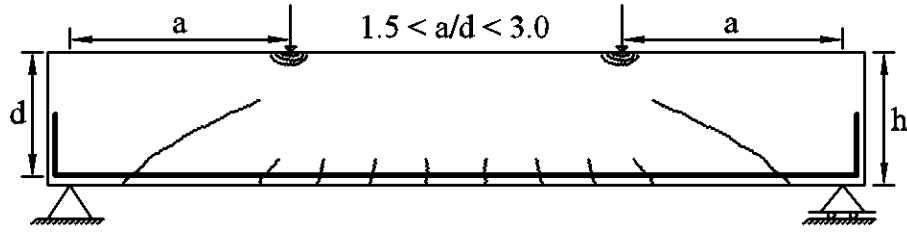
Şekil 4.4. Kirişlerde  $7,0 < a/d$  oranının kiriş davranışına etkisi [16]

$7,0 > a/d > 3,0$  olması durumunda öncelikle kiriş eksenine dik şekilde eğilme çatlakları oluşur. Yükün artmasıyla kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzar. Uzayan çatlaklardan bazıları asal çekme gerilmelerine dik yönde eğilmeye başlar ve artık tam bir eğik çatlama durumu söz konusu olur. Bu esnada çekme donatısında meydana gelen birim uzamada ani sıçrama gözlenir. Bu sıçrama eğik çatlamanın neden olduğu gerilme uyumunu gösterir (Şekil 4.5.) [16, 134].



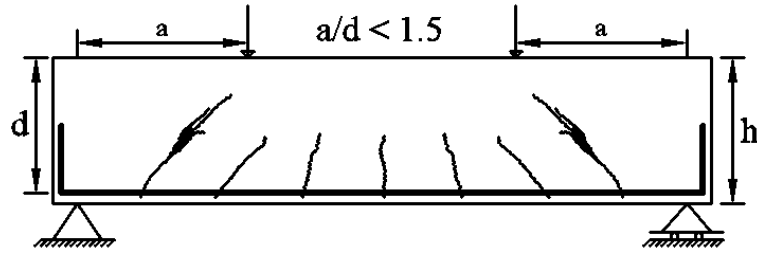
Şekil 4.5. Kirişlerde  $3,0 < a/d < 7,0$  oranının kiriş davranışına etkisi [16]

$3,0 > a/d > 1,5$  olması durumunda noktasal yük nedeniyle oluşan basınç gerilmeleri sonucu eğik çekme çatlakları mesnet bölgesi ile yükün uygulandığı noktaya doğru ilerler. Mesnet ve yük uygulama noktası arasında adeta basınç çubuğu oluşur. Eğik çatlak oluşmasına rağmen kirişte ani kırılma meydana gelmez ve kiriş yük taşımaya devam eder. Eğilmenin yanısıra gergili kemer davranışı oluşur. Yük arttıkça beton basınç dayanımına ulaşır ve ezilir. Kirişin güç tükenmesi, kemerlenme etkisiyle oluşan beton basınç çubuğunun ezilmesi ve dağılması ile ortaya çıkar. Bu kırılma türü de ani ve habersiz bir şekilde meydana gelmektedir [15]. Kesme-ezilme olarak adlandırılan bu kırılma türünde kırılma yükü çatlama yükünden büyüktür (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Kirişlerde  $1.5 < a/d < 3.0$  oranının kiriş davranışına etkisi [16]

$1.5 > a/d$  olması gibi kesme açıklığının çok küçük olması durumunda eğik çatlaklar oluşur ve eğilme etkisi kaybolur. Kiriş tamamen gergili kemer davranışı gösterir. Çekme donatısı gergi gibi davranırken beton kemer gövdesi davranışı gösterir. Yük mesnetlere eğilme ile değil basınç çubuğu aracılığı ile aktarılır. Mesnet bölgesinde oluşan yüksek gerilmeler nedeni ile kenetlenme sorunu ortaya çıkar. Bazı yapılardaki kısa açıklıklı kirişlerde bu tür kırılmalara rastlanmıştır (Şekil 4.7.) [16, 134].



Şekil 4.7. Kirişlerde  $a/d < 1.5$  oranının kiriş davranışına etkisi [16]

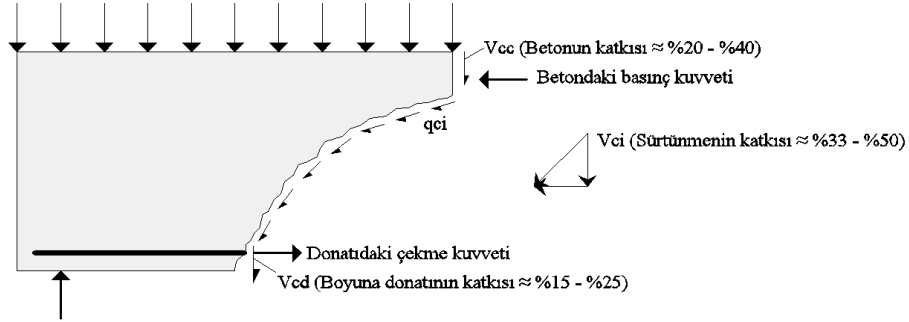
#### 4.1.1. Kesme donatısız kirişlerin davranışları

Kesme donatısı olmayan ve eğik çatlakın olduğu bir kirişte kesme kuvveti üç adet iç kuvvet ( $V_{cc}$ ,  $V_{ci}$  ve  $V_{cd}$ ) tarafından karşılanmaktadır (Şekil 4.8.).

$V_{cc}$ : Betonda çatlamamış basınç bölgesi tarafından taşınan kesme kuvvetidir. Kesme kuvvetini karşılamakta yaklaşık olarak %20-%40 katkı sağlamaktadır.

$V_{ci}$ : Çatlak yüzeyindeki sürtünme etkisiyle karşılanan kesme kuvvetidir. Kesme kuvvetini karşılamakta yaklaşık olarak %33-%50 katkı sağlamaktadır.

$V_{cd}$ : Çekme donatısı tarafından karşılanan kesme kuvvetidir. Kesme kuvvetini karşılamakta yaklaşık olarak %15-%25 katkı sağlamaktadır [16].



Şekil 4.8. Kesme donatısız kiriş [16]

## 4.2. Kesme Donatılı Kirişler

Kesme kuvveti etkisiyle oluşan eğik çekme gerilmelerini sadece beton ile karşılamak güvenli ve ekonomik değildir. Yönetmeliklerimizde kesme kuvvetleri ne kadar küçük olursa olsun eleman boyunca kesme donatısı yerleştirilmesinin zorunlu olduğu ibaresi yer almaktadır [137].

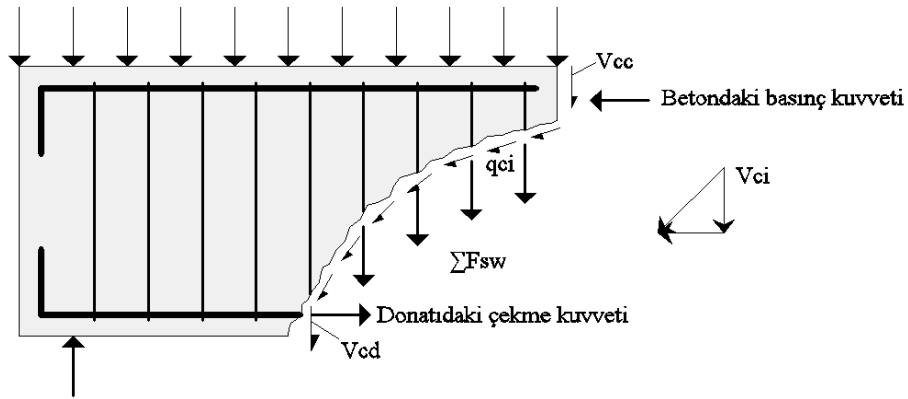
Kesme donatıları genellikle etriye, pilye ve hasır donatı olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir. Etriyeler boyuna donatıya  $45^\circ$  ve daha büyük açı yapacak şekilde belirli aralıklarla bireysel olarak yerleştirilir. Bu açı genellikle  $90^\circ$  olup boyuna donatıya dik olacak şekildedir [16].

Pilyeler kiriş boyuna donatısının kiriş eksenine belirli bir açı yapacak şekilde bükülmesi ile oluşturulur. Bu açı genellikle  $45^\circ$ 'dir. Pozitif momentin azaldığı mesnete yakın bölgede donatı bükülerek pilye oluşturulur. Momentin işaret değişmesi nedeniyle pozitif ve negatif moment oluşan bölgelerde çekme donatısı olarak katkı sağlayan pilyeler tek yönlü kesme kuvveti karşılaması nedeniyle özellikle deprem gibi yön değiştiren etkiler altında asal çekme gerilmelerine karşı tamamen etkisiz kalmaktadır. Bu nedenle pilyeler kesme dayanımına katkıları ihmal edildiği için artık kesme donatısı olarak kabul edilmemektedir. Kesme donatıları eğik çatlakların

oluşmasını engellemeyerek yalnızca bu çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlayabilir [16].

#### 4.2.1. Kesme donatılı kirişlerin davranışları

Kirişlerin kesme kuvvetleri etkisi altında ani ve gevrek kırılmalarını önlemek amacıyla yönetmeliklerde zorunlu olarak belirli aralıklarla enine donatı bulundurulması zorunluluğu bulunmaktadır. Boyuna donatılar eğilme çatlaklarının oluşumunu engelleyemeyeceği gibi enine donatılarda eğik çatlakların oluşumunu engelleyemez. Uygun şekilde yerleştirilen enine donatılar çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlayarak, elemanın kesmeden dolayı gevrek bir şekilde kırılmasını önler [16].



Şekil 4.9. Kesme donatılı kiriş [16]

Kesme donatısı bulunan kirişte kesme kuvveti dört adet iç kuvvet ( $V_{cc}$ ,  $V_{ci}$ ,  $V_{cd}$  ve  $\Sigma F_{sw}$ ) tarafından karşılanmaktadır (Şekil 4.9.).

$\Sigma F_{sw}$ : Eğik çatlağın kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamıdır.

Deprem yükleri nedeniyle oluşan kesme kuvvetleri, kiriş boyunca etkili olmakla birlikte en büyük değerlere mesnetlere yakın bölgelerde ulaşmaktadır. Bu bölgelerde kiriş eksenine dik eğilme ve köşegen kayma çatlakları oluşur. Özellikle kısa açıklıklı kirişler perdeye birleşiyorsa, mesnet bölgelerinde X şeklinde kayma çatlakları oluşabilir. Bu kısa kolonlarda meydana gelen duruma benzetilebilir. İki perde arasında bulunan bağ kirişlerinde ise bu tür çatlaklar her iki mesnette de meydana gelebilir ve

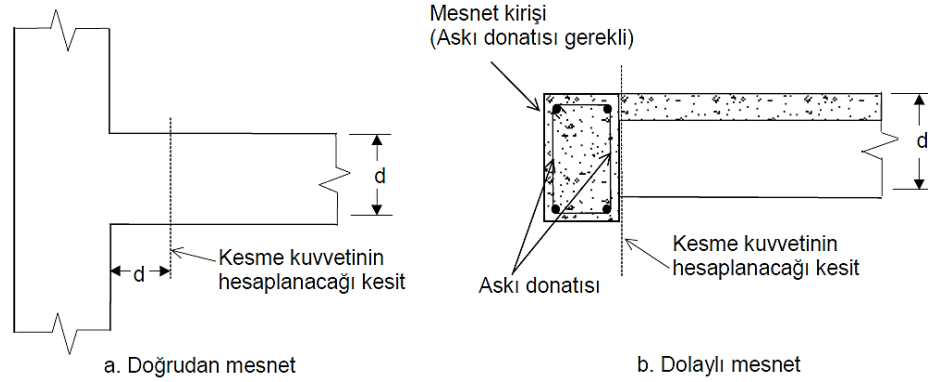
bunlar için önlem alınması gerekmektedir [15]. Kesme kuvvetlerini karşılamak düşüncesiyle pilye, eğik çekme gerilmeleri yörüngesince yerleştirilen eğik etriye ve hasır donatı uygulaması önerilmekle birlikte TDY2007 ve TS500'de kesme dayanımına pilyelerin katkısı ihmal edilmiştir. Bunun nedeni, deprem etkisinin tersinir özelliğinden dolayı kesme kuvvetinin yön değiştirmesidir. Dolayısıyla kesme kuvvetinin karşılanmasında, pilye ve eğik etriye gibi tek yönlü kesme kuvveti taşıyabilen uygulamaların etkileri kaybolur [15].

Kesme donatısız ve kesme donatılı kirişlerin davranışları incelendikten sonra aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

1. Kesme gerilmeleri sonucu oluşan asal çekme gerilmelerinin neden olduğu gevrek kırılmanın önlenmesi için minimum kesme donatısı bulundurulması zorunluluğu getirilmiştir.
2. Taşıyıcı sistem elemanlarının eğilme kapasitelerine kesme kırılmasından önce ulaşabilmesi için yeterli oranda kesme donatısı bulundurulması gerekmektedir.
3. Asal basınç gerilmeleri etkisiyle oluşabilecek gevrek kırılmayı önleyebilmek için kesme kuvvetine bir üst sınır konulmalıdır.

### **4.3. Kesme Donatısı Hesabı**

Betonarme yapı elemanlarında eğilme momenti ile birlikte kesme kuvvetlerinin de etkimesi durumunda oluşan asal çekme gerilmelerinin, beton ve kesite yerleştirilen kesme donatıları ile karşılanması gerekmektedir. TDY2007 ve TS500 şartnameleri doğrultusunda kesme kuvvetinin belirlenmesi ve kesme donatısı hesabı aşağıda verilmektedir.



Şekil 4.10. Mesnetlenme türleri [137]

Tasarım kesme kuvveti  $V_d$ , mesnet yüzünden  $d$  uzaklığında hesaplanmalıdır. Ancak, mesnet olarak başka bir eğilme elemanına oturan kirişlerde mesnet yüzündeki kesme kuvveti esas alınmalıdır. Tekil bir yükün mesnet yüzünden  $d$  veya daha az uzaklıkta etkimesi durumunda, mesnet yüzünde hesaplanan kesme kuvveti dikkate alınmalıdır (Şekil 4.10.).

TS 500'e göre Betonarme bir kesitin kesmede çatlama dayanımı ( $V_{cr}$ ), kesin bir hesap ihtiyacı duyulmadığı sürece aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.1) ile hesaplanır.

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctd} b_w d \left( 1 + \gamma \left( \frac{N_d}{A_c} \right) \right) \quad (4.1)$$

Kesme kuvveti etkisiyle oluşan kayma gerilmeleri ve eğilme momenti etkisiyle oluşan normal gerilmelere ek olarak normal kuvvetin de bulunması durumunda kiriş gövdesinde oluşan asal çekme gerilmeleri değişeceği için taşınabilecek kesme kuvveti değeri de değişecektir. Normal kuvvetin basınç olması durumunda basınç asal gerilmeleri artarken çekme asal gerilmeleri azalır. Bu durumda çekme gerilmeleri güç tükenmesi durumunda etkili olduğu için kesit tarafından daha büyük bir kesme kuvveti karşılanabilir. Normal kuvvetin çekme olması durumunda ise basınç asal gerilmeleri azalırken çekme asal gerilmeleri artar. Bunun sonucunda çekme çatlama esas alınarak hesaplanan kesme kuvveti değeri azalır [140]. Bu durumda çekme gerilmeleri güç tükenmesi durumunda etkili olduğu için kesit tarafından çok daha küçük bir kesme kuvveti karşılanabilir. Eksenel basınç bulunması durumunda  $\gamma = 0,07$ , eksenel çekme

bulunması durumunda  $\gamma = -0,30$  ve eksenel yükün çok küçük olması durumunda ise  $\gamma = 0$  alınacaktır (Denklem 4.2 ve Denklem 4.3). Burada,  $N_d$  tasarım eksenel yükü basınç veya çekme olması durumunda pozitif alınmalıdır [137].

$$V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_wd \left( 1 + 0,07 \left( \frac{N_d}{A_c} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_wd \left( 1 - 0,30 \left( \frac{N_d}{A_c} \right) \right) \quad (4.3)$$

Kesme güvenliği için  $V_r \geq V_d$  koşulunun sağlanması gerekir. Burada  $V_d$  tasarım kesme kuvvetini,  $V_r$  ise kesitin kesme dayanımını ifade etmektedir. Kesitin kesme dayanımı ise; beton katkısı ( $V_c$ ) ve kesme donatısı katkısının ( $V_w$ ) toplanması ile belirlenir (Denklem 4.4).

$$V_r = V_c + V_w \quad (4.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte (Denklem 4.4) beton katkısı ve kesme donatısı katkısı aşağıda verilen denklemlerle belirlenir. TS500'de beton katkısı, betonun kesmede çatlama dayanımının %80'i olarak alınması öngörülmektedir (Denklem 4.5 ve Denklem 4.6).

$$V_c = 0,8V_{cr} \quad (4.5)$$

$$V_w = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) f_{ywd} d (\sin \alpha + \cos \alpha) \quad (4.6)$$

Kesme donatısı katkısı hesabında kullanılan  $\alpha$  açısı eğik donatı kullanılması durumunda bu donatıların yatay ile yaptığı açıyı ifade etmektedir.

Gevrek kırılmanın önlenmesi için betonarme kirişlerde açıklık boyunca minimum kesme donatısı bulundurulması gerekmektedir. Bu koşul aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.7) ile sağlanmaktadır.

$$\left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \geq 0,3 \left(\frac{f_{ctd}}{f_{ywd}}\right) b_w \quad (4.7)$$

Tasarım kesme kuvveti, yüksek asal basınç gerilmeleri oluşarak gövde betonunun ezilmesini önlemek amacıyla aşağıdaki eşitlikte (Denklem 4.8) gösterildiği gibi sınırlandırılmıştır. Tasarım kesme kuvvetinin kesmede çatlama dayanımından küçük ya da eşit olması durumunda ( $V_d \leq V_{cr}$ ) kesme donatı hesabı yapılmaksızın yönetmeliklerde verilen minimum etriye yerleştirilebilir.

$$V_d \leq 0,22 f_{cd} b_w d \quad (4.8)$$

Kesme donatıları tarafından taşınması gereken kesme kuvveti, tasarım kesme kuvveti ile beton katkısının farkı kadardır (Denklem 4.9).

$$V_w = V_d - V_c \quad (4.9)$$

Kesitte kullanılan toplam etriye kesit alanı aşağıdaki ifade ile bulunabilir. Burada  $n$  etriye kol sayısını,  $\emptyset_w$  ise kesme donatısı çapını göstermektedir (Denklem 4.10).

$$A_{sw} = \frac{n\pi\emptyset_w^2}{4} \quad (4.10)$$

Etriye alanının belirlenmesinin ardından etriye adım mesafesinin belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.11) kullanılır. Burada  $f_{ywd}$  kesme donatısının tasarım akma dayanımını,  $d$  kesit faydalı yüksekliği göstermektedir.

$$s = \frac{A_{sw} f_{ywd} d}{V_w} \quad (4.11)$$

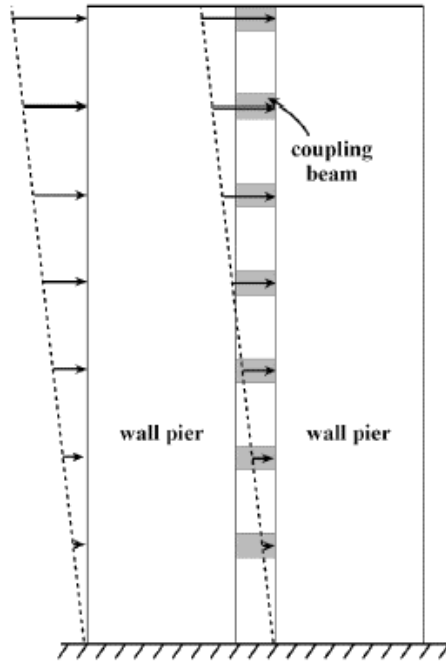
Etriye adım mesafesi için TS500'de aşağıdaki şartların sağlanması gerekmektedir (Denklem 4.12).



$$\begin{aligned}
 s &\leq d/4 \\
 s &\leq 8\phi_l \\
 s &\leq 150\text{mm}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

#### 4.4. Betonarme Bağ Kirişleri

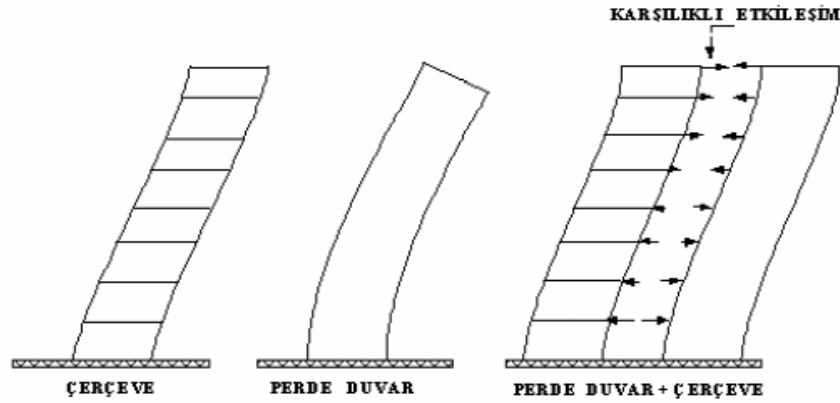
Orta ve yüksek katlı yapıların yatay yük direncini artırmak için genellikle betonarme perde duvarlar kullanılmaktadır. Şekil 4.11.'da iki adet düşey perde duvarı ve bunları kat seviyelerinde birbirine bağlayan betonarme kirişler görölmektedir. Bu kısa ve derin kirişler bağ kirişi olarak isimlendirilmektedir. Uygun bir şekilde tasarlanan boşluklu bağ kirişli betonarme perdeli yapılar yatay yük etkisi altında yüksek dayanım, rijitlik ve enerji sönümlenme gerçekleştirir. Ancak bu bağ kirişleri çevrimsel yük etkisi altında büyük kesme kuvvetleri ile karşı karşıya kalır [141].



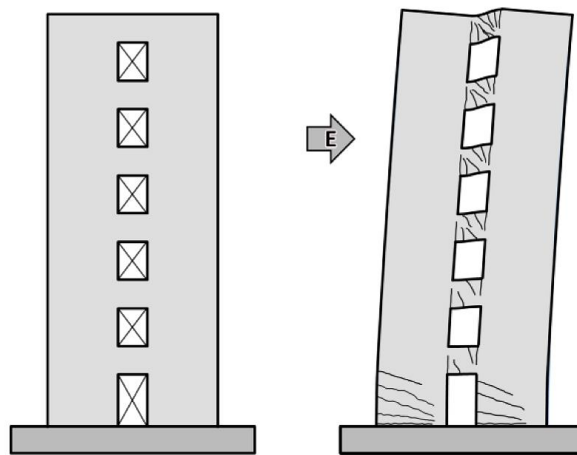
Şekil 4.11. Bağ kirişli perde duvarlı sistem [141]

Bağ kirişli boşluklu perde duvar sistemlerin kirişlerinde oluşan kesme ve eksenel kuvvete bağlı Şekil değiştirmeler, tüm sistemin yer değiştirmesinde önemli rol oynar. Yani, perde duvarlar arasında kesme ve eksenel kuvvet aktaran bağ kirişleri sistemin

konsol kiriş ile çerçeve arasında karma bir sistem gibi çalışmasını sağlar. Konsol ve çerçeve sistem davranışları birbirinden farklıdır. Bu sistem davranışları ayrı ayrı incelendiğinde, rijit çerçeve durumu için en büyük kesme kuvveti ve dönme sistemin tabanında oluşurken, perde duvar için en büyük dönme duvarın üst katında oluşur (Şekil 4.12.). Her ikisinde bulunduğu karma sistemlerde ise, sistemlerin farklı yerdeğiştirme özellikleri nedeni ile bina üst katlarında perdeler bağ kirişleri tarafından birbirlerine doğru çekilirken; bina alt kısmında bu durumun tersi oluşur. Bu nedenle yatay yükler, bina üst kısımlarında daha çok çerçeve, alt kısımlarında ise perde duvarlar tarafından karşılanır. Dolayısıyla üst katlardaki bağ kirişleri Şekil 4.13.'de olduğu gibi daha büyük kesme kuvvetlerine maruz kalır [142].

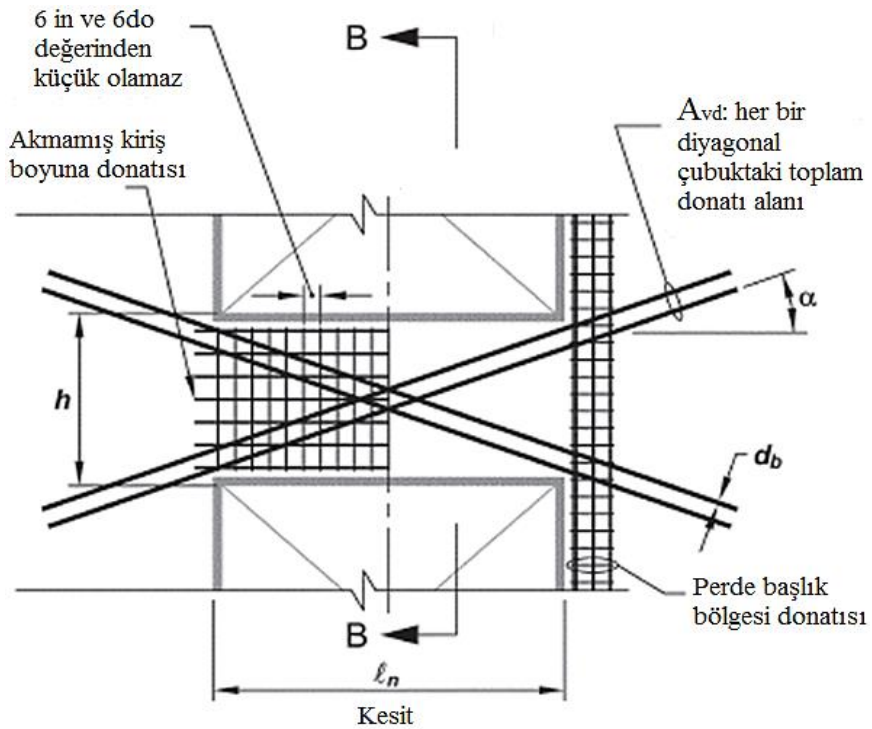


Şekil 4.12. Perde ve çerçeve duvar davranışı [142]



Şekil 4.13. Bağ kirişi hasar mekanizması [143]

Yapılarda birçok durumda geometrik nedenlerle derin bağ kirişleri oluşturulur. Derin bağ kirişleri deprem yükleri etkisi altında kesme, dayanım ve rijitlik açısından kontrol altına alınabilir. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar derin bağ kirişlerinde kullanılan diyagonal donatıların yeterli direnç sağladığını göstermektedir [98, 102]. Deneysel çalışmalar sonucunda diyagonal şekilde yerleştirilen donatıların oldukça etkili olduğu görülmekle birlikte kirişler için net açıklığın kiriş yüksekliğine oranı  $l_n/h < 4$  olması sınırı getirilmiştir. Diyagonal çubuk demetleri betonarme kiriş kesiti içerisinde simetrik olarak yerleştirilmelidir. Böylece diyagonal çubuk demetleri aracılığı ile kirişin kesme ve moment kapasitesi için gerekli dayanım sağlanmış olmaktadır. Her bir diyagonal çubuk demetinin Şekil 4.14.'de görüldüğü gibi enine ve boyuna donatılar içermesi gerekmektedir. Her bir demette en az 4 adet boyuna donatı bulunmalıdır [141].



Şekil 4.14. Diyagonal donatılı betonarme bağ kirişi [141]

Diyagonal donatılı betonarme kirişin kesme dayanımı aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.13) ile belirlenir.

$$V_n = 2A_{vd}f_y \sin \alpha \leq 0,83\sqrt{f'_c}A_{cw} \quad (4.13)$$

Burada;

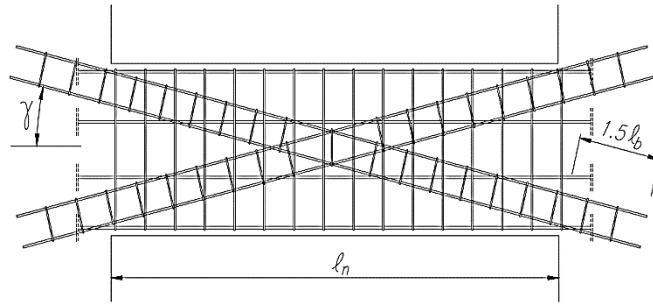
$A_{vd}$ : her bir donatı demetindeki toplam donatı alanı

$f_y$ : diyagonal donatı akma dayanımı

$\alpha$ : diyagonal donatı açısı

$f'_c$ : beton basınç dayanımı

TDY2007’de perdeler arasında bulunan bağ kirişlerinin kesme donatısına ilişkin kurallar verilmiştir.  $l_n > 3h_k$  ve  $V_d \leq 1,5f_{ctd}b_wd$  şartlarından herhangi birinin sağlanması durumunda kesme donatısı hesabı TS500 ve TDY2007’ye göre yapılacaktır. Her iki koşulunda sağlanamaması durumunda bağ kirişlerine konulacak olan kesme donatıları, uygulanabilirliği deneylerle kanıtlanmış yöntemlerle belirlenecek veya bağ kirişindeki kesme kuvvetini ve bu nedenle oluşan eğilme momentini karşılamak üzere diyagonal donatılar kullanılacaktır (Şekil 4.15.).



Şekil 4.15. Bağ kirişlerinde kullanılan özel donatı demeti [144]

Her bir diyagonal donatı demetindeki toplam donatı alanı aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.14) ile belirlenir.

$$S_d = \frac{V_d}{2f_{yd} \sin \gamma} \quad (4.14)$$

Diyagonal donatı demetlerinde en az dört adet donatının bulunması ve bu donatıların perdelerin içine doğru en az  $1,5l_b$  kadar uzatılması gerekmektedir. Donatı demetlerinde kullanılacak etriye çapı en az 8mm ve adım mesafesi ise diyagonal donatı demetindeki donatı çapının 8 katından ve 100mm’den daha fazla olmayacaktır. Ayrıca

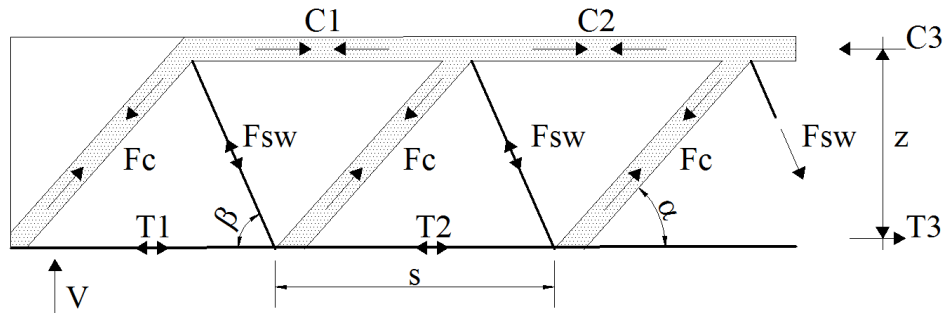
TS500’de öngörülen minimum miktarda etriye ve yatay donatı yerleştirilmesi gerekmektedir.

#### 4.5. Kesme Donatılı Kirişler İçin Davranış Modelleri

Betonarme yapı elemanlarında kesme kuvveti genellikle betonun karşılayabileceği değerden daha büyük bir şekilde ortaya çıkar. Bu durumda kesme kuvvetinden oluşan eğik çekme gerilmelerinin donatılarla karşılanması gerekmektedir. Kesme donatılarının eğik çekme gerilmeleri yörüngesine yerleştirilmesi en uygun çözüm olsa da pratik değildir. Bu yörüngeler yükleme durumuna göre değişebilir. En çok bilinen kesme donatıları boyuna donatıya dik bir şekilde yerleştirilen enine donatılardır. Enine donatılar kiriş eksenine dik olmayıp farklı eğimlerle yerleştirilebilirken bunların yanı sıra hasır donatılar da kesme donatısı olarak kullanılabilir [140]. Kesme kuvveti etkisi ile oluşan basınç ve çekme gerilme değerleri farklı yöntem ve modeller kullanılarak belirlenebilir. Bu kısımda kesme donatılı kirişler için geliştirilmiş davranış modelleri hakkında bilgiler verilmektedir.

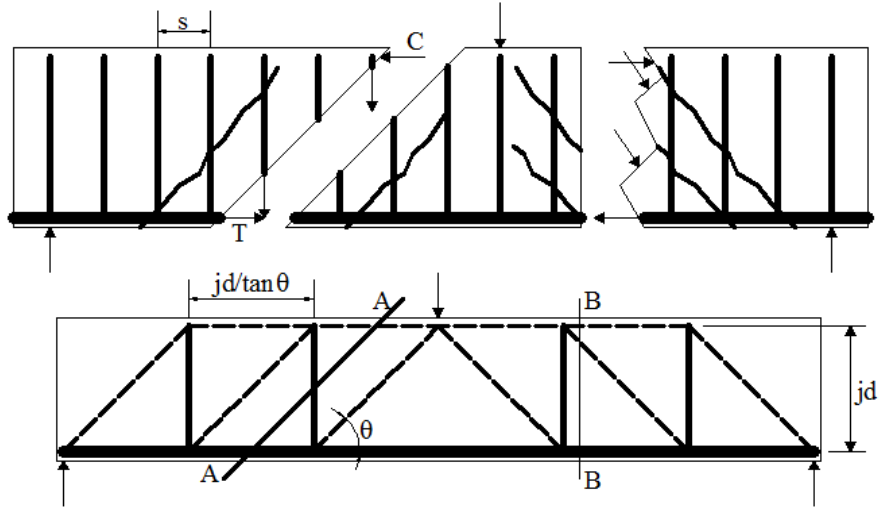
##### 4.5.1. Klasik kafes kiriş modeli (Ritter-Mörsch modeli)

Betonarme kirişler için kesme kuvveti altındaki davranışın, kayma gerilmeleri yerine asal basınç ve çekme gerilmeleri dikkate alınarak açıklanması daha uygun olmaktadır. Bu kavrama dayanan Ritter-Mörsch tarafından ortaya atılan klasik kafes kiriş modeli basınç gerilmelerinin beton çubuklar ve çekme gerilmelerinin de donatılar tarafından karşılandığı esasına dayanır. Kesme donatısı hesabında kullanılan klasik Ritter-Mörsch kafes kiriş modeli Şekil 4.16.’de verilmiştir.



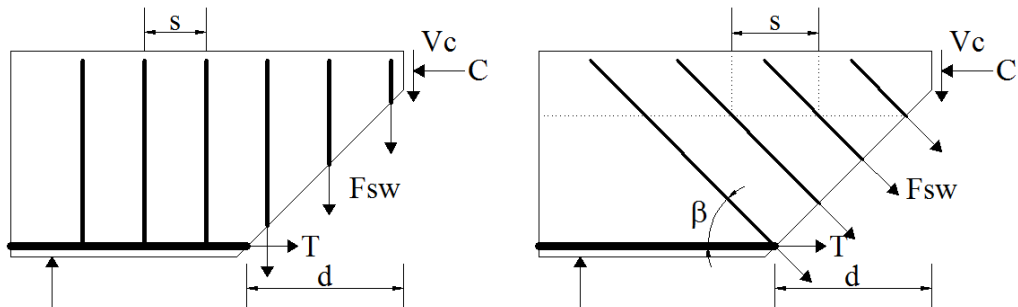
Şekil 4.16. Klasik kafes kiriş modeli [134]

Betonarme kiriş eğilme momentinin alacağı işarete göre basınç ve çekme gerilmelerini taşıyan kafes kirişe benzetilir. Kiriş gövdesindeki basınç köşegenleri  $45^\circ$  eğimli beton çubuklardan oluşur. Şekil 4.17.'de donatı kalın çizgilerle, basınca çalışan beton çubuklar ise kesik çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Betonarme kirişte kafes sistem benzeşimi [134]

Şekil 4.18.'de beton basınç çubuklarına dik ve eğik etriyeler ile betonarme bir kirişte oluşan kesme kuvvetinin karşılanmasında ortaya çıkan iç kuvvetler gösterilmiştir. Burada  $s$  düz ve eğik donatı adım mesafesini,  $\beta$  eğik donatıların eğimi ve  $\alpha$  eğik beton basınç kuvvetlerinin eğimini göstermektedir.



Şekil 4.18. Düşey ve eğik etriye [134]

Kesme kuvvetinin eğik donatılar tarafından karşılanması durumunda düşey denge aşağıdaki eşitlikte (Denklemler 4.15) olduğu gibi yazılır.

$$V_w = F_{cw} \sin \alpha = F_{sw} \sin \beta \quad (4.15)$$

Burada,  $F_{cw}$  beton basınç çubuğundaki basınç kuvvetinin bileşkesini,  $F_{sw}$  ise eğik çatlağı kesen donatıdaki çekme kuvvetinin bileşkesini göstermektedir.

Geometri kullanılarak eğik donatıların kiriş eksenine boyunca adım mesafesi  $s$  aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.16) ile bulunur.

$$s = jd(\cot \alpha + \cot \beta) \quad (4.16)$$

Yukarıdaki eşitlikler (Denklem 4.15 ve Denklem 4.16) birleştirilirse (Denklem 4.17 ve Denklem 4.18) elde edilir.

$$V_w = F_{sw} \frac{jd}{s} \sin \beta (\cot \alpha + \cot \beta) \quad (4.17)$$

$$V_w = A_{sw} \sigma_{sw} \frac{jd}{s} \sin \beta (\cot \alpha + \cot \beta) \quad (4.18)$$

Beton basınç çubuklarının eğimi  $45^\circ$  kabul edilmesine rağmen yapılan deneyler bu eğimin değişken olduğu göstermiştir. Enerji ilkeleri doğrultusunda beton basınç çubuklarının eğiminin yaklaşık  $38^\circ$  olduğu belirlenmiştir. Beton basınç çubuğunun dolayısıyla çekme çatlağının eğiminin azalması, çatlak tarafından kesilen donatı sayısını artıracak ve böylece belirli bir kesme kuvveti daha çok sayıda eğik donatı ile karşılanabilecektir. Tekil yüklerin bulunduğu bölgelerde basınç çubukları dikleşmesine rağmen kemerlenme etkisi ortaya çıktığı için kesitin kesme kuvveti kapasitesi artar. Yapılan hesaplar sonucunda beton basınç çubuklarının eğimi  $38^\circ$  olarak belirlenmesine rağmen beton basınç dayanımının küçük olduğu kirişlerde kesme kuvvetinin daha çok donatılar tarafından karşılanacağı dikkate alınarak güvenli tarafta kalmak amacıyla  $\alpha = 45^\circ$  kabul edilir.

Kesme donatısının kiriş eksenine dik ( $\beta = 90^\circ$ ) olması ve  $jxd \approx d$  olarak dikkate alınması durumunda kesme kuvveti ve donatı alanı aşağıdaki eşitlikler (Denklem 4.19 ve Denklem 4.20) ile belirlenir.

$$V_w = \frac{d}{s} A_{sw} \sigma_{sw} \quad (4.19)$$

$$A_{sw} = \frac{s}{d} \frac{V_w}{\sigma_{sw}} \quad (4.20)$$

Kesme donatısının kiriş eksenine  $45^\circ$ 'lik açı yapması ( $\beta = 45^\circ$ ) ve  $jd \approx d$  olarak dikkate alınması durumunda kesme kuvveti ve donatı alanı sırası ile aşağıdaki eşitlikler (Denklem 4.21 ve Denklem 4.22) ile belirlenir.

$$V_w = 1,41 \frac{d}{s} A_{sw} \sigma_{sw} \quad (4.21)$$

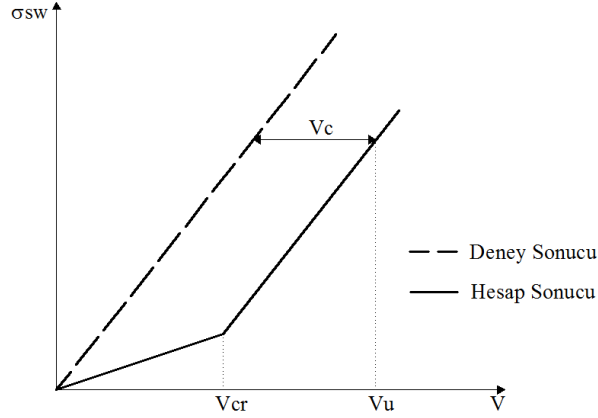
$$A_{sw} = \frac{1}{1,41} \frac{s}{d} \frac{V_w}{\sigma_{sw}} \quad (4.22)$$

Kesme kuvvetinin karşılanmasında farklı eğimli etriyelerin kullanılması durumunda yukarıdaki denklemler basitleştirilerek kullanılabilir. Burada verilen tüm ifadelerde kesme donatılarının akma gerilmesine ulaşmadığı kabul edilmektedir. Görüldüğü gibi beton basınç çubuklarının  $45^\circ$  kabul edilmesi durumunda; kesme donatılarının eğiminin  $90^\circ$  yerine  $45^\circ$  olarak hesaplanmasında aynı oranda kesme donatısı ile 1,41 kat daha fazla kesme kuvveti karşılanabilmektedir. Aynı şekilde belirli bir kesme kuvveti değeri 1,41 kat daha az kesme donatısı kullanılarak da karşılanabilir [134, 140].

Literatürde yapılan deneyler sonucunda klasik kafes kiriş analogisine göre hesaplanan kesme donatısının %50'sine sahip kirişlerin dahi sünek davranış göstererek eğilme kapasitelerine ulaştıkları belirlenmiştir. Bu deneyler sonucunda klasik kafes kiriş analogisi bazı durumlarda oldukça güvenli tarafta kalmakta ve bu durumda ekonomik



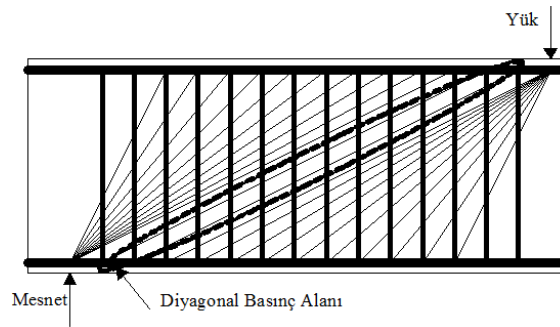
olmamaktadır. Yapılan deneyler ve hesaplar arasındaki fark Şekil 4.19.'da sunulmuştur [134].



Şekil 4.19. Etriyelerdeki gerilmelerin değişimi [134]

#### 4.5.2. Plastik kafes kiriş analojisi

Bölüm 4.5.1.'de klasik kafes kiriş modelinde anlatıldığı gibi kiriş eksenini boyunca yerleştirilen kesme donatıları tek bir çekme çubuğu ile ve düşey kesitteki birden fazla basınç çubuğu ise tek bir basınç çubuğu ile simgelenmiştir. Klasik kafes kiriş analojisinden farklı olarak bu modelde tüm kesme donatılarının akma konumuna ulaştığı kabul edilmektedir. Böylece sistem izostatik hale getirilmiştir. Diğer bir fark ise klasik kafes kiriş analojisinde basınç çubuklarının eğimi  $45^\circ$  iken, plastik kafes kiriş analojisinde değişken olduğu kabul edilmektedir.

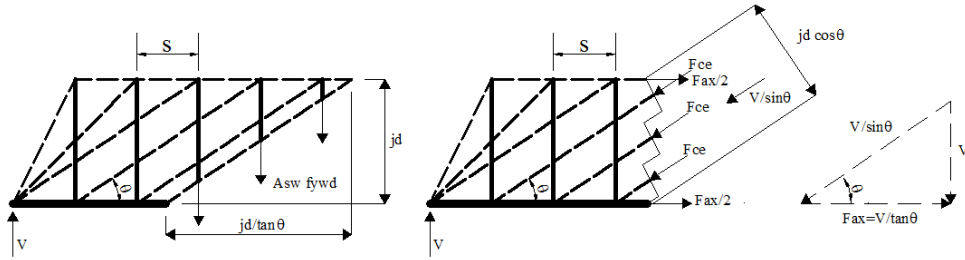


Şekil 4.20. Plastik kafes kiriş modeli [134]

Bu yaklaşımda, Şekil 4.20.'de gösterildiği gibi uygulanan yükleri taşıyabilecek kadar kesme donatısı belirlenmekte ve yükün uygulandığı nokta ile belirlenen kesme

donatılarının uçlarına doğru yelpaze biçiminde basınç çubukları oluşturulmaktadır. Şekilde çekme çubukları düz, basınç çubukları ise kesik çizgilerle gösterilmiştir. Oluşturulan eğik basınç ve çekme çubuklarında meydana gelen kuvvetler düğüm noktalarında denge denklemleri yazılarak hesaplanabilir.

Yelpazeler dışında kalan basınç çubuklarının eğimi genellikle  $25^\circ$  ile  $65^\circ$  arasında olduğu varsayılmaktadır. Kesme kuvvetinin tamamı kesme donatıları ve beton basınç çubukları tarafından taşındığı ve taşıma gücüne aynı anda ulaştığı varsayılmaktadır. Basınç çubuklarının yelpaze içinde kalan kısmı süreksiz bölge, yelpazeler arasında kalan bölge ise basınç alanı olarak isimlendirilmektedir (Şekil 4.20.).



Şekil 4.21. Plastik kafes kiriş analogisinde iç kuvvetler [134]

Şekil 4.21.'de gösterildiği gibi mesnete yakın bölgelerde,  $jxd = z$  alınarak kiriş eksenini  $\theta$  açısı yapan bir düzlem alındığında düşey doğrultuda denge aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.23) kullanılarak yazılır.

$$V = \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \left( \frac{z}{\tan \theta} \right) \quad (4.23)$$

Eğik basınç çubuklarında oluşan toplam kuvvet aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.24) ile belirlenir.

$$\sum F_{ce} = \frac{V}{\sin \theta} \quad (4.24)$$

Eğik basınç çubuklarında oluşan ortalama basınç gerilmesi ise aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.25) ile belirlenir.

$$\sigma_2 = \frac{\sum F_{ce}}{z \cos \theta b_w} = \frac{V}{z \cos \theta b_w \sin \theta} \quad (4.25)$$

Çatakların oluştuğu ve çekme etkisine maruz bir basınç çubuğunun dayanımı, basınç etkisi altındaki bir çubuktan daha düşük olacaktır. TS500'de çatlamış kesit beton dayanımı için  $\theta = 30^\circ$  için  $f_{c2} = 0,35f_{cd}$ ,  $\theta = 45^\circ$  için  $f_{c2} = 0,60f_{cd}$  alınmasının uygun olacağı belirtilmektedir [141].

$\sum F_{ce}$ 'nin yatay bileşkesini dengelemek için kesitte  $\sum F_{ax}$  adı verilen çekme kuvvetleri oluşmakta ve çekme kuvvetinin yarısı kafes kirişin alt diğer yarısı üst başlığına etkimektedir. Etkiyen çekme kuvveti aşağıdaki eşitlik (Denklem 4.26) ile hesaplanır.

$$F_{ax} = \sum F_{ce} \cos \theta = \frac{V}{\sin \theta} \cos \theta = \frac{V}{\tan \theta} \quad (4.26)$$

Şekil 4.21.'de görüldüğü gibi hesaplanan çekme kuvveti üst başlıkta basınç kuvvetini azaltırken, alt başlıkta çekme kuvvetini artırmaktadır.  $\theta$ 'nın değişmesiyle yelpazenin bulunduğu bölgede  $F_{ax}$ 'de değişecektir. Dolayısıyla oluşan eksenel kuvvet nedeniyle hesaplanan kuvvet de değişecektir [134].

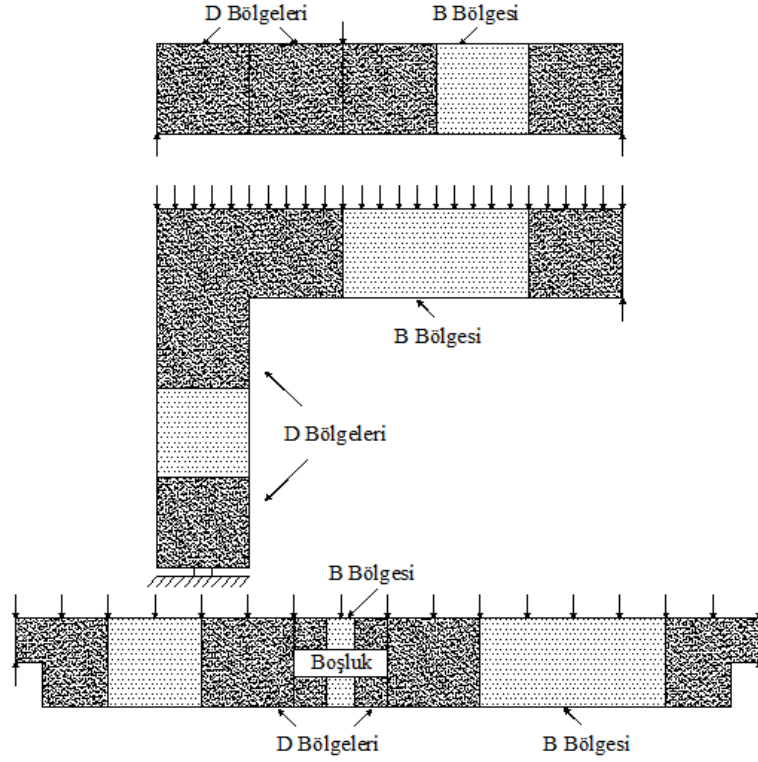
#### 4.5.3. Çubuk analogisi yöntemi (Strut and Tie model)

Çubuk analogisi yöntemi (Strut and Tie Model) 1987'de Schlaich ve ark. [145], tarafından önerilmiş ve ayrıca 1991'de Collins ve Mitchell [146], 2000'de Macgregor ve Bartlett [138], tarafından ders kitaplarına eklenmiştir. Çubuk sistemli modellerin ilki olarak kafes kiriş analogisi (Ritter-Mörsch) kabul edilir. Bu yöntemlerde basınç gerilmeleri basınç çubukları ile çekme gerilmeleri ise donatı yerleştirilmesiyle idealize edilmektedir. Çubuk sistemlerin avantajı hem eğilme hemde kesme dayanımlarının belirlenebilmesidir [134].

Çubuk analogisi yöntemi, iç gerilmelerin bir kafes sistem aracılığı ile yapıya dağıtıldığı analiz ve tasarım yöntemidir. Yöntemdeki düğüm noktaları, basınç ve çekme çubukları

ile birleştirilerek kafes sistem elemanları gibi düşünülmektedir. Bu kafes sistem, kesme ve eğilme momentinden kaynaklanan gerilmelerin belirlenmesi ve dağıtılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu yöntem, kolon kiriş birleşim bölgesi, yüksek kirişler, kısa kirişler, kısa konsollar, mesnet üzerine oturan kiriş bölgeleri gibi her bir durum için ayrı hesap detayları gerektiren yapı ve yapı elemanlarının tasarımında boyutlandırılmasında etkili bir şekilde kullanılan bir yöntemdir [147].

Yapı elemanları, kiriş teorisinin uygulanabildiği gerilmelerin lineer olduğu yani süreksizliğin olmadığı “B bölgeleri” ve kiriş teorisinin uygulanamadığı süreksizlik bölgesi olarak adlandırılan “D bölgeleri” şeklinde parçalara ayrılabilir. D bölgeleri, boşluk, kesit değişimi, doğrultu, yük ve mesnetlere yakın bölgeler olarak tanımlanır. B bölgelerinde gerilmelerin düzgün yayılı olduğu varsayılmaktadır. Gerilmelerin ve kuvvet dağılımının düzgün olduğu B bölgelerinde St. Venant prensibi geçerlidir. St. Venant ilkesi, bir sınıra uygulanan yükten makul bir uzaklıkta bulunan gerilmelerin, bu yükün statik eşdeğer bir yüke dönüşmesi halinde önemli oranda değişim göstermeyeceğini savunur. Gerilme dağılımı yalnızca yükün uygulandığı noktanın yakınındaki bölgelerde değişim gösterir. Başka bir ifade ile küçük bir alan boyunca uygulanan statik eşdeğer iki yükleme etkisi ile oluşan gerilmeler, yalnızca yüklemelerin uygulandığı alan civarında önemli derecede farklı değerlere ulaşır. Yüklemelerin uygulandığı alanın lineer boyutlarıyla kıyaslama yapıldığında, büyük mesafelerde, bu iki yükleme nedeniyle meydana gelen etkiler aynıdır. Şekil 4.22.’de B ve D bölgeleri gösterilmiştir [148, 149].



Şekil 4.22. B ve D bölgeleri [148]

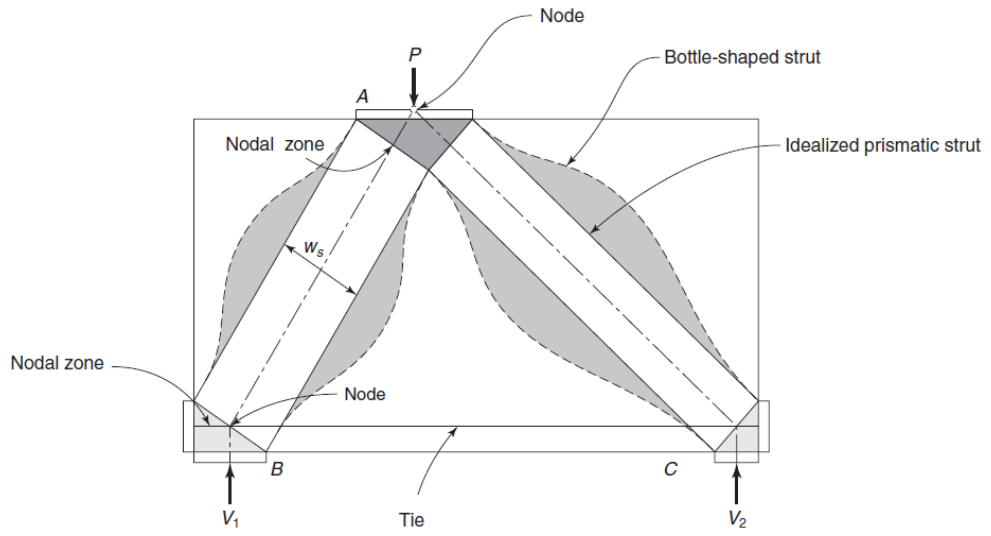
D bölgelerinin çatlama öncesinde doğrusal elastik davrandığı ve bu bölgedeki gerilmelerin hesabı için sonlu elemanlar hesaplarının gerçekçi sonuçlar verdiği kabul edilmektedir. Çatlak oluşumundan sonra ise D bölgeleri için çubuk analogi modelleri gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Çubuk analogisinde çubukların birleştiği bölgeler “düğüm bölgeleri” olarak adlandırılmaktadır. Yapılan hesaplar sırasında düğüm bölgelerinin dayanımları da dikkate alınmalıdır. Çubuk analogisi ile yapılan hesaplamalarda eleman taşıma gücüne;

1. Basınç çubuklarının ezilmesi
2. Düğüm bölgelerinin kırılması
3. Çekme çubuklarının akması (Sünek)

olmak üzere üç ayrı biçimde ulaşabilir. Bunlar içerisinde tercih edilen kırılma türü sünek olması nedeniyle çekme çubuklarının akması şeklinde olmaktadır. Yapılacak çözümlelerde öncelikle B ve D bölgelerinin tanımlanması gerekir. D bölgeleri, süreksizlik noktalarının (yük, mesnet, boşluk vb.) her iki tarafında faydalı yükseklik kadar kabul edilir (Şekil 4.22.). Belirlenen D bölgeleri elastisite teorisi kullanılarak

hesaplanabilir. Boyutları, yükleme durumu ve mesnetlenme biçimi nedeniyle bir kirişin tümü D bölgesi olarak alınabilir [134].

Şekil 4.23.'de derin bir kirişe ait strut and tie model görülmektedir. Burada basınç gerilmeleri için iki adet beton basınç çubuğu, çekme gerilmeleri için boyuna donatı, çekme ve basınç çubuklarının birleşim noktaları için de düğüm bölgeleri tanımlanmıştır. Düğüm bölgeleri aracılığı ile yükler, basınç ve çekme çubukları ile mesnetlere aktarılır [148].



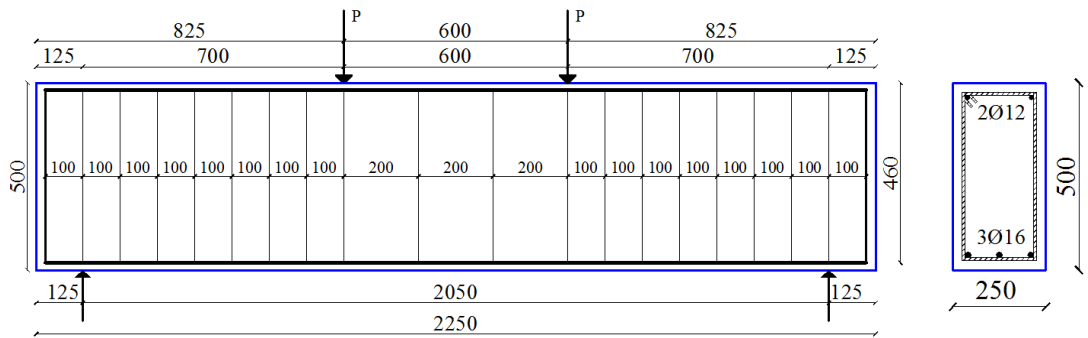
Şekil 4.23. Strut and tie model [148]

## BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımının iyileştirilmesine yönelik yeni, basit ve etkin bir uygulama olarak “çapraz kesme donatısı” önerilmektedir. Bu bölümde, önerilen çapraz kesme donatıları kullanılarak hazırlanmış olan deney numunelerinin malzeme özellikleri, deney numunelerin üretilmesi, deney düzeneği, kullanılan alet ve teçhizatlar ve yükleme yöntemi hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

### 5.1. Deneylerde Kullanılan Numuneler

Deney numuneleri ikisi referans olmak üzere toplam 19 adet betonarme kısa kirişten oluşmaktadır. Deney numunelerinin tamamında; kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı ( $a/d$ ) 1,50, kiriş boyutları 250x500x2250mm, paspayı 25mm, montaj donatısı 2Ø12, boyuna donatı 3Ø16, etriye ve çapraz donatı çapı Ø8 olarak seçilmiştir (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1. TDY2007 referans deney numunesi ve kesiti (Ölçüler mm)

Numunelerin isimlendirilmesinde TDY2007 tarafından önerilen referans numuneler için “R”, çapraz kesme donatısı bulunmayan numuneler için ‘S’ ve çapraz kesme donatısı bulunan numuneler için ‘SX’ simgesi kullanılmıştır. Numunelerin isimlerinde

kullanılan rakamlar etriye ve çapraz kesme donatı adım mesafesini göstermektedir. Referans test numunesinde çapraz kesme donatısı bulunmayıp etriye adım mesafesi 100mm olarak belirlenmiştir. Çapraz kesme donatısı eklenen ve eklenmeyen diğer numunelerin etriye adım mesafeleri 200, 400 ve 800mm şeklindedir. Çapraz kesme donatısının bulunduğu numunelerde çapraz kesme donatı açıları sırasıyla 65,30°, 47,30° ve 28,50° değerlerine karşılık gelmektedir. Deney düzeneği oluşturulurken iki farklı mesnet tipi kullanılmış olup ilkinde basit mesnetli sistem diğerinde ise her ikisi de sabit mesnetli olan 1. dereceden hiperstatik sistem kullanılmıştır. Deney numuneleri 3 farklı seri şeklinde sınıflandırılmıştır. Seri-1 deney numuneleri basit mesnetli olup Seri-2 deney numuneleri ise 1. dereceden hiperstatik olarak mesnetlenmiştir. Seri 1 ve Seri-2’de 7’şer adet deney numunesi bulunmaktadır (Tablo 5.1.). Seri-3 numunelerinin mesnetlenme şartı Seri-2 ile aynı olup enine donatı-çapraz kesme donatısı konfigürasyonu farklıdır. Seri-3’de 5 adet deney numunesi bulunmaktadır (Tablo 5.2.).

Tablo 5.1. Seri-1 ve Seri-2 deney matrisi

Numune Adı	Numune	Numune Adı	Numune
R100 (Referans) (s=100)		S200 (s=200)	
S400 (s=100)		S800 (s=800)	
SX200 (s=200)		SX400 (s=400)	
SX800 (s=800)			



Tablo 5.2. Seri-3 deney matrisi

Numune Adı	Numune	Numune Adı	Numune
S100X200 (s=100)			
S100X400 (s=100)		S200X400 (s=200)	
S100X800 (s=100)		S200X800 (s=200)	

## 5.2. Deney Numunelerin Hazırlanması

Betonarme kirişlerin üretimi için öncelikle kalıpların hazırlanmasının ardından (Şekil 5.2.) tasarıma uygun olarak hazırlanan donatılar kalıplara yerleştirilmiş ve son olarak beton dökülmüştür (Şekil 5.3., Şekil 5.4.). Dökülen taze beton vibratör yardımıyla kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 5.5.). Beton dökümü esnasında her seri için 6 adet küp numune alınmış ve laboratuvar şartlarında kür odasında bekletilmiştir (Şekil 5.6.). Prizini alması için beklenen deney numuneleri ve küp numuneler kalıplardan çıkarılmış ve 28 gün boyunca kür uygulanmıştır (Şekil 5.7.).



Şekil 5.2. Kalıpların hazırlanması



Şekil 5.3. Donatıların hazırlanması



Şekil 5.4. Donatıların kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 5.5. Beton dökülmesi



Şekil 5.6. Küp numune alımı



Şekil 5.7. Hazırlanmış deney numuneleri

### 5.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Deney numunelerinde kullanılan beton ve donatıların mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında deney numunelerinin üretilmesinde kullanılan beton, laboratuvar şartlarında üretilmemiş olup hazır beton santralinden temin edilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan betondan küp numüneler

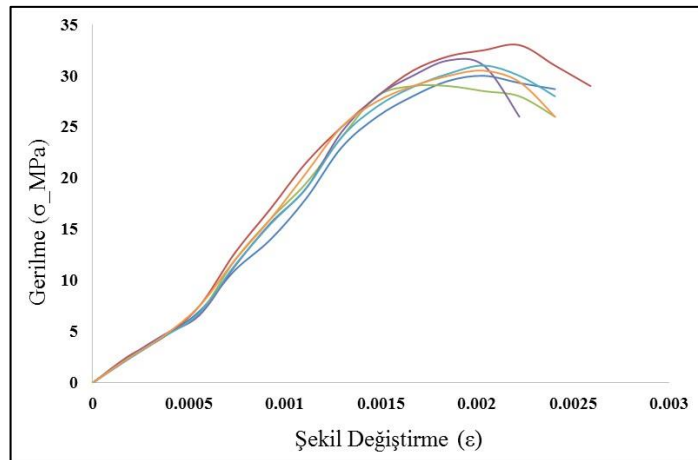
donatıdan ise örnekler alınarak standartlara uygun olarak laboratuvar deneyleri yapılmış ve malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir [150-152].

### 5.3.1. Beton

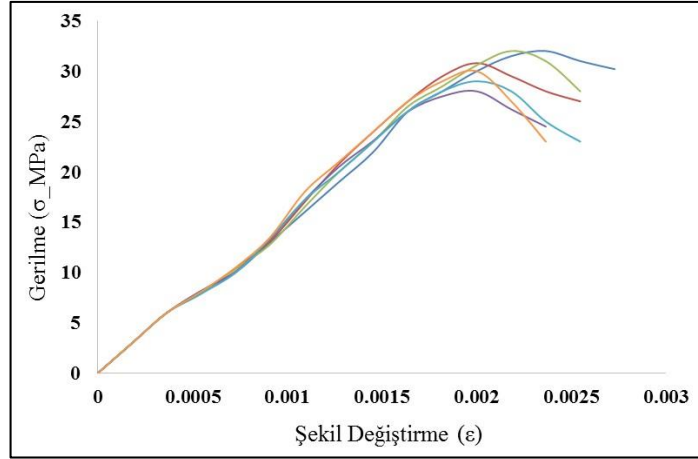
Standartlara uygun olarak her parti betondan 150x150x150mm boyutlarında alınan küp numuneler uygun şartlarda 28 gün bekletildikten sonra test edilmiştir (Şekil 5.8.). Çalışmada kullanılan betondan alınan küp numuneler üzerine yapılan beton basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 5.9.-Şekil 5.11. ve Tablo 5.3.'de verilmiştir [150, 151]. Betonun üretiminde kullanılan agreganın maksimum çapı  $d_{max} = 22,4mm$  olarak belirlenmiştir.



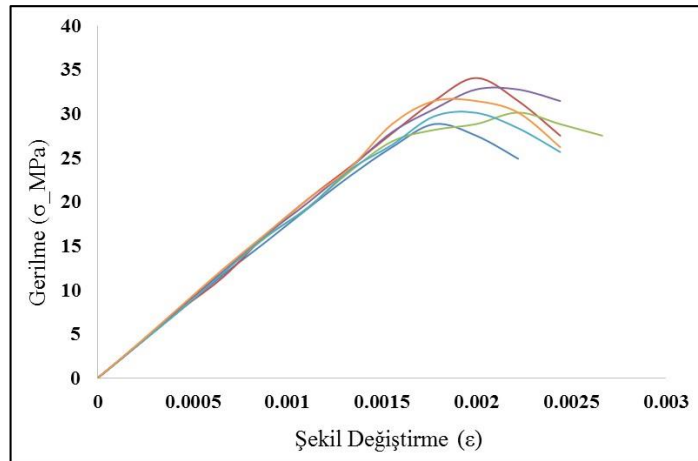
Şekil 5.8. Beton basınç deneyleri



Şekil 5.9. Seri-1 beton basınç dayanımı deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi



Şekil 5.10. Seri-2 beton basınç dayanımı deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi



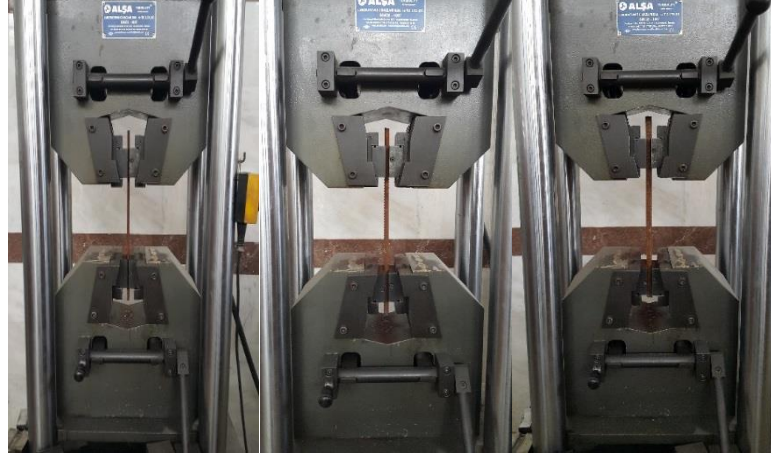
Şekil 5.11. Seri-3 beton basınç dayanımı deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi

Tablo 5.3. Beton basınç dayanımı

Seri	Beton Basınç Dayanımı MPa
Seri-1	30,83
Seri-2	30,30
Seri-3	31.22

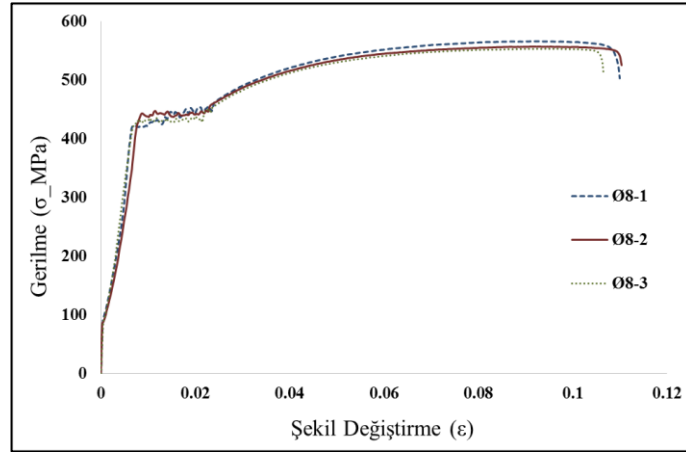
### 5.3.2. Donatı

Deney numunelerinden alınan donatı örnekleri laboratuvar ortamında standartta uygun olarak donatı çekme cihazında test edilmiştir (Şekil 5.12.). Deneylelerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.13.-Şekil 5.15. ve Tablo 5.4.'de verilmiştir [152].

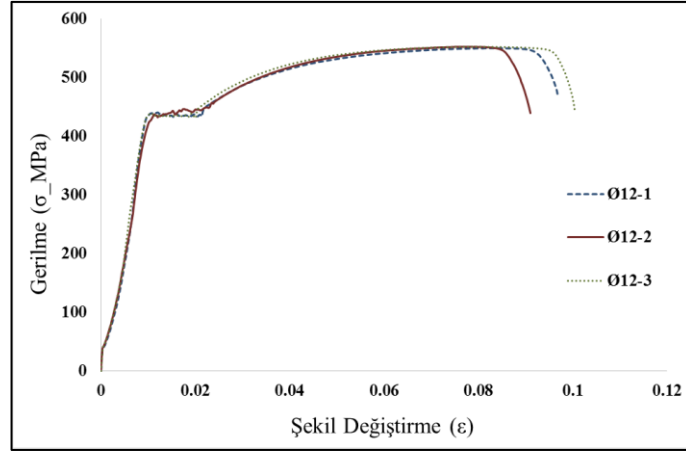
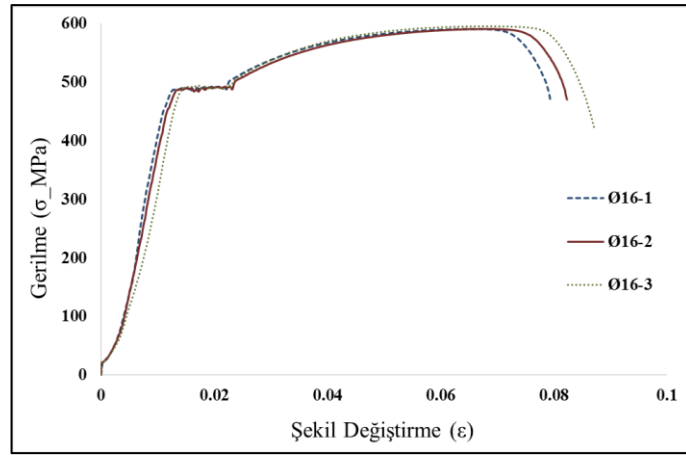


Şekil 5.12. Donatı çekme deneyleri

Donatı çekme deneyleri sonucunda eğilme ( $\text{Ø}16$ ), montaj ( $\text{Ø}12$ ), ile etriye ve çapraz ( $\text{Ø}8$ ) donatılar için akma dayanımları sırası ile 485MPa, 435MPa ve 420MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.13. Ø8 donatı çubuğu çekme deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi

Şekil 5.14. Ø12 donatı çubuğu çekme deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisiŞekil 5.15. Ø16 donatı çubuğu çekme deneyi  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi

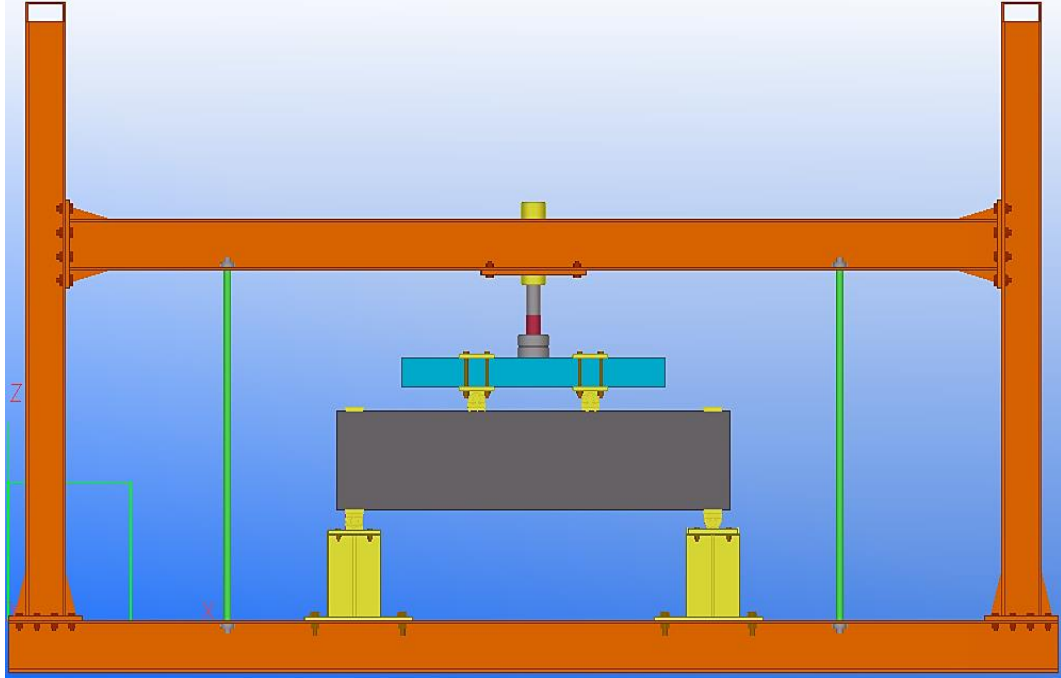
Tablo 5.4. Donatı akma dayanımı

Donatı Çapı	Akma Dayanımı MPa
Ø8	420
Ø12	435
Ø16	485

#### 5.4. Deney Düzeneginin Hazırlanması

Üretilen betonarme kısa kirişler Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan kiriş yükleme çerçevesi yardımıyla dört nokta yükleme deneyi ile test edilmiştir (Şekil 5.16.). Kirişler çerçeve içerisinde mesnetler üzerine

yerleştirilmiş ve yükleme esnasında kirişlerin mesnetler üzerinden kayarak ayrılmaması için sabitleme bağlantıları yapılmıştır.



Şekil 5.16. Deney düzeneği

Deney elemanlarının testleri monotonik artan yükler altında ve yer değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır. 1000kN kapasiteli ve otomatik hidrolik kontrol ünitesine bağlı hidrolik yük veren tarafından yük uygulanmış ve yüklemeye sıfırdan başlayarak deney numunelerinin göçmesine kadar devam edilmiştir. Deney esnasında uygulanan yük, yük hücresi (loadcell) aracılığı ile ölçülmüş ve gözlemlenen ilk eğilme ve kesme çatlakların olduğu anlardaki yük değerleri kaydedilmiştir. Deney numunelerinin düşey yer değiştirme değerleri kiriş altına (1 adet orta ve 2 adet yükleme noktası olmak üzere) yerleştirilen analog yer değiştirme ölçerler (potansiyometre) aracılığı ile belirlenmiştir. Kullanılan analog yer değiştirme ölçerler numunenin hareketinden etkilenmemesi için deney düzeneğinden bağımsız bir platform üzerine mesnetlenmiştir.



### 5.5. Kullanılan Alet ve Teçhizatlar

Deneyle yapılrken kuvvet, yer değiştirme ve Şekil değiştirme verileri iki farklı ölçüm aleti ile belirlenmiştir. Bu aletler; yük hücresi (loadcell), analog yer değiştirme ölçerler (potansiyometre)'dir. Yapılan deneylerde 3 adet analog yer değiştirme ölçer kullanılmıştır (Şekil 5.17.). Bu aletlerin her birinden alınan veriler datalogger tarafından kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.17. Loadcell, analog ve dijital yer değiştirme ölçerler

Test numunelerine uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve değişimi düşey doğrultuda yük hücresi (loadcell) aracılığı ile ölçülmüştür. Deney numunelerinde oluşan düşey doğrultudaki yer değiştirmeler analog yer değiştirme ölçerler ile belirlenmiştir.

### 5.6. Yükleme Yöntemi

Deney numuneleri deney düzeneğine yerleştirildikten ve ölçüm için gerekli cihazların bağlantısı yapıldıktan sonra numuneler 0,5 kN/s yükleme hızı ile test edilmiştir. 1000kN kapasiteli hidrolik yük veren aracılığı ile düşey doğrultuda tek noktadan uygulanan yük, yük dağıtma kirişi yardımıyla iki noktalı yük haline dönüştürülmüş ve deney numunelerinin göçmesine kadar yüklemeye yer değiştirme kontrollü olarak devam edilmiştir. Ölçüm cihazları yardımıyla elde edilen veriler bilgisayar yazılımı aracılığı ile 500ms (1/2sn) aralıklarla kayda alınmış ve gerçek zamanlı olarak yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir.

## **BÖLÜM 6. NÜMERİK MODELLEME**

Nümerik çalışma kısmında, sonlu elemanlar metoduna dayalı olarak çalışan ABAQUS [153], programı kullanılarak betonarme kısa kirişlerin 3 boyutlu modelleri oluşturulmuştur. Bu bölümde, sonlu elemanlar metodu, ABAQUS sonlu elemanlar programı, beton ve donatı için malzeme modelleri hakkında detaylı bilgiler verilmektedir.

### **6.1. Sonlu Elemanlar Metodu**

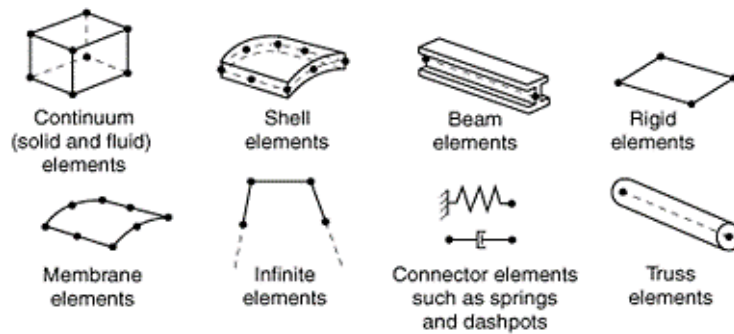
Sonlu elemanlar metodu (SEM) veya sonlu elemanlar analizi (SEA) mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan güçlü ve çağdaş bir sayısal hesaplama metodudur. Bu metod, gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, statik ve dinamik elastisite ve plastisite problemleri, darbe analizleri, sismik deprem analizleri ve yorulma analizi gibi mühendisliğin hemen hemen her dalındaki problemlere uygulanabilmektedir [154, 155].

SEM ilk olarak 1943 yılında Courant [156], tarafından Ritz metodunun titreşim sistemlerine uygulanması ile başlamıştır. Yöntemin betonarmeye ilk uygulanışı 1967 yılında Ngo ve Scordelis [157], tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma daha sonra Ngo, Scordelis ve Franklin [158], tarafından geliştirilmiştir. Nilson tarafından beton ve donatı arasında oluşan çatlak ve geometrik durumun tanımlanması üzerine çalışma yapılmıştır [159]. SEM'in betonarme yapılara uygulanmasıyla ilgili olarak statik yüklemeler ile ilgili ilk çalışmalar 1980'ler de gerçekleştirilmiştir [160-162].

SEM, geometrisi karmaşık yapı veya yapı elemanlarının daha basit küçük sonlu parçalara dönüştürülmesi ve bu sonlu eleman parçacıklarına ait alt çözüm bölgelerinin oluşturulması ile hassas hesaplar yapılmasına olanak sağlar. Bir, iki veya üç boyutlu

olabilen bu küçük sonlu parçalar ve alt bölgeler düğüm ya da düğüm noktası adı verilen noktalarda birbirlerine bağlanmaktadır (Şekil 6.1) [163].

Yapının sonlu küçük parçalara dönüştürülmesi, sınır koşulları ve yükleme durumlarının tanımlanması, her bir sonlu elemana ait malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile oluşturulan sonlu eleman modelleri aracılığı ile yapı veya yapı sistemlerinin davranışları gerçeğe yakın bir şekilde belirlenebilir [164].



Şekil 6.1. Bir, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar [153].

İki ya da üç boyutlu modeller için düğüm noktalarının oluşturduğu ızgara görünümü yapıya çözüm ağı (mesh) denir. Elemanlar bu çözüm ağı örgüsü yardımıyla sonlu parçalara ayrılır. Çözüm ağı örgüsünün yoğun olması dolayısıyla geometrik olarak köşe sayısının fazla olması düğüm noktası sayısının artmasına neden olmaktadır. Düğüm noktası sayısının çok olması ise analiz süresinin uzamasına neden olmaktadır. Ters durumda ise çözüm ağının yoğunluğunun az olması elde edilen sonuçların, gerçek davranış sonuçlardan uzaklaşmasına neden olabilir [153].

Sonlu elemanlar analizinde hesaplanması istenen gerilme değeri sonlu eleman parçalarının içinde tanımlanmış olan integrasyon noktaları dikkate alınarak hesaplanır. Bu gerilme değerleri kullanılarak düğüm noktalarındaki yer değiştirme değerleri hesaplanır. Sonlu eleman parçaları arasındaki etkileşim bu düğüm noktaları aracılığı ile sağlanır. Doğru sonlu elemanlar modelleme tekniği ve malzeme modelleri kullanılması durumunda, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir [165, 166].

## 6.2. ABAQUS Programı

ABAQUS, yüksek performanslı, güvenilir, kaliteli, gerçekçi sonlu eleman modelleri oluşturmaya ve çözmeye imkân veren bir yazılımdır. ABAQUS'ün dört ana çekirdek yazılımı bulunmaktadır. Bu yazılımlar; ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ABAQUS/CFD ve ABAQUS/CAE şeklindedir.

ABAQUS/Standard, Implicit çözüm yöntemini kullanan genel amaçlı bir sonlu eleman yazılımıdır. Doğrusal ve doğrusal olmayan statik, dinamik, ısı transferi ve akustik gibi mühendislik problemlerinin çözümlenmesi için geliştirilmiş bir modüldür.

ABAQUS/Explicit, zamana bağlı dinamik ve statik, yüksek derecede geometrik ve malzeme doğrusalsızlığı içeren problemlerin modellenmesi ve çözümlenmesi için geliştirilmiş modüldür.

ABAQUS/CFD, doğrusal olmayan ısı-akış ve yapısal-akış problemleri, laminar ve türbülanslı akışlar, ısı transferi, hareket ve türbülanslı taşınım problemleri modüldür.

ABAQUS/CAE ise yukarıda bahsedilen ABAQUS çözümleri için modelleme, çözüm, çözüm yönetimi ve sonuçların değerlendirilmesi süreçlerini tek bir kullanıcı ara yüzü altında toplamaya yardımcı olan modelleyicidir [153].

Implicit çözüm yöntemi iterasyon yaparak sonuca ulaşmaya çalışır. Yapılan çözümlerinde malzeme ve geometri için doğrusal olmayan davranış dikkate alındığından çözüm süresi uzamaktadır. Fakat Explicit çözümler iterasyon yapmadan yeterli küçüklükte adım sayısı kullanılarak sonuca ulaşmaya çalışır. Explicit çözümlerde adım sayısının boyutuna göre analiz süresi Implicit çözüme göre daha kısa olabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı Explicit çözüm yöntemleri daha çok dinamik problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise malzeme ve geometri için doğrusal olmayan davranış dikkate alınarak monotonik yükleme yapıldığı için ABAQUS/Standard-Implicit çözüm yöntemi kullanılmıştır [153].

### 6.3. Beton Malzeme Modeli

Beton malzeme modeli için ABAQUS'te dağınkı çatlak (concrete smeared cracking) ve hasar plastisitesi (concrete damage plasticity) olmak üzere iki ana malzeme modeli bulunmaktadır. Her iki model de donatılı ve donatısız betonlar için kullanılmaktadır [167]. Bu çalışmada beton malzeme modelinin tanımlanmasında beton hasar plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır.

#### 6.3.1. Beton hasar plastisite modeli (BHP)

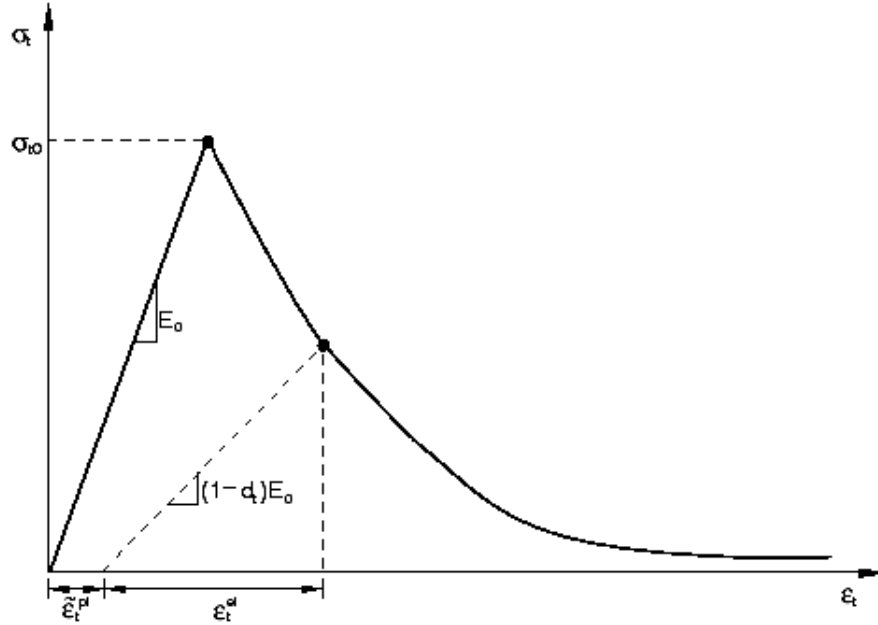
Beton hasar plastisite modeli, plastisite tabanlı sürekli bir hasar modelini temsil etmektedir. Beton hasar plastisite (BHP) modeli, Lublinear [168], tarafından monotonik yüklemeler için önerilmiş ve daha sonra Lee ve Fenves tarafından dinamik ve tekrarlı yükler için geliştirilmiştir [169].

BHP modeline göre betonda çekme çatlama ve basınç kırılması olmak üzere 2 önemli hasar mekanizması vardır. Bu bölümde betonun basınç ve çekme davranışı ile birlikte betonun çekme sertleşmesi, çatlama enerjisi, akma fonksiyonu ve akma potansiyeli hakkında bilgi verilmektedir.

##### 6.3.1.1. Betonun basınç ve çekme davranışı

Çekme ve basınç yükü etkisi altında oluşan hasarı tanımlamak için  $(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \tilde{\epsilon}_c^{pl})$  olmak üzere iki adet birim şekil değiştirme kavramı kullanılır. Bu modelde betonun eksenel çekme ve basınç davranışı hasar parametreleri yardımıyla tanımlanmaktadır. Eksenel çekme durumunda Gerilme-birim şekil değiştirme davranışı maksimum çekme gerilmesi  $\sigma_{t0}$  değerine kadar elastik bir davranış göstermektedir (Şekil 6.2.). Maksimum çekme gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme, çekme gerilmesinin başlangıç elastisite modülüne bölünmesiyle elde edilir. Maksimum çekme gerilmesi değerine ulaştığında betonda çekme çatlak meydana gelmektedir. Bu değerden sonra yükün artmasıyla oluşan mikro çatlaklar yükün uygulandığı doğrultuya dik olarak yayılmaya başlar. Çatlakların ilerlemesiyle taşınabilen yük değerinde

azalma meydana gelir. Bu nedenle beton, çekme gerilmeleri altında basınç gerilmelerine kıyasla daha zayıftır. Gerilmelerin artmasıyla birlikte numunede gevrek davranış gözlenir.

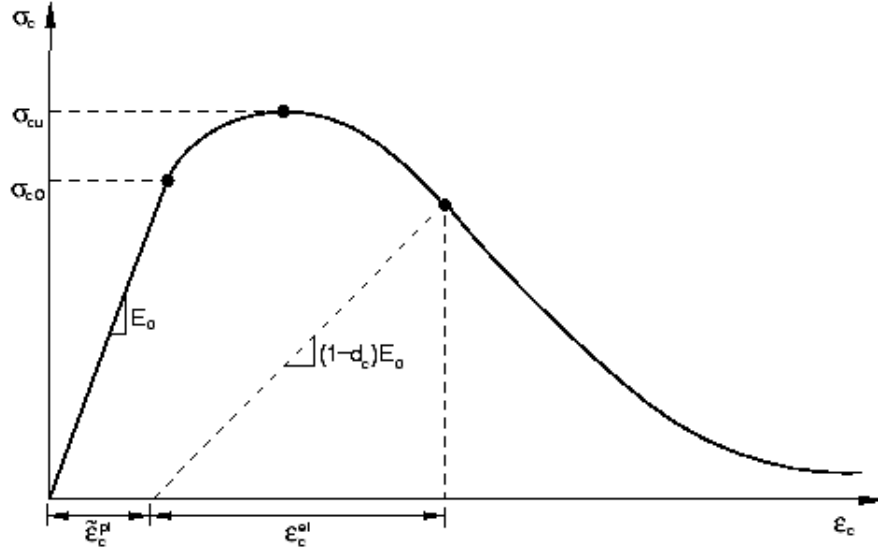


Şekil 6.2. Beton için aksel çekme davranışı [153]

Çekme çatlakı oluştuğunda, çatlakların uç kısmında birbirinden bağımsız, paralel mikro çatlaklar da oluşur. Paralel mikro çatlakların oluştuğu bu bölgeye çatlak ilerleme bölgesi adı verilir. Artan yük etkisi altında bu mikro çatlaklar kritik bir değere ulaştığında davranış kararsız hale gelerek gerilmelerin azalmasına ve sistemin şekil değiştirmesine neden olur. Bu durum çekmede yumuşama bölgesi olarak ortaya çıkar [170].

Literatürde bulunan bazı çalışmalarda, beton numunede oluşan gerilmenin maksimum çekme gerilmesine ulaşmasıyla betonun güç tükenmesine ulaştığı kabul edilerek çatlama sonrası dayanım ihmal edildiği belirtilmektedir [171]. Ancak daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için betonun çatlama sonrası dayanımının dikkate alınması gerekmektedir [172].

Eksenel basınç durumunda  $\sigma_{c0}$  değerine kadar davranışın elastik olduğu kabul edilir. Maksimum gerilmeden sonra ( $\sigma_{cu}$ ) ise plastik bölgede davranış gerilme yumuşaması ve gerilme sertleşmesi ile tanımlanır [153].



Şekil 6.3. Beton için eksenel basınç davranışı [153]

Beton basınç dayanımının yaklaşık %30-40 civarına kadar doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Bu yük etkisinde beton içerisinde mevcut bulunan çatlaklarda herhangi bir değişim oluşmaz. Gerilme değeri %30-50 arasında olması durumunda mikro çatlaklar yayılmaya başlamaktadır. Bunun sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi azalır. Gerilmenin %50-60 mertebesine çıkması durumunda çatlaklar yük uygulanma doğrultusuna yaklaşık 45° açı ile oluşur. %75-80 değerlerine ulaşmasının ardından çatlakların yayılması hızlanır ve gözle görülebilen çatlaklar oluşur. Ayrık durumda olan çatlaklar birleşerek sürekli bir çatlak ağı meydana getirir. Yükün artmasıyla birlikte şekil değiştirmelerin meydana gelmesiyle gerilme değerleri azalır. Bu olaya basınç yumuşaması ismi verilir.

Heterojen bir malzeme olan beton üniform yükler altında bile oldukça farklı gerilme dağılımına ulaşabilir. Tepe noktasının ardından gerilmeler belirli bölgelerde yığılmaya başlar. Yığılmaların meydana geldiği bu olaya yerelleşme (localization) denir [173].

Gerilme-şekil değiştirme eğrileri üzerinde maksimum çekme ve basınç gerilmelerinin ardından plastik şekil değiştirmeler oluşmakta ve betonun elastite modülü azalmaktadır. Elastisite modülündeki bu azalma sıfır ile bir arasında değerler alabilen  $d_t$  ve  $d_c$  hasar parametrelerine bağlı olarak ifade edilmektedir. Burada sıfır hasar oluşmadığını bir ise maksimum hasarı ifade etmektedir.  $E_0$  malzemenin başlangıç (hasarsız) elastisite modülünü göstermektedir [153].

$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ : basınç etkisinde plastik şekil değiştirme

$\tilde{\varepsilon}_c^{in}$ : basınç etkisinde inelastik şekil değiştirme

$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ : çekme etkisinde plastik şekil değiştirme

$\tilde{\varepsilon}_t^{in}$ : çekme etkisinde inelastik şekil değiştirme

Eksenel basınç ve çekme etkisi altında oluşan gerilmeler aşağıdaki eşitlikler (Denklem 6.1 ve 6.2) ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (6.1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (6.2)$$

Eksenel basınç ve çekme etkisi altında oluşan plastik birim şekil değiştirmeler ise aşağıdaki eşitlikler (Denklem 6.3 ve 6.4) ile ifade edilmektedir.

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (6.3)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (6.4)$$

Burada;

$\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ : çatlama birim şekil değiştirmesi

$\varepsilon_t$ : toplam birim şekil değiştirme

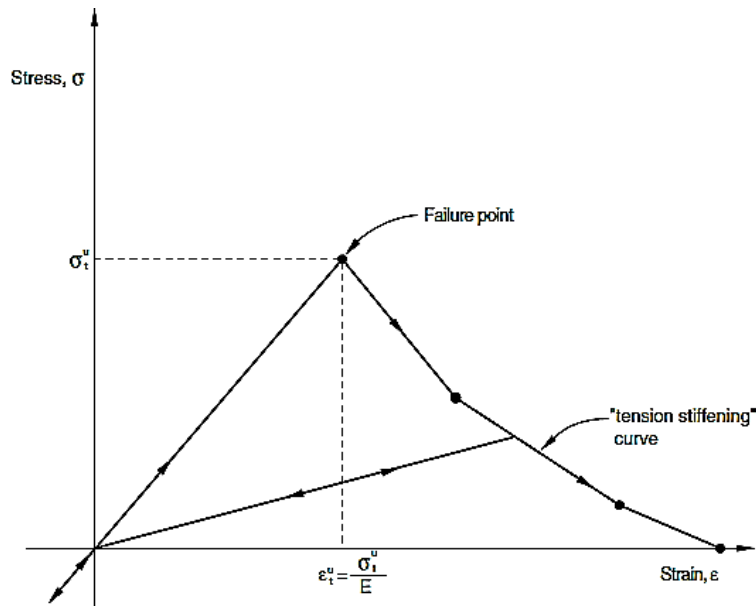
$\varepsilon_{0t}^{el}$ : hasar görmemiş malzeme için elastik şekil değiştirme



### 6.3.1.2. Betonun çekme sertleşmesi

Çekme sertleşmesi, beton içerisinde oluşan çekme gerilmelerinin elastik rijitlik üzerindeki etkisi olarak tanımlanabilir. Beton ve donatı yüzeyi arasında sıyrılma ve kaldıraç etkisi nedeniyle oluşan beton davranış modeli, donatı boyunca oluşan çatlaklarda çekme sertleşmesi (tension stiffening) davranışı dikkate alınarak tanımlanır. Çekme sertleşmesi, gerilme-şekil değiştirme ve çatlak enerjisi ile modellenenir (Şekil 6.4.).

Betonarmede gerilme yumuşaması davranışı, çatlak boyunca oluşan şekil değiştirmenin bir fonksiyonu (Strain-softening) olarak tanımlanır. Sonlu elemanlar çözümlerinde, kesitte donatı bulunmaması veya az miktarda bulunması durumunda çatlak oluşumunun kesitte düzgün yayılı olmaması çekme sertleşmesinin tanımlanmasında problemlere neden olabilmektedir. Çatlakların düzgün yayılı olması durumunda çözüm ağı hassasiyeti çok önemli değildir. Beton ve donatı arasındaki etkileşimin doğru modellenmesi çözüm ağı hassasiyetini azaltmaktadır. Beton ve donatı arasında oluşan bu olumsuz etkileşim nedeni ile beton modelinde çekme sertleşmesi göz önüne alınmaktadır (Şekil 6.4.) [153].



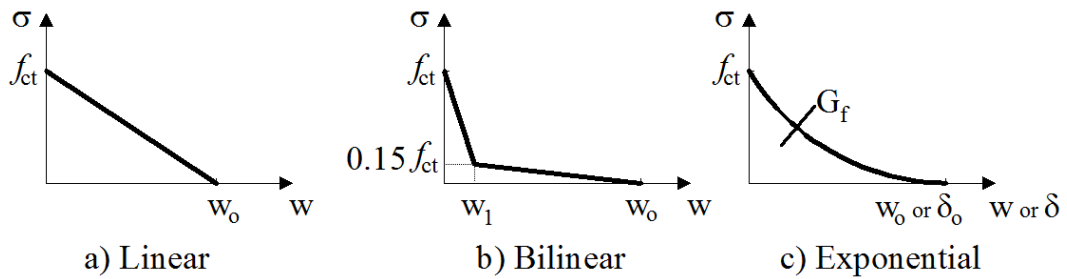
Şekil 6.4. Betonun çekme sertleşmesi davranışı [153]

Çekme sertleşmesi etkisi donatı yoğunluğu, beton ve donatı arasındaki bağ kalitesi, agrega büyüklüğü ve çözüm ağı gibi faktörlere bağlı olarak tahmin edilebilir. Doğru nümerik sonuçlar elde etmek için çekme sertleşmesi (tension stiffening) parametrelerinin belirlenmesi önemlidir [153].

### 6.3.1.3. Beton çatlama enerjisi kriteri

Çatlak enerjisi ( $G_f$ ), birim alanda çatlak oluşumu için gerekli olan enerjiyi temsil etmektedir. Bu yaklaşımda betonun gevrek davranışı, gerilme-şekil değiştirme (stress-strain) davranışı yerine gerilme-yer değiştirme (stress-displacement) davranışı ile karakterize edilir. Betonun çatlama sonrası çekme sertleşmesi davranışı, gerilme-çatlak genişliği parametrelerinin yanısıra çatlak enerjisi-çatlak genişliği parametreleri kullanılarak da belirlenebilir. Çatlama enerjisi ( $G_f$ ) malzemenin güç tükenmesine karşılık gelen gerilme ( $\sigma_{t0}$ ) değeri ile ilişkilidir [86, 153, 170, 174-176, 178].

Betonda oluşabilecek çatlak yayılımının düzgün dağıtılabilmesi amacıyla çekme sertleşmesinin tanımlanması için literatürde farklı modeller (doğrusal, çift doğrusal ve doğrusal olmayan) bulunmaktadır [177] (Şekil 6.5.). Bu çalışmada analizlerde en iyi sonuç veren doğrusal olmayan (exponential-üstel fonksiyon) çekme modeli kullanılmıştır (Şekil 6.5.c.).



Şekil 6.5. Betonun çatlama sonrası çekme davranışı [128]

Şekil 6.5.a.'da gösterilen doğrusal davranış ( $\sigma - w_0$ ) için kırılma enerjisi aşağıdaki eşitlik (Denklem 6.5) ile hesaplanır.

$$G_f = 1/2 f_{ct} w_0 \quad (6.5)$$

Burada,  $w_0$  çatlak genişliği,  $f_{ct}$  ise beton numune üzerindeki gerilmeyi göstermektedir. Çatlak genişliği aşağıdaki eşitlik (Denklem 6.6) ile elde edilir.

$$w_0 = \alpha_f \frac{G_f}{f_{ct}} \quad (6.6)$$

Burada,  $\alpha_f$  gerilme-çatlak genişliği ( $\sigma-w$ ) ve agrega boyutuna bağlı olarak belirlenen bir katsayıdır. Doğrusal ( $\sigma-w$ ) için  $\alpha_f = 2$  alınır.

Şekil 6.5.b.'de verilen iki doğrusal (bilinear) modelde ise  $\alpha_f$  katsayısı yine beton içerisindeki agrega boyutuna bağlı olarak 5 ile 8 arasında alınır.

Şekil 6.5.c.'de verilen exponential (üstel fonksiyon) model için literatürde aşağıdaki eşitlikler (Denklem 6.7 ve 6.8) ile tanımlanmaktadır.

$$G_f = 73x f_{cm}^{0,18} \quad (6.7)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (6.8)$$

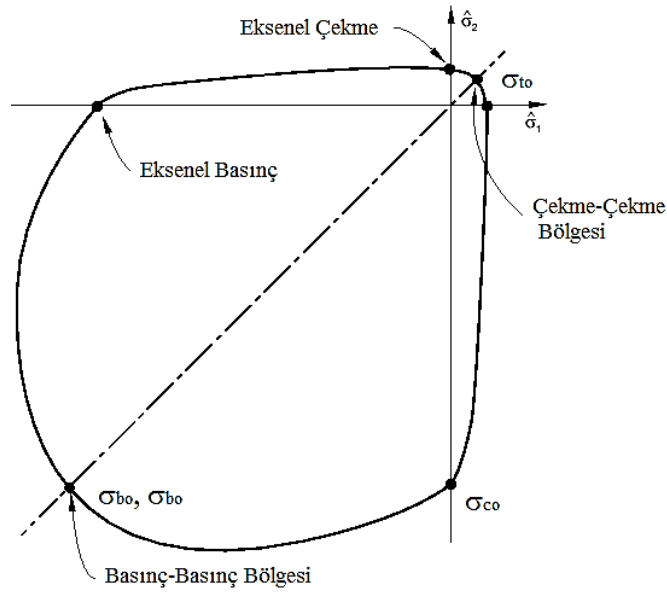
Burada  $\Delta f = 8 \text{ MPa}$  alınırken,  $f_{cm}$ , betonun ortalama basınç dayanımını,  $f_{ck}$  ise betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir [170, 178].

#### 6.3.1.4. Beton akma fonksiyonu

BHP modelinde, betonun basınç ve çekme etkisi altında elastik sınırlarını belirleyen yüzey, kırılma (akma) yüzeyi olarak tanımlanır (Şekil 6.6.). Kırılma yüzeyi aşağıda verilen dört farklı oran ile tanımlanabilir.

1. iki eksenli basınç gerilmesi maksimum değerinin tek eksenli basınç gerilmesi maksimum değerine oranı

2. tek eksenli çekme gerilmesinin tek eksenli maksimum basınç gerilmesine oranının mutlak değeri
3. iki eksenli basınç gerilmesinde oluşan asal plastik şekil değiştirme değerinin tek eksenli basınç gerilmesinde oluşan maksimum şekil değiştirme değerine oranı
4. düzlem gerilme durumunda, çatlama anındaki asal çekme gerilmesinin tek eksenli çekme durumundaki çekme maksimum gerilmesine oranı



Şekil 6.6. Betonun iki eksenli gerilme-güç tükenme zarfı [153]

Şekil 6.6.'da düzlem gerilme halinde verilen göçme zarfında iki doğrultuda basınç etkimesi durumunda betonun dayanımı artmaktadır. Dayanımda meydana gelen en büyük artış ( $\sigma_1 = 0,50\sigma_2$ ) durumunda oluşmakta ve bu değer tek eksenli basınç dayanım değerine oranla %25 daha fazla olmaktadır. Eşit basınç gerilmeleri uygulanması durumunda ( $\sigma_1 = \sigma_2$ ) ise bu artış %12-16 seviyelerinde gerçekleşmektedir. Bir doğrultuda çekme ve diğer doğrultuda basınç etkimesi durumunda basınç dayanımında doğrusala yakın bir şekilde azalma meydana gelmektedir. İki doğrultuda da çekme etkimesi durumunda tek eksenli çekme dayanımından neredeyse hiç farklı olmadığı görülmektedir [179].

ABAQUS'de akma yüzeyi,  $\psi$  (dilasyon/genleşme açısı),  $\epsilon$  (eksantrisite),  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$ , ve  $K_c$  olmak üzere dört farklı parametre ile belirlenmektedir [153].

Burada  $\psi$ , çatlak oluşumu ile malzemede meydana gelen genleşmeyi,  $\epsilon$ , akma yüzeyi eksantrisitesini,  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  başlangıç aksenal basınç akma gerilmesinin başlangıç aksenal basınç gerilmesine oranını ve  $K_c$ , çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranını ifade etmektedir.

Nümerik çalışmalarda vizkozite parametresi kullanılmasıyla gerilmelerin akma yüzey sınırlarının dışına bir miktar çıkması sağlanarak sayısal modelin yakınsama yeteneği artırılmıştır. Vizkozite parametresi için geliştirilmiş Duvaut-Lions yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada vizkozite parametresinin belirlenmesi için parametrik çalışma gerçekleştirilmiş ve modelin yakınsama yeteneği dikkate alınarak bu değer 0,0001 olarak seçilmesine karar verilmiştir [153, 180].

### 6.3.1.5. Plastik akma potansiyeli

Plastik akma potansiyeli gerilme ile plastik şekil değiştirme arasındaki ilişki ile tanımlanmaktadır. Bunun için aşağıdaki eşitlikte (Denklem 6.9) verilen Drucker-Prager fonksiyonu kullanılmaktadır (Şekil 6.7.).

$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{to} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (6.9)$$

Burada;

$\psi$  = dilasyon/genleşme açısı

$\epsilon$  = akma yüzeyi eksantrisitesi

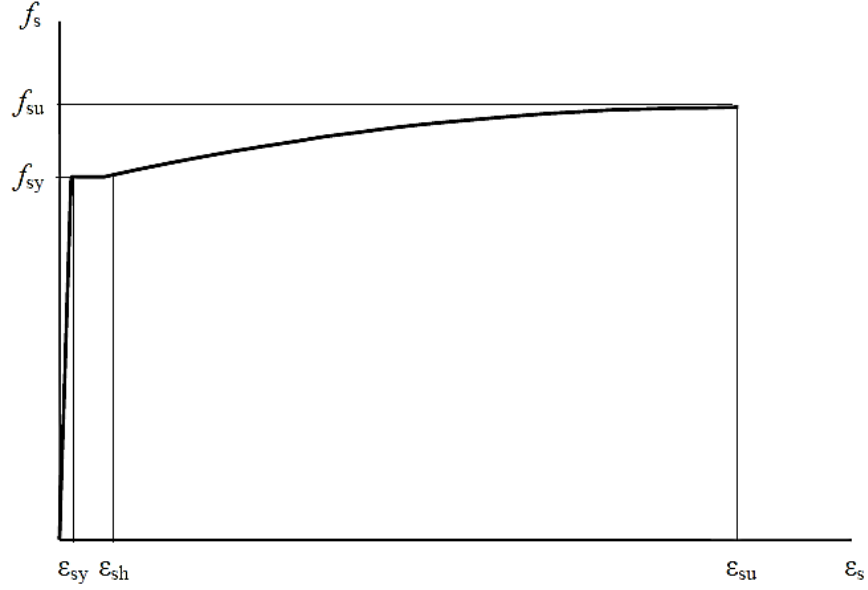
$\sigma_{to}$  = aksenal çekme gerilmesi

$\bar{q}$  = eşdeğer Mises etkili gerilmesi

$\bar{p}$  = hidrostatik basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır [180].



Gömülü modelde, donatı tek eksenli şekil değiştirme teorisi elemanları (donatı çubukları) yardımıyla oluşturulur. Donatı malzeme davranışını belirlemek için metal plastisite modelleri kullanılır [153]. Şekil 6.8.'de donatı için elastik ve pekleşmeyi içeren elastik ötesi davranış sergileyen gerilme birim şekil değiştirme cinsinden malzeme modeli tanımlanmıştır.

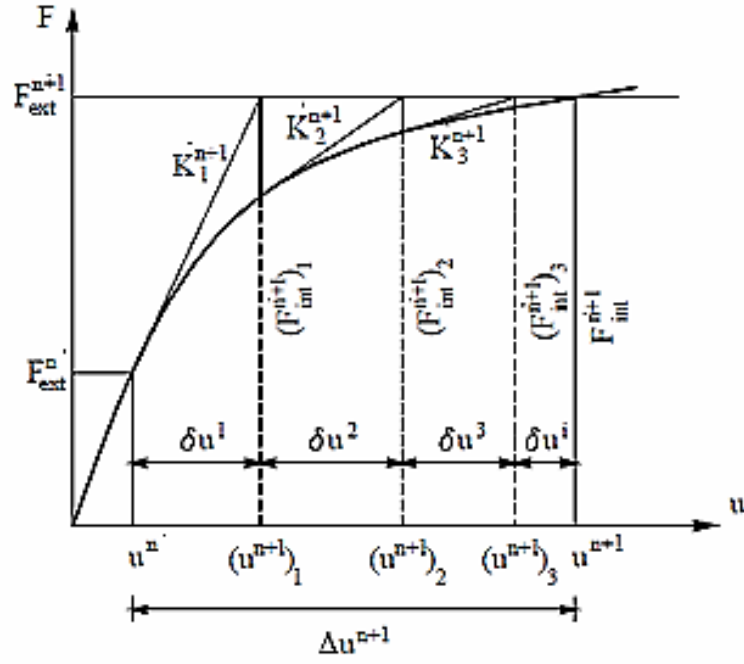


Şekil 6.8. Eksenel çekme etkisindeki donatı davranış modeli [144]

### 6.5. Sonlu Elemanlar Çözüm Stratejisi

Sonlu elemanlar yönteminde yapı küçük parçalara ayrılır ve bu parçalar birbirlerine düğüm noktaları aracılığı ile bağlanırlar. Sonlu eleman çözümleri ise parçaların birbirine bağlandığı bu düğüm noktalarında kurulan denge denklemleri yardımı ile gerçekleştirilir [173].

Malzeme özellikleri ve geometrisi doğrusal olmayan sistemlerin çözümlerinde genellikle Newton-Raphson ve türevi yöntemler kullanılmaktadır (Şekil 6.9.).



Şekil 6.9. Newton-Raphson yöntemi [153]

Sistemin deforme olmamış durumunda rijitlik matrisleri dikkate alınarak başlangıç yer değiştirmeleri belirlenir. Her bir yük artımına karşılık gelen iç kuvvet, dış kuvvet ve yer değiştirme değerleri bulunur. Çözümler dengelenmemiş kuvvetin her durumda yeniden hesaplanmasıyla yakınsama sağlanıncaya kadar devam ettirilir. Kabul edilen hata payı içerisinde yeterli yakınsama sağlanıncaya kadar dengelenmemiş kuvvet ve yer değiştirme vektörlerinin yeniden hesaplanması gerekmektedir. Yapılan nümerik çalışmalarda yakınsama kriteri varsayılan olarak dikkate alınmıştır [153, 173].



## **BÖLÜM 7. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI**

Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sayısal veriler ve test numunelerinin davranışlarına ait açıklamalar yer almaktadır. Deney düzeneği oluşturulurken iki farklı mesnet tipi kullanılmış olup ilkinde basit mesnetli sistem diğerinde ise her ikisi de sabit mesnetli olan 1. dereceden hiperstatik sistem kullanılmıştır. Deney numuneleri 3 farklı seri şeklinde sınıflandırılmıştır. Seri-1 deney numuneleri basit mesnetli olup Seri-2 deney numuneleri ise 1. dereceden hiperstatik olarak mesnetlenmiştir. Seri 1 ve Seri-2’de 7’şer adet deney numunesi bulunmaktadır. Seri-3 numunelerinin mesnetlenme şartı Seri-2 ile aynı olup enine donatı-çapraz kesme donatısı konfigürasyonu farklıdır. Seri-3’de ise 5 adet deney numunesi bulunmaktadır.

### **7.1. Seri-1**

Bu seride 1’i referans olmak üzere toplam 7 adet betonarme kısa kiriş hazırlanmış ve dört nokta yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Numune isimlerinin sonunda yer alan 1 rakamı Seri-1’i temsil etmektedir. Referans test numunesinde çapraz kesme donatısı bulunmayıp etriye adım mesafesi 100mm olarak seçilmiştir. Çapraz kesme donatısı bulunan ve bulunmayan diğer numunelerin etriye adım mesafeleri 200, 400 ve 800mm olarak belirlenmiştir. Çapraz kesme donatısının bulunduğu numunelerde çapraz kesme donatıları etriye konumlarına göre yerleştirilmiş olup açıları sırasıyla 65,30°, 47,30° ve 28,50° değerlerine karşılık gelmektedir. Çapraz donatılı her bir numune, TDY2007 tarafından önerilen sınırlar içerisinde bulunan R100-1 referans numunesi ve çapraz donatı bulunmayan numune ile karşılaştırılarak deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiştir.

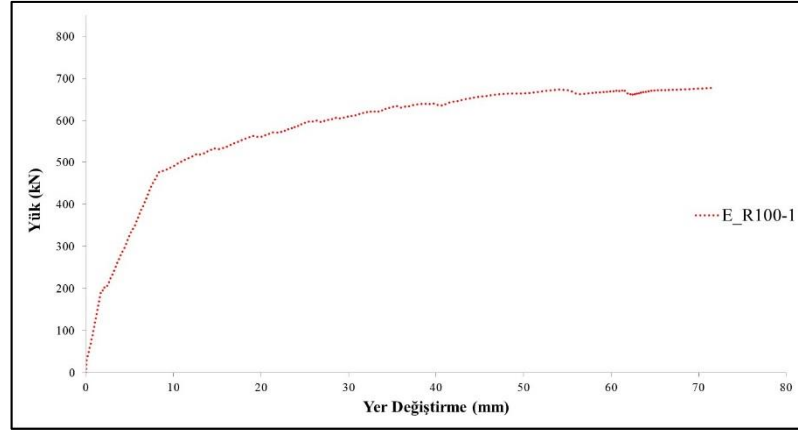
### 7.1.1. R100-1

TDY2007 tarafından önerilen sınırlar içerisinde yer alan R100-1 referans kirişine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.1.'de görülmektedir.



Şekil 7.1. R100-1 referans kirişi deney öncesi ve deney sonrası

R100-1 referans kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 189kN yük etkisinde ve 1,67mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 486kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 9,5mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artarak devam etmiştir. Aynı zamanda az sayıda kesme çatlakları meydana gelmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 678kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 71,8mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesiyle test numunesinde az sayıda kesme çatlaklarının yanı sıra belirgin bir şekilde eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir. Böylece R100-1 referans kirişi sünek davranış göstermiştir. Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır. R100-1 referans kirişine ait yük-yer değiştirme grafiği Şekil 7.2.'de verilmiştir.



Şekil 7.2. R100-1 referans kirişine ait yük-yer değiştirme grafiği

Yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak, maksimum yüke karşılık gelen yer değiştirmenin, çekme donatısının aktığı andaki yer değiştirmeye oranı olan yer değiştirme sünekliği belirlenmiştir. Kirişin enerji tüketebilme kapasitesi ise yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. R100-1 referans kirişine ait yük-yer değiştirme eğrisinden elde edilen yer değiştirme sünekliği 7,56 ve enerji tüketebilme kapasitesi 41,839kNm olarak hesaplanmıştır. Kirişin enerji tüketebilme kapasitesi, yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan kullanılarak belirlenmiştir.

### 7.1.2. S200-1 ve SX200-1

S200-1 ve SX200-1 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.3. ve Şekil 7.4.'de görülmektedir.



Şekil 7.3. S200-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

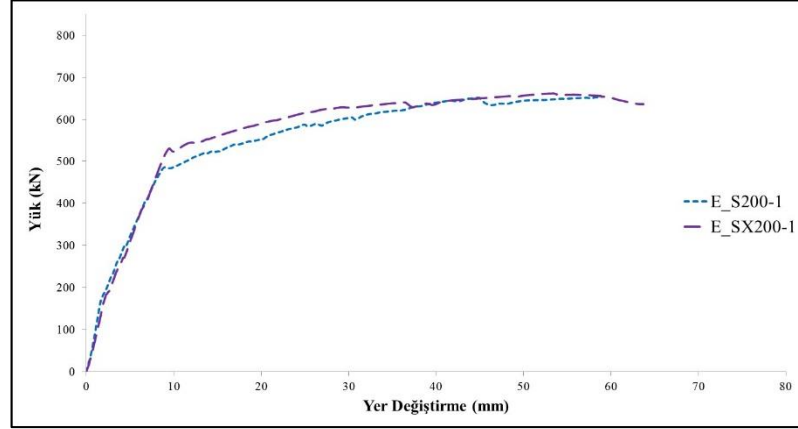


Şekil 7.4. SX200-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S200-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 171kN yük etkisinde ve 2,06mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 478kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,4mm olduğunda kiriş boyunca donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artarak devam etmiştir. Aynı zamanda kesme çatlakları da meydana gelmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 654kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 59,0mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesiyle test numunesinde kesme çatlaklarının yanı sıra belirgin bir şekilde eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir. Böylece S200-1 kirişi sünek davranış göstermiştir (Şekil 7.3. ve Şekil 7.5.). Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır.

SX200-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 182kN yük etkisinde ve 2,35mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 519kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,8mm olduğunda kiriş boyunca donatıları akmaya başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artarak devam etmiştir. Aynı zamanda kesme çatlakları da meydana gelmiştir ancak sınırlı düzeyde kalmıştır. Uygulanan maksimum yük değeri 662kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 62,3mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesi ve çapraz donatıların katkısıyla test numunesinde çok az sayıda kesme çatlaklarının yanı sıra belirgin bir şekilde eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin

uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir. Böylece SX200-1 kirişi, S200-1 kirişine kıyasla oldukça sünek davranış göstermiştir. Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır. S200-1 ve SX200-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir (Şekil 7.5.).



Şekil 7.5. S200-1 ve SX200-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

S200-1 ve SX200-1 kirişleri için yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak, sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 7,02 ile 7,08 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 32,584kNm ile 35,017kNm olarak hesaplanmıştır.

### 7.1.3. S400-1 ve SX400-1

S400-1 ve SX400-1 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.6. ve Şekil 7.7.'de görülmektedir.



Şekil 7.6. R400-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

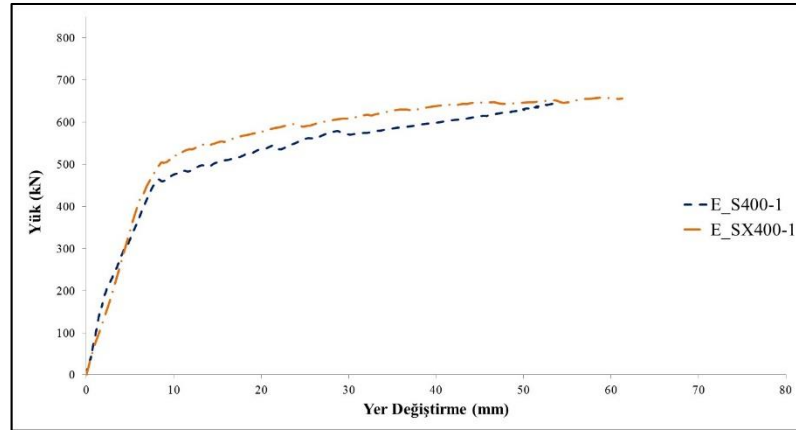


Şekil 7.7. SX400-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S400-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 158kN yük etkisinde ve 1,6mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 467kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,2mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra önce eğilme çatlaklarının daha sonra kesme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 647kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 54,3mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesiyle test numunesinde kesme çatlaklarının yanı sıra eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir. Böylece S400-1 kirişi kesmeli-eğilme davranışı göstermiştir (Şekil 7.8.). Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır.

SX400-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 160kN yük etkisinde ve 2,4mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 502kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,6mm olduğunda kiriş boyuna donatıları akmaya başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artarak devam etmiştir. Aynı zamanda kesme çatlakları da meydana gelmiş ancak sınırlı düzeyde kalmıştır. Uygulanan maksimum yük değeri 658kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 61,1mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesi ve çapraz donatıların katkısıyla test numunesinde çok az sayıda kesme çatlaklarının yanı sıra belirgin bir şekilde eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir.

Böylece SX400-1 kirişi, S400-1 kirişine kıyasla oldukça sünek davranış göstermiştir. Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır. S400-1 ve SX400-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir (Şekil 7.8.).



Şekil 7.8. S400-1 ve SX400-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

S400-1 ve SX400-1 kirişleri için verilen yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 6,62 ile 7,10 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 28,589kNm ile 34,465kNm olarak hesaplanmıştır.

#### 7.1.4. S800-1 ve SX800-1

S800-1 ve SX800-1 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.9. ve Şekil 7.10.'da görülmektedir.



Şekil 7.9. S800-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası



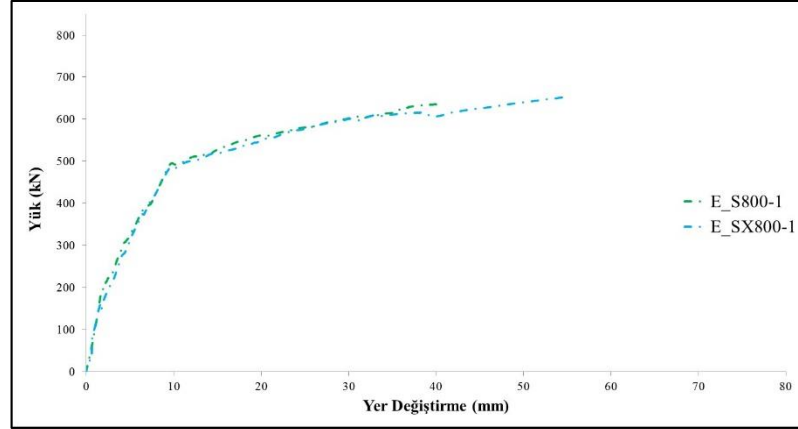
Şekil 7.10. SX800-1 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S800-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 119kN yük etkisinde ve 1,1mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 461kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,7mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra önce kesme çatlaklarının daha sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 635kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 41,4mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesiyle test numunesinde önemli oranda kesme çatlaklarının yanı sıra eğilme çatlakları da ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda az miktarda ezilme meydana gelmiştir. Böylece S800-1 kirişi kesme hakim olan kesmeli-eğilme davranışı göstermiştir (Şekil 7.11.). Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır.

SX800-1 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 160kN yük etkisinde ve 1,6mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 489kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 9,6mm olduğunda kiriş boyuna donatıları akmaya başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının sayısı ve genişliği artarak devam etmiştir. Aynı zamanda kesme çatlakları da meydana gelmiştir ancak sınırlı düzeyde kalmıştır. Uygulanan maksimum yük değeri 654kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 55,2mm olarak belirlenmiştir. Yük etkisi altında hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket etmesi ve çapraz donatıların katkısıyla test numunesinde az sayıda kesme çatlaklarının yanı sıra belirgin bir şekilde eğilme çatlakları ortaya çıkmıştır. Ayrıca test numunesinin uygulanan iki



yük arasında kalan basınç bölgesinde betonda ezilme meydana gelmiştir. Böylece SX800-1 kirişi, S800-1 kirişine kıyasla daha sünek davranış göstermiştir. Hareketli mesnetin yatay yönde belirli bir değere ulaşmasının ardından deney sonlandırılmıştır. S800-1 ve SX800-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir (Şekil 7.11.).



Şekil 7.11. S800-1 ve SX800-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

S800-1 ve SX800-1 kirişleri için verilen yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 4,76 ile 5,75 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 21,383kNm ile 30,168kNm olarak hesaplanmıştır.

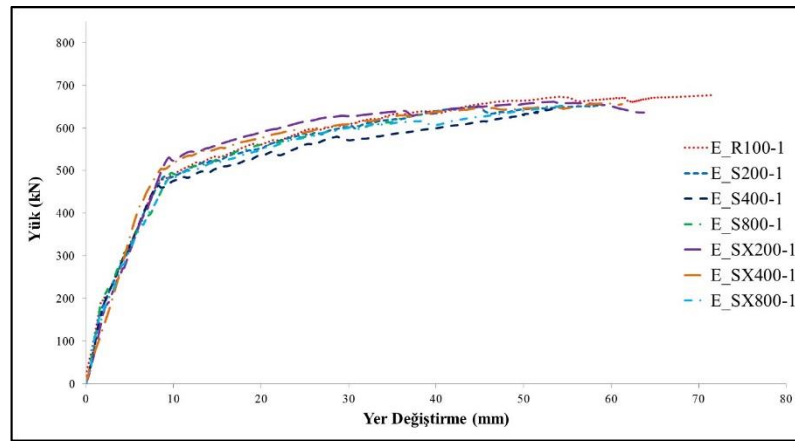
### 7.1.5. Seri-1 sonuçları

Seri-1 test numunelerine ait deney sonuçları Tablo 7.1. ve Şekil 7.12.'de verilmiştir. Deney sonuçları dikkate alınarak akma ve nihai durumda elde edilen yük ve yer değiştirme değerleri ile yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim değerleri belirlenmiştir.

Bu sonuçlar incelendiğinde kirişlerin tamamında ilk çatlakın oluşması ve donatının akmaya başlamasının yaklaşık olarak aynı yük ve yer değiştirme değerlerine karşılık geldiği ve hemen hemen aynı yer değiştirme değerine kadar yük taşıdığı gözlemlenmiştir.

Tablo 7.1. Seri-1 deney sonuçları

Deney Numunesi	Yük P (kN)		Yer Değişirme $\Delta$ (mm)		Yer Değişirme Sünekliği	Enerji Tüketimi P- $\Delta$ (kNm)
	Akma ( $\delta_y$ )	Son ( $\delta_u$ )	Akma ( $\delta_y$ )	Son ( $\delta_u$ )	$\delta_u / \delta_y$	
S800-1	461	635	8,7	41,4	4,76	21,383
SX800-1	489	654	9,6	55,2	5,75	30,168
S400-1	467	647	8,2	54,3	6,62	28,589
SX400-1	502	658	8,6	61,1	7,10	34,465
S200-1	478	654	8,4	59,0	7,02	32,584
SX200-1	519	662	8,8	62,3	7,08	35,017
R100-1	486	678	9,5	71,8	7,56	41,839

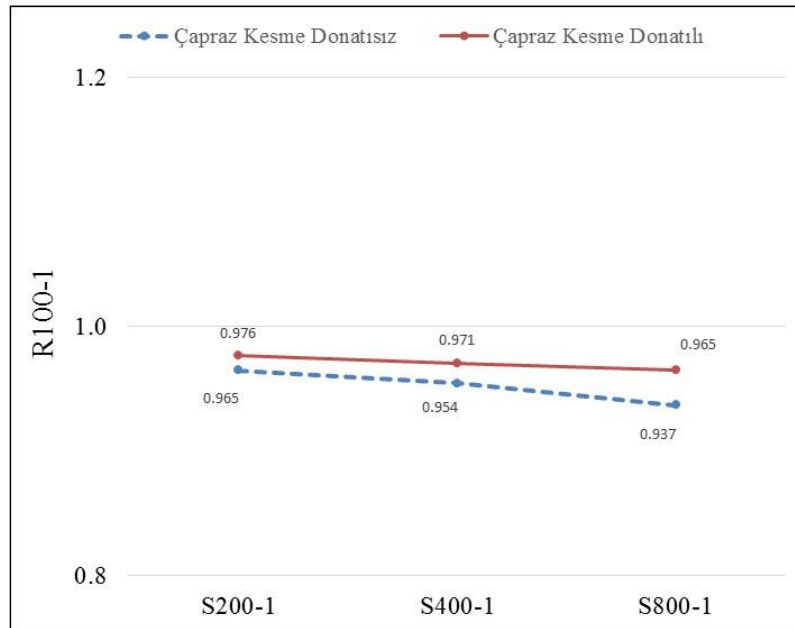


Şekil 7.12. Seri-1 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

Deney sonuçları göstermektedir ki aynı montaj ve boyuna donatı detayları ile farklı kesme donatı özelliklerine sahip kirişler basit (sabit ve hareketli) mesnetli sistem etkisi altında benzer davranışı göstermektedir. Sünek davranış göstermesi beklenen referans R100-1 kirişi ile gevrek davranış göstermesi beklenen S800-1 kirişinin benzer davranışı göstermesinin tek açıklaması mesnetlenme şartlarıdır. Şekil 7.1. - Şekil 7.12. dikkatle incelendiğinde, kirişlerin tamamında yükün artmasıyla hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket ettiği ve bu hareket etkisiyle çatlakların eğilme bölgesinde oluştuğu ve kirişlerin eğilme etkisiyle nihai duruma ulaştığı görülmektedir. Ancak farklı kesme donatısı özelliklerine sahip betonarme kirişlerin bu şekilde benzer davranış göstermesi beklenmemektedir.

Deney sonuçları dikkatle incelendiğinde, çapraz kesme donatısı kullanılan kirişlerin kullanılmayan kirişlere oranla daha fazla yer değiştirme sünekliğine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 7.1.). Bununla birlikte basit mesnetli (sabit-hareketli) olarak deneyleri yapılan betonarme kirişlerde kesme davranışı belirgin olarak ortaya çıkmamaktadır. Deney numunelerinin mesnetlerinin her ikisinin de sabit olarak seçilmesi durumunda aksel yük ve çekme gerilmelerinde artmalar oluşacağından kesme davranışı daha belirgin olarak ortaya çıkacaktır [137]. Bu nedenle çapraz kesme donatısının betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımına etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için mesnetlerinin her ikisi de sabit olacak şekilde değiştirilmesi uygun olacaktır. Bu amaçla Seri-2 ve Seri-3 numuneleri için mesnetlenme şartı her iki mesnetinde sabit olduğu birinci dereceden hiperstatik sistem kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

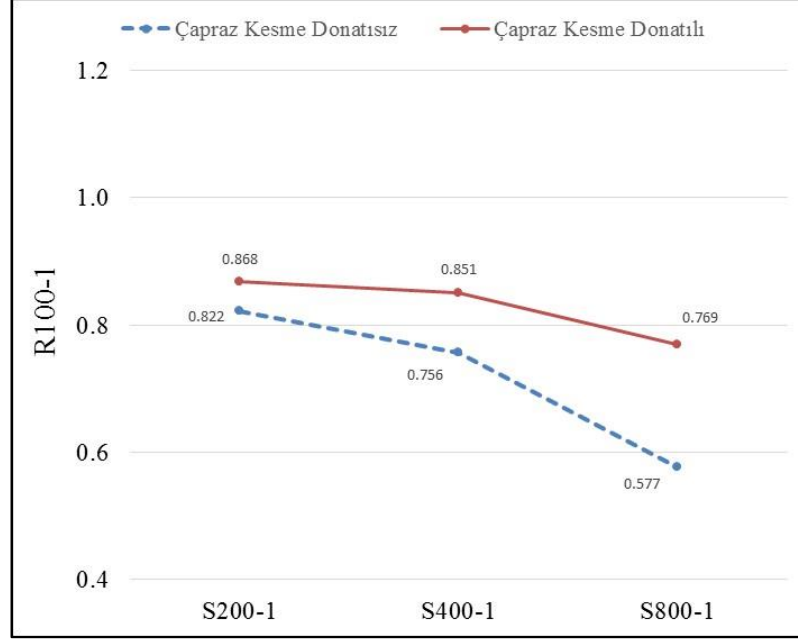
Seri-1 deney numunelerinin R100-1'e oranla maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri Şekil 7.13. ve Şekil 7.14.'de sunulmuştur.



Şekil 7.13. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre maksimum yük oranları

Şekil 7.13.'e göre S200-1, SX200-1, S400-1, SX400-1, S800-1 ve SX800-1 kirişleri R100-1 kirişi ile maksimum yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,965, 0,976, 0,954, 0,971, 0,937 ve 0,965 kat yük taşıma kapasitelerine

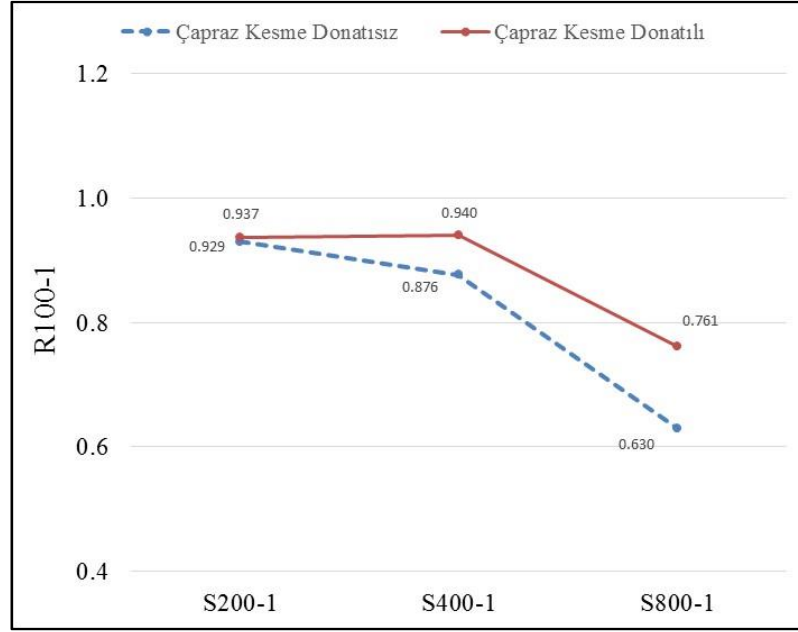
sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 7.14. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre maksimum yer değiştirme oranları

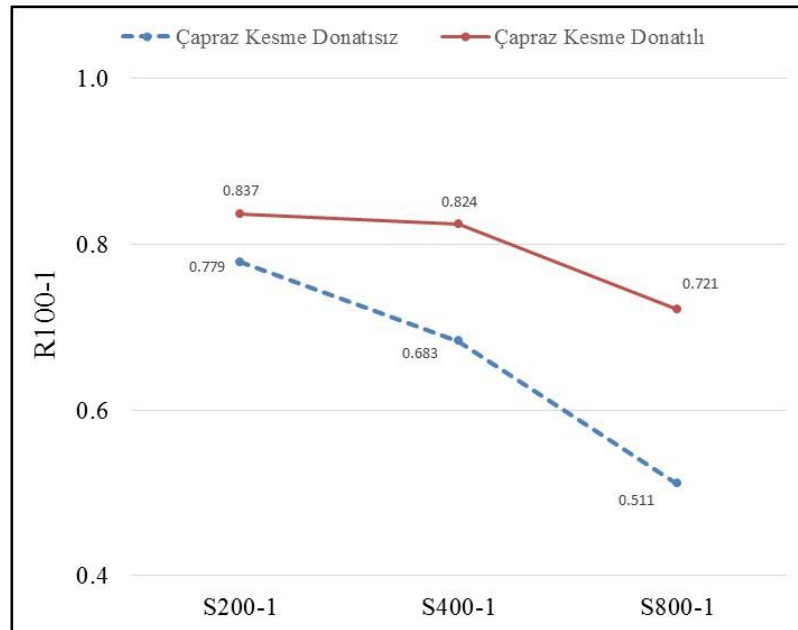
Şekil 7.14.'e göre S200-1, SX200-1, S400-1, SX400-1, S800-1 ve SX800-1 kirişleri R100-1 kirişi ile maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,822, 0,868, 0,756, 0,851, 0,577 ve 0,769 kat yer değiştirme kapasitelerine sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir.

Seri-1 deney numunelerinin R100-1'e oranla yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim değerleri Şekil 7.15. ve Şekil 7.16.'da sunulmuştur.



Şekil 7.15. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre yer değiştirme sünekliği oranları

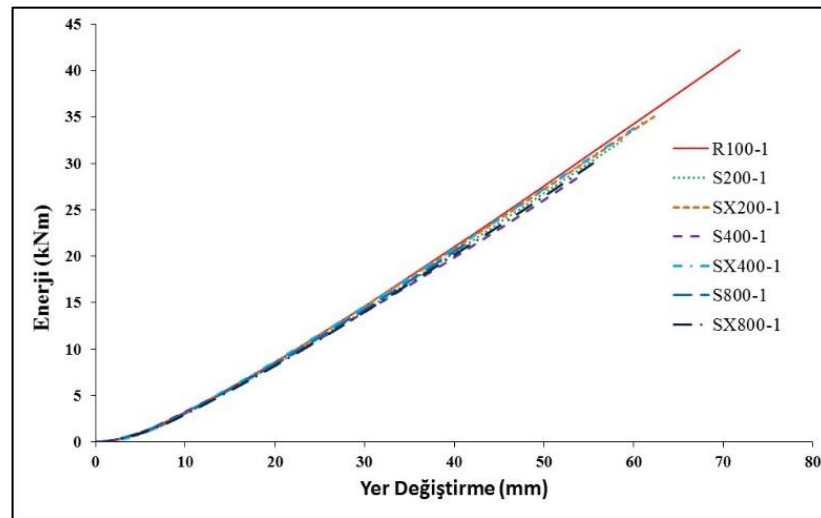
Şekil 7.15.'e göre S200-1, SX200-1, S400-1, SX400-1, S800-1 ve SX800-1 kirişleri R100-1 kirişi ile yer değiştirme sünekliği oranları açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,929, 0,937, 0,876, 0,940, 0,630 ve 0,761 kat yer değiştirme sünekliğine sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 7.16. Seri-1 deney numuneleri R100-1'e göre enerji tüketim oranları

Şekil 7.16.'ya göre S200-1, SX200-1, S400-1, SX400-1, S800-1 ve SX800-1 kirişleri R100-1 kirişi ile enerji tüketim oranları açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,779, 0,837, 0,683, 0,824, 0,511 ve 0,721 kat enerji tüketimine sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir.

Şekil 7.17.'de yer değiştirmeye bağlı olarak meydana gelen enerji tüketim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.17. Seri-1 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme

Şekil 7.17.'ye göre S200-1, SX200-1, S400-1, SX400-1, S800-1 ve SX800-1 ve R100-1 kirişlerine ait enerji tüketim değerleri sırasıyla 32,584, 35,017, 28,589, 34,465, 21,383, 30,168 ve 41,839kNm olarak belirlenmiştir.

Seri-1 deney sonuçları için her bir numunenin kendi içerisinde ve referans numuneye göre yük ve yer değiştirme açısından yüzde olarak karşılaştırılması Tablo 7.2.'de verilmiştir.

Tablo 7.2. Seri-1 deney sonuçları yük-yer değiştirme yüzdelerinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	S800-1	SX800-1	S400-1	SX400-1	S200-1	SX200-1	R100-1
	Yerdeğiştirme Kapasitesi (%)						
S800-1	-	33,33	31,16	47,58	42,51	50,48	73,43
SX800-1	2,99	-	-1,63	10,69	6,88	12,86	30,07
S400-1	1,89	-1,07	-	12,52	8,66	14,73	32,23
SX400-1	3,62	0,61	1,70	-	-3,44	1,96	17,51
S200-1	2,99	0,00	1,08	-0,61	-	5,59	21,69
SX200-1	4,25	1,22	2,32	0,61	1,22	-	15,25
R100-1	6,77	3,67	4,79	3,04	3,67	2,42	-

Burada alt üçgen maksimum yük, üst üçgen ise maksimum yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Örneğin SX800-1 kirişi maksimum yük taşıma kapasitesi açısından S800-1 ile karşılaştırıldığında %2,99 oranında daha fazla yük taşımaktadır. Benzer şekilde SX800-1 kirişi maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından S800-1 ile karşılaştırıldığında %33 oranında daha fazla yer değiştirme kapasitesine sahiptir.

## 7.2. Seri-2

Seri-1 deney numuneleri basit mesnetli (sabit-hareketli) olarak gerçekleştirilmiş ve mesnetlenme şartlarından dolayı bu kirişlerde kesme davranışının belirgin olarak ortaya çıkmadığı gözlemlenmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi çapraz kesme donatısının betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımına etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için mesnetlenme şartı değiştirilmiş ve birinci dereceden hiperstatik (sabit-sabit) olarak düzenlenerek Seri-2 deney numuneleri test edilmiştir.

Bu seride 1'i referans olmak üzere toplam 7 adet betonarme kısa kiriş hazırlanmış ve dört nokta yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Numune isimlerinin sonunda bulunan 2 rakamı Seri-2'yi temsil etmektedir. Referans test numunesinde çapraz donatı bulunmayıp etriye adım mesafesi 100mm olarak seçilmiştir. Çapraz kesme donatısı bulunan ve bulunmayan diğer numunelerin etriye adım mesafeleri 200, 400 ve 800mm olarak belirlenmiştir. Çapraz kesme donatısının bulunduğu numunelerde çapraz kesme

donatıları etriye konumlarına göre yerleştirilmiş olup açıları sırasıyla  $65,30^\circ$ ,  $47,30^\circ$  ve  $28,50^\circ$  değerlerine karşılık gelmektedir. Çapraz donatılı her bir numune, TDY2007 tarafından önerilen sınırlar içerisinde bulunun R100-2 referans numunesi ve çapraz donatı bulunmayan numune ile karşılaştırılarak deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. Boyut ve donatı detaylandırması aynı olmasına rağmen Seri-2 deney numunelerinin Seri-1 deney numunelerinden farkı mesnetlenme şeklidir. Çalışmanın bu kısmında, Seri-2’de betonarme kısa kirişlerin her iki mesneti de sabit olarak tasarlanmıştır.

### 7.2.1. R100-2

R100-2 referans kirişine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşılmış durumlar Şekil 7.18.’de görülmektedir.

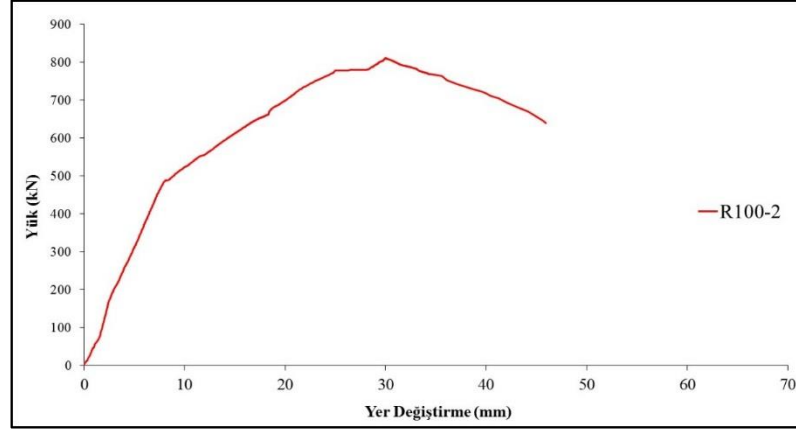


Şekil 7.18. R100-2 referans kirişi deney öncesi ve deney sonrası

R100-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlak olup  $158\text{kN}$  yük etkisinde ve  $2,3\text{mm}$  yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. R100-2 referans kirişi için  $487\text{kN}$  yük uygulanması durumunda kiriş orta noktasında  $8,6\text{mm}$  yer değiştirme meydana gelmiş ve çekme bölgesindeki boyuna donatılar akarak eğilme kırılması meydana gelmiştir. Referans kirişin kesme kapasitesi etriyelerin katkısı ve boyuna donatılarda meydana gelen pekleşmenin de etkisiyle uygulanan yük değeri  $811\text{kN}$ 'a ulaşmıştır. Bu yük altında yer değiştirme değeri  $30,0\text{mm}$  olarak belirlenmiştir. Bu noktadan itibaren eğilme ve kesme çatlaklarının genişlikleri artmış ve uygulanan yük değerinde azalma meydana gelmiştir. Orta noktada yer değiştirme değeri  $45,9\text{mm}$  olduğunda uygulanan yük  $637\text{kN}$  değerine ulaşmış ve kiriş



davranışında kesme hakim olmuştur. Bunun sonucunda kesme kırılması meydana gelmiştir (Şekil 7.19.).



Şekil 7.19. R100-2 referans kirişi yük-yer değiştirme grafiği

R100-2 kirişine ait yük yer değiştirme eğrisi kullanılarak yer değiştirme sünekliği oranı 5,34 ve enerji tüketebilme kapasitesi 28,408kNm olarak belirlenmiştir.

Yer değiştirme sünekliği katsayısı belirlenirken yük yerdeğiştirme eğrisi kullanılarak, kırılma anındaki yüke karşılık gelen yer değiştirmenin çekme donatısının aktığı andaki yer değiştirmeye oranı dikkate alınmıştır. Kirişin enerji tüketebilme kapasitesi ise yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan kullanılarak belirlenmiştir. R100-2 referans kirişi TDY2007'ye göre tasarlanmış olmasına ve eğilme hakim davranış beklenmesine rağmen kiriş numunesinin kesme kapasitesi kullanılan sabit mesnetlerden dolayı azalmıştır. Sonuç olarak deney sonucunda gevrek kesme kırılması meydana gelmiştir.

### 7.2.2. S200-2 ve SX200-2

S200-2 ve SX200-2 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.20. ve Şekil 7.21.'de görülmektedir.



Şekil 7.20. S200-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

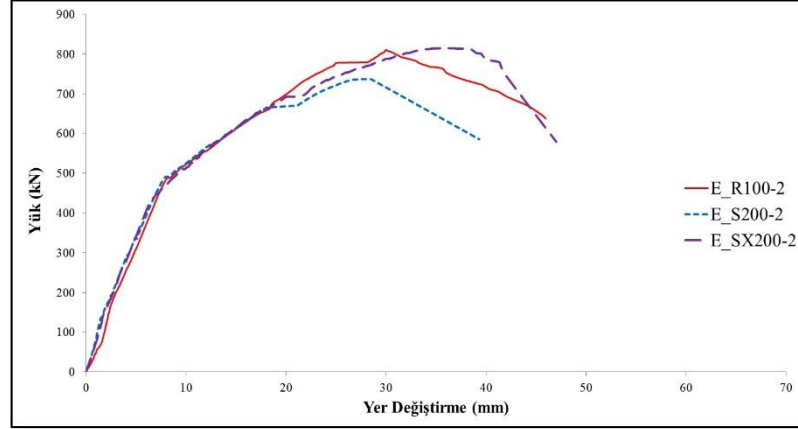


Şekil 7.21. SX200-2 kirişleri deney öncesi ve deney sonrası

S200-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 126kN yük etkisinde ve 1,3mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 485kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 7,7mm olduğunda boyuna donatılarda akma ile birlikte eğilme çatlakları meydana gelmiştir. Daha sonra uygulanan maksimum yük 737kN'a ve orta nokta yer değiştirme değeri 27,8mm'ye ulaşmıştır. Orta noktada yer değiştirme değeri 39,3mm olduğunda uygulanan yük 586kN değerine ulaşmış ve kiriş davranışında kesme hakim olmuştur. Bu noktada S200-2 test numunesinde kesme kırılması meydana gelmiştir (Şekil 7.22.).

SX200-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 139kN yük etkisinde ve 1,6mm yer değiştirme gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 464kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 7,7mm olduğunda eğilme ve kesme çatlakları meydana gelmiştir. Bu noktadan itibaren çapraz donatıların kesme ve yer değiştirmeye olan katkısıyla kesme çatlaklarının ilerlemesi önlenmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 814kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 36,4mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna

donatısı akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Orta noktada yer değiştirme değeri 47,0mm olduğunda uygulanan yük 579kN değerine ulaşmış ve kirişte mesnetlenme şekline dolaylı olarak betonda oluşan çekme kuvvetleri nedeniyle kesmeli-eğilme davranışa hakim olmuştur. S200-2, SX200-2 ve R100-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 7.22.).



Şekil 7.22. R100-2, S200-2 ve SX200-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

S200-2 ve SX200-2 kirişleri için yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 5,10 ile 6,10 ve enerji yutma kapasiteleri ise 22,525kNm ile 29,594kNm olarak hesaplanmıştır.

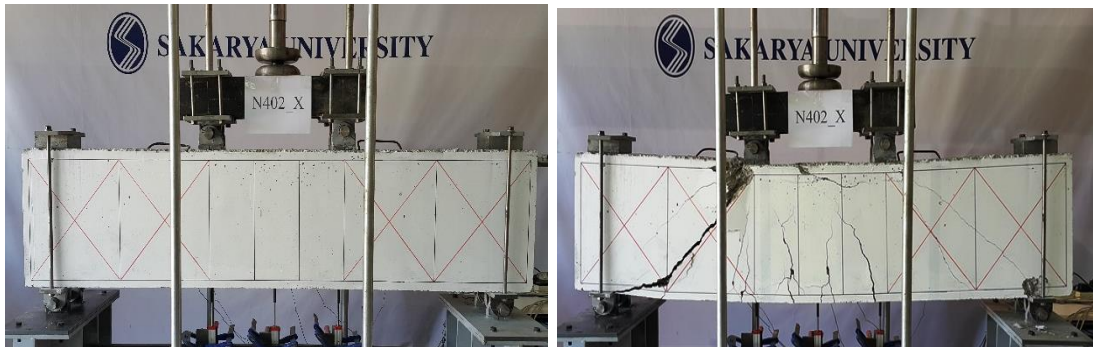
Çapraz donatı eklenen SX200-2 kirişinin kesme ve yer değiştirme kapasitesi S200-2 kirişine kıyasla sırasıyla yüzde %10,5 ve %19,6 oranlarında önemli bir şekilde artmıştır. Şekil 7.22.'de yük-yer değiştirme grafiğinde görüldüğü gibi S200-2, SX200-2 ve R100-2 hemen hemen benzer sünek davranış göstermektedir. S200-2 kirişi referans kirişi ile karşılaştırıldığında etriye adım mesafesi nedeniyle beklendiği gibi daha düşük yük ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte S200-2 kirişine çapraz donatıların eklenmesiyle elde edilen SX200-2 kirişinde süneklik ve dayanımda önemli artışlar elde edilmiştir.

### 7.2.3. S400-2 ve SX400-2

S400-2 ve SX400-2 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.23. ve Şekil 7.24.'de görülmektedir.



Şekil 7.23. S400-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

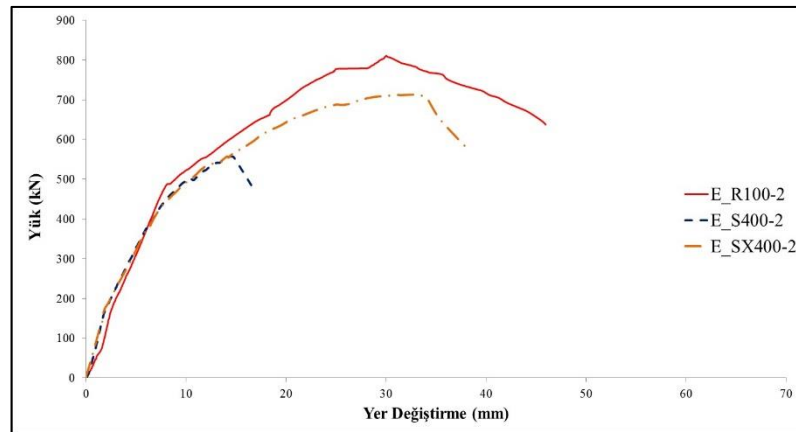


Şekil 7.24. SX400-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S400-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak kesme çatlağı olup 142kN yük etkisinde ve 1,5mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 452kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,4mm olduğunda az miktarda eğilme çatlağı meydana gelmiştir. S400-2 test numunesine uygulanan yük değeri 557kN'a ve kiriş orta noktası yer değiştirme değeri 14,5mm olmuş ve kiriş maksimum yük değerine ulaşmıştır. Orta noktada yer değiştirme değeri 16,6mm olduğunda uygulanan yük 480kN değerine ulaşmış ve kiriş davranışında kesme hakim olmuştur. S400-2 kirişi ani ve gevrek bir davranış göstererek kırılmıştır (Şekil 7.25.).

SX400-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlağı olup 164kN yük etkisinde ve 1,7mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan

yük değeri 457kN ve orta nokta yer değıştirme değeri 8,5mm olduğunda eğilme ve kesme çatlakları meydana gelmiştir. Bu yük değerinden itibaren çapraz donatılar kirişin kesme ve yer değıştirme kapasitesine katkıda bulunarak kesme çatlaklarının açılmasını önleyerek maksimum yük değerini 712kN'a ve orta nokta yer değıştirme değerini 32,7mm'ye ulaştırmıştır. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde boyuna donatı akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlakları genişlemiştir. Orta noktada yer değıştirme değeri 37,0 mm olduğunda uygulanan yük 580kN değerine ulaşmış ve kirişte mesnetlenme şeklinden dolayı oluşan çekme kuvvetleri nedeniyle kesmeli-eğilme davranışa hakim olmuştur. Bu noktadan sonra kesme çatlaklarının genişlemesi ve mesnetlenme şeklinden dolayı oluşan çekme kuvvetleri nedeniyle kiriş kesme kapasitesine eğilme kapasitesinden önce ulaşmış ve sonuç olarak kesme kırılması gözlenmiştir. S400-2, SX400-2 ve R100-2 test numunelerine ait yük-yer değıştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 7.25.).



Şekil 7.25. R100-2, S400-2 ve SX400-2 kirişlerine ait yük-yer değıştirme grafiği

Yük-yer değıştirme eğrisi kullanılarak sırası ile kesitlerin yer değıştirme sünekleri 1,98 ile 4,35 ve enerji tüketme kapasiteleri ise 6,531kNm ile 20,981kNm olarak hesaplanmıştır.

Çapraz donatı eklenen SX400-2 kirişinin kesme ve yer değıştirme kapasitesi S400-2 kirişine kıyasla sırasıyla yüzde %27,8 ve %122,9 oranlarında önemli bir şekilde artmıştır. Şekil 7.25.'de SX400-2 kirişine ait yük-yer değıştirme grafiğinde görüldüğü gibi çapraz donatıların kirişin kesme kapasitesine olan katkısıyla R100-2 referans

kirişine yaklaşmıştır. Ayrıca SX400-2 kirişinde süneklik ve dayanımda önemli artışlar elde edilmiştir.

#### 7.2.4. S800-2 ve SX800-2

S800-2 ve SX800-2 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.26. ve Şekil 7.27.'de görülmektedir.



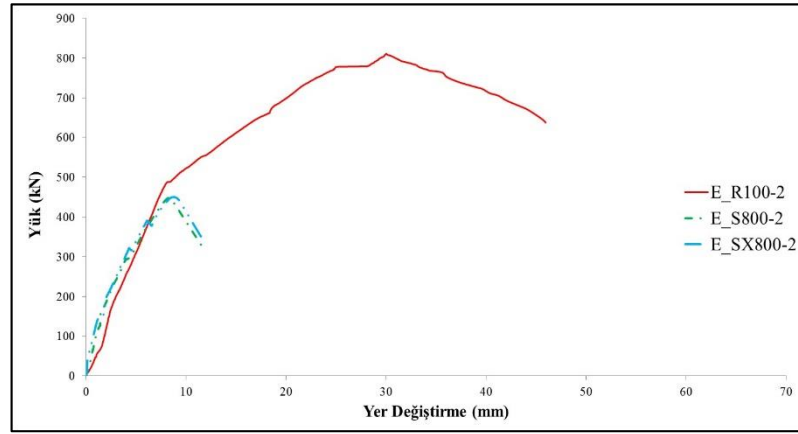
Şekil 7.26. S800-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası



Şekil 7.27. SX800-2 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S800-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak kesme çatlakları olup 120kN yük etkisinde ve 1,2mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. S800-2 kirişi R100-2 refrans kirişi ile kıyaslandığında S800-2 kirişi çok düşük kesme kapasitesine sahip olup gevrek bir davranış sergilemiştir. S800-2 test numunesine uygulanan yük 448kN'a ulaştığında kiriş orta noktası yer değiştirme değeri 8,3mm olarak belirlenmiştir. Orta noktada yer değiştirme değeri 11,5mm olduğunda uygulanan yük 330kN değerine ulaşmış ve kiriş davranışında kesme hakim olmuştur (Şekil 7.28.). Bu esnada kiriş boyunca donatılarında herhangi bir akma meydana gelmemiştir.

SX800-2 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 72kN yük etkisinde ve 0,4mm yer değiştirme değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 450kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,7mm olarak belirlenmiştir. Bu yük değerine kadar kesme bölgesinde kesme çatlakları oluşmuş ancak genişlememiştir. Bu yük değerinden sonra genişleyen kesme çatlaklarının etkisiyle yük kapasitesinde ani düşüş meydana gelerek 336kN ve yer değiştirme 11,9mm değerine ulaşmıştır. Sonuç olarak SX800-2 numunesinde çekme donatısında akma oluşmadan ve eğilme çatlaklarında açılma gözlemlenmeden kesme kırılması meydana gelmiştir. S800-2, SX800-2 ve R100-2 test numunelerine ait yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir (Şekil 7.28.).



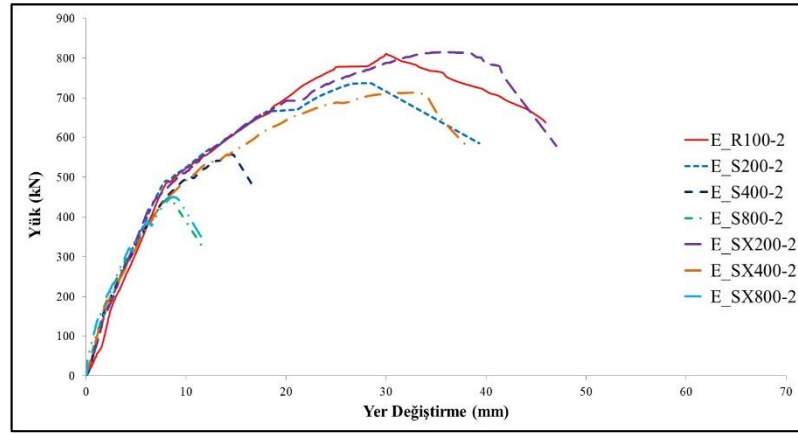
Şekil 7.28. R100-2, S800-2 ve SX800-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

Yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 0,0 ile 0,0 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 3,551kNm ile 3,817kNm olarak hesaplanmıştır.

Çapraz donatı eklenen SX800-2 kirişinin kesme ve yer değiştirme kapasitesi S800-2 kirişine kıyasla sırasıyla yüzde %0,45 ve %3,48 oranlarında çok az bir şekilde artmıştır. Çapraz donatı bulunan SX800-2 kirişi ile çapraz donatı bulunmayan S800-2 kirişi arasında önemli bir fark görülmemiştir (Şekil 7.28).

### 7.2.5. Seri-2 sonuçları

Seri-2 test numunelerine ait deney sonuçları Şekil 7.29. ve Tablo 7.3.'de verilmiştir. Tüm SX simgesine sahip test numuneleri kesme çatlaklarının genişlemesini önleyen çapraz donatılar içermektedir. Ayrıca yapılan deneyler sonucunda numunelerin kesme ve yer değiştirme kapasitelerinde önemli oranda artışlar gözlenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen çapraz donatıların kullanımıyla kesme kritik davranış gösteren test numunelerinin tümü daha sünek davranış göstermiştir. Sünek davranış betonarme bir yapı, sistem veya elemanın taşıma gücünü kaybetmeden kendi içerisinde enerji tüketebilmesidir. Süneklik enerji tüketim kapasitesiyle doğru orantılıdır.



Şekil 7.29. Seri-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

Her ikisi de sabit mesnetli olarak tasarlanan bu seri için yük-yer değiştirme eğrileri dikkate alınarak akma ve nihai durumda elde edilen yük ve yer değiştirme değerleri ile yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır. S800 dışında çapraz donatı kullanılan kirişlerin kullanılmayan kirişlere oranla çok daha fazla yer değiştirme sünekliğine ve enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu gözlenmiştir (Tablo 7.3.).

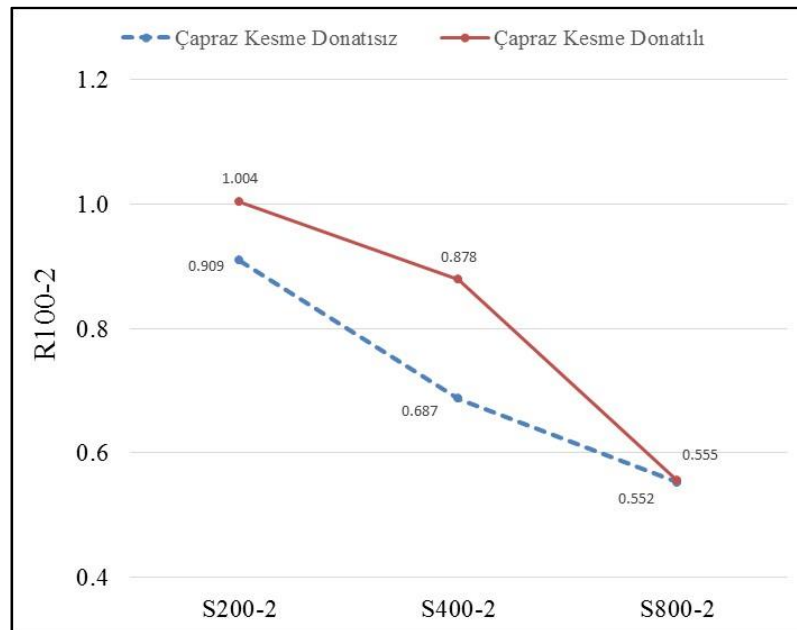


Tablo 7.3. Seri-2 deney sonuçları

Deney Numunesi	Yük P (kN)			Yer Değişirme $\Delta$ (mm)			Yer Değişirme Sünekliği $\delta u / \delta y$	Enerji Tüketimi P- $\Delta$ (kNm)
	Akma	Tepe	Son	Akma $\delta y$	Tepe	Son $\delta u$		
S800-2	-	448	330	-	8,3	11,5	-	3,551
SX800-2	-	450	336	-	8,7	11,9	-	3,817
S400-2	452	557	480	8,4	14,5	16,6	1,98	6,531
SX400-2	457	712	580	8,5	32,7	37,0	4,35	20,981
S200-2	485	737	586	7,7	27,8	39,3	5,10	22,525
SX200-2	464	814	579	7,7	36,4	47,0	6,10	29,594
R100-2	487	811	637	8,6	30,0	45,9	5,34	28,408

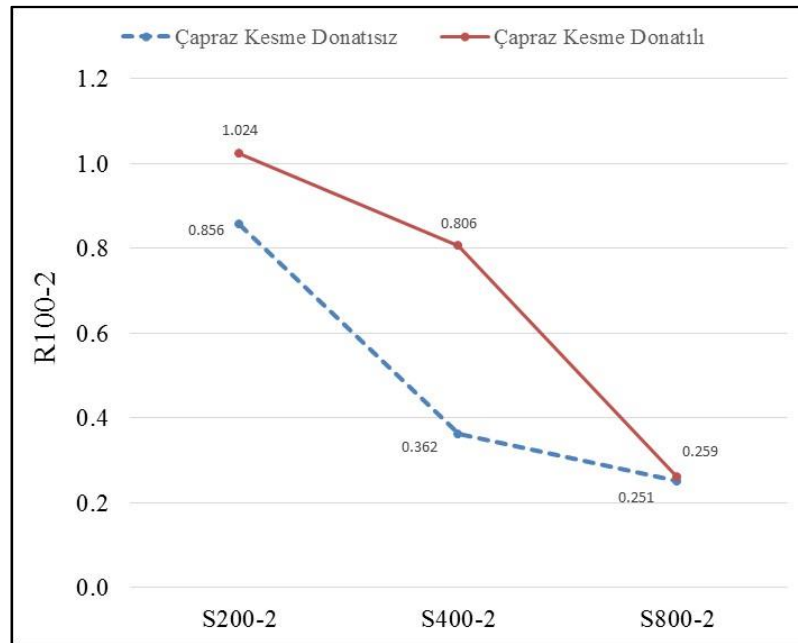
Tablo 7.3.'de S800-2 ve SX800-2 kirişleri için akma noktası yük ve yer değiştirme değerleri belirlenemediği için yer değiştirme sünekliği değerleri verilmemiştir. Diğer deney numunelerinde etriye aralarına yerleştirilen çapraz donatıların sayısının artması ile süneklik oranları da artmıştır. SX200-2 numunesinin yer değiştirme sünekliği değeri TDY2007 tarafından önerilen R100-2 referans numunesinin yer değiştirme sünekliği değerinden daha yüksek çıkmıştır (Şekil 7.29.).

Seri-2 deney numunelerinin R100-2'ye oranla maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri Şekil 7.30. ve Şekil 7.31.'de sunulmuştur.



Şekil 7.30. Seri-2 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yük oranları

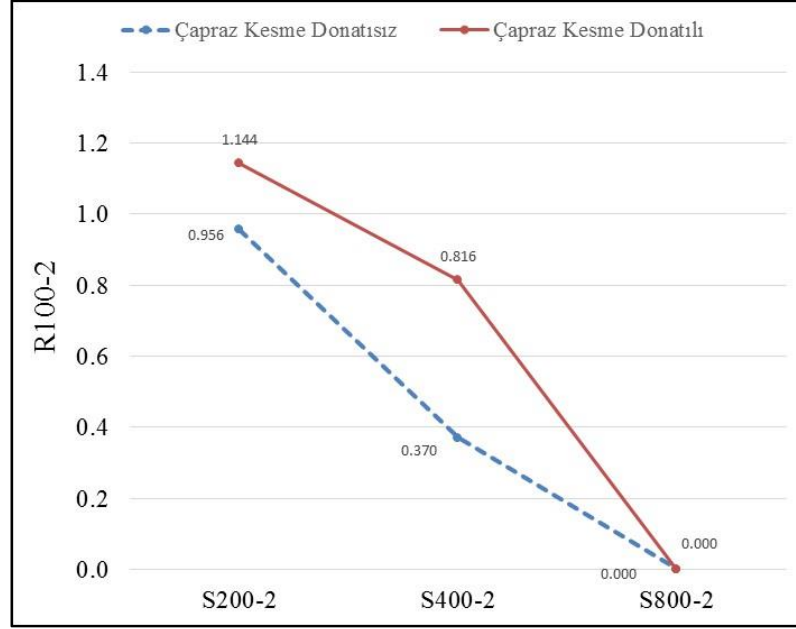
Şekil 7.30.'a göre S200-2, SX200-2, S400-2, SX400-2, S800-2 ve SX800-2 kirişleri R100-2 kirişi ile maksimum yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,909, 1,004, 0,687, 0,878, 0,552 ve 0,555 kat yük taşıma kapasitelerine sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 7.30.'dan da görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerinde ciddi oranlarda iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.



Şekil 7.31. Seri-2 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yer değiştirme oranları

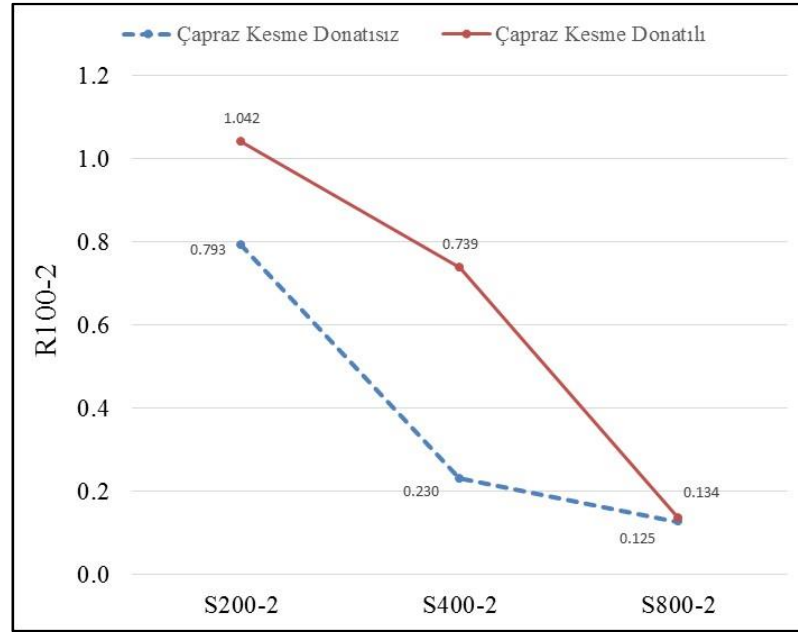
Şekil 7.31.'e göre S200-2, SX200-2, S400-2, SX400-2, S800-2 ve SX800-2 kirişleri R100-2 kirişi ile maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,856, 1,024, 0,362, 0,806, 0,251 ve 0,259 kat yer değiştirme kapasitelerine sahiptir. Bu oranların çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 7.31.'den de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin maksimum yer değiştirme oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

Seri-2 deney numunelerinin R100-2'ye oranla yer değiştirme sünekliği ve enerji tktm değerleri Şekil 7.32. ve Şekil 7.33.'de sunulmuştur.



Şekil 7.32. Seri-2 deney numuneleri R100-2'ye göre yer değiştirme sünekliği oranları

Şekil 7.32.'ye göre S200-2, SX200-2, S400-2, SX400-2, S800-2 ve SX800-2 kirişleri R100-2 kirişi ile yer değiştirme sünekliği oranları açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,956, 1,144, 0,370, 0,816, 0,00 ve 0,00 kat yer değiştirme sünekliğine sahiptir. Bu oranlar S800-2 ve SX800-2 kirişlerinde 0,00 bu kirişler dışındaki çapraz donatılı kirişlerde çapraz donatısız kirişlere oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 7.32.'den de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin yer değiştirme sünekliği oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle apraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

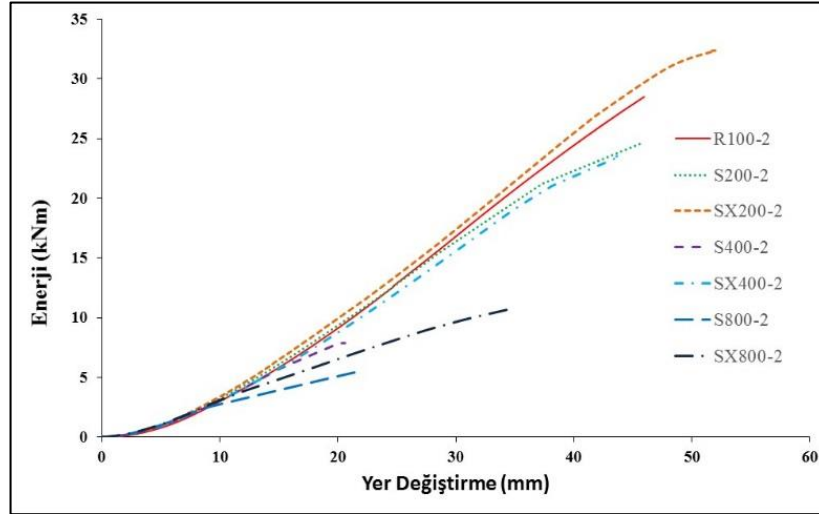


Şekil 7.33. Seri-2 deney numuneleri R100-2'ye göre enerji tüketim oranları

Şekil 7.33.'e göre S200-2, SX200-2, S400-2, SX400-2, S800-2 ve SX800-2 kirişleri R100-2 kirişi ile enerji tüketim oranları açısından karşılaştırıldığında, sırasıyla 0,793, 1,042, 0,230, 0,739, 0,125 ve 0,134 kat enerji tüketimine sahiptir. Şekil 7.33.'den de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin enerji tüketim oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

Tablo 7.3.'de Seri-2 deney numunelerine ait enerji tüketim değerleri verilmiştir. Deney numunesinin enerji yutma kapasitesi yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile bulunmuştur. Hesaplanan alanın büyüklüğü, test numunesinin enerji tüketme kapasitesi ile doğru orantılıdır [3]. Yapılan deneylerden elde edilen bilgiler doğrultusunda çapraz donatılar deney numunesinin enerji yutma kapasitesini artırmakta oldukça başarılı olmuştur. SX800-2 numunesi S800-2 numunesine kıyasla yaklaşık 1,1 kat, SX400-2 numunesi S400-2 numunesine kıyasla yaklaşık 3,2 kat daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir. Bu artış SX200-2 numunesinde S200-2 numunesine oranla yaklaşık 1,3 kat olmuştur. SX200-2 numunesi ile TDY2007 tarafından önerilen R100-2 (referans) numunesi oldukça yakın enerji yutma kapasitesine sahiptir (Şekil 7.33.).

Şekil 7.34.'de yer değiştirmeye bağlı olarak meydana gelen enerji tüketim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.34. Seri-2 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme

Şekil 7.34.'e göre S200-2, SX200-2, S400-2, SX400-2, S800-2, SX800-2 ve R100-2 kirişlerine ait enerji tüketim değerleri sırasıyla 22,525, 29,594, 6,531, 20,981, 3,551, 3,817 ve 28,408kNm olarak belirlenmiştir.

Seri-2 deney sonuçları için her bir numunenin kendi içerisinde ve referans numuneye göre yük ve yer değiştirme açısından yüzde olarak karşılaştırılması Tablo 7.4.'de verilmiştir.

Tablo 7.4. Seri-2 deney sonuçları yük-yer değiştirme yüzdelerinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	S800-2	SX800-2	S400-2	SX400-2	S200-2	SX200-2	R100-2
	Yerdeğiştirme Kapasitesi (%)						
S800-2	-	3,48	44,35	221,74	241,74	308,70	299,13
SX800-2	0,45	-	39,50	210,92	230,25	294,96	285,71
S400-2	24,33	23,78	-	122,89	136,75	183,13	176,51
SX400-2	58,93	58,22	27,83	-	6,22	27,03	24,05
S200-2	64,51	63,78	32,32	3,51	-	19,59	16,79
SX200-2	81,70	80,89	46,14	14,33	10,45	-	-2,34
R100-2	81,03	80,22	45,60	13,90	10,04	-0,37	-

Burada alt üçgen maksimum yük, üst üçgen ise maksimum yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Örneğin SX400-2 kirişi maksimum yük taşıma kapasitesi açısından S400-2 ile karşılaştırıldığında %27,83 oranında daha fazla yük taşımaktadır. Benzer şekilde SX400-2 kirişi maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından S400-2 ile karşılaştırıldığında %122,89 oranında daha fazla yer değiştirme kapasitesine sahiptir.

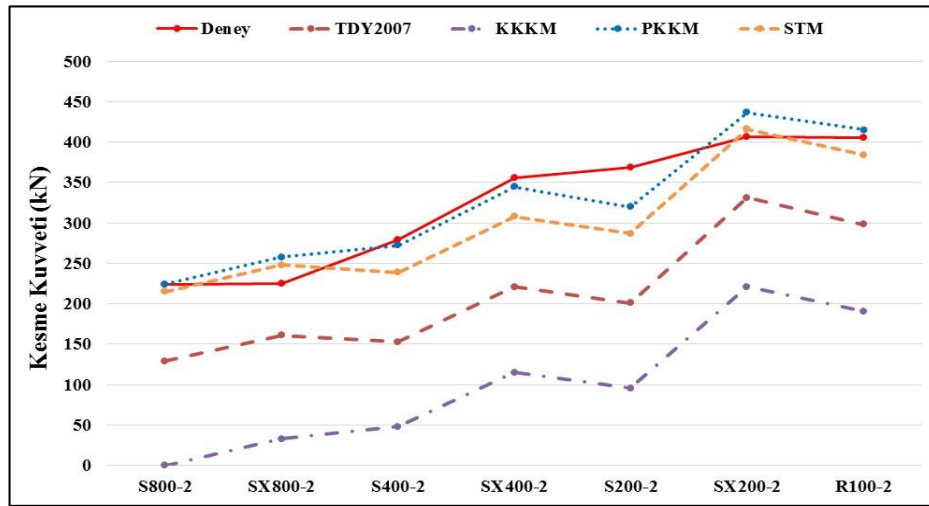
Seri-2 deney sonuçlarından elde edilen kesme kuvveti değerleri, Bölüm 2’de anlatılan klasik kafes kiriş model, plastik kafes kiriş model, strut and tie model ve TDY2007 ile hesaplanan kesme kuvveti değerleri ile Tablo 7.5.’de karşılaştırılmıştır. Klasik kafes kiriş modelde beton basınç çubuğunun eğimi  $45^\circ$  alınırken kesme donatısı üzerindeki gerilme değerleri okunarak hesaplar yapılmıştır. Plastik kafes kiriş modelde ise beton basınç çubuğunun eğimi deney sonucu oluşan çatlağın eğimi dikkate alınırken kesme donatısı üzerindeki gerilme kesme donatısı akma değeri kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Önceki yıllarda yapılan deneyler ve bu deneylere ait hesaplamalar sonucunda klasik kafes kiriş modele göre hesaplanan değerlerin deney sonuçlarından daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar, klasik kafes kiriş modele göre belirlenen kesme donatısının yaklaşık %50’sinin bile güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu nedenle klasik kafes kiriş model kullanılarak yapılan hesaplar bazı durumlarda gerçekçi sonuçlar vermemektedir [134].

Tablo 7.5. Seri-2 deney ve hesap sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri

Deney Numunesi	Deney V-kN	TDY2007 V-kN	KKKM V-kN	PKKM V-kN	STM V-kN
S800-2	224,0	129,0	0,0	224,4	215,0
SX800-2	225,0	161,0	32,6	257,8	248,0
S400-2	278,5	153,0	47,7	272,1	239,0
SX400-2	356,0	221,0	115,1	344,9	308,0
S200-2	368,5	201,0	95,5	319,9	287,0
SX200-2	407,0	331,0	221,1	436,7	416,0
R100-2	405,0	298,0	190,9	415,3	384,0

Seri-2 deney numuneleri için deneyler sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri, TDY2007, klasik kafes kiriş model, plastik kafes kiriş model ve strut and tie model hesap yöntemleri kullanılarak hesaplanan kesme kuvveti değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7.35.’de verilmiştir. Deprem yönetmelikleri genel olarak güvenli tarafta

kalan çözümler önermektedir. Şekil 7.35.'den de görüldüğü gibi TDY2007 sonuçlarının da güvenli tarafta kalması beklenen bir sonuçtur. Deney sonuçlarına en iyi uyum gösteren hesap yöntemlerinin plastik kafes kiriş modeli ile strut and tie model olduğu görülmektedir. Klasik kafes kiriş modeline ait sonuçların çok daha düşük çıkmasının nedeni ise hesaplarda beton ve boyuna donatıların katkısının dikkate alınmamasıdır.



Şekil 7.35. Seri-2 kesme kuvveti deney ve hesap sonuçları

### 7.3. Seri-3

Seri-2'nin devamı olan bu seride toplam 5 adet betonarme kısa kiriş hazırlanmış ve dört nokta yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Numune isimlerinin sonunda bulunan 3 rakamı Seri-3'ü temsil etmektedir. Enine donatı aralıkları 100 ve 200mm olarak seçilirken çapraz donatı adım mesafesi 200, 400 ve 800mm olarak belirlenmiştir. Çapraz kesme donatı açıları sırasıyla 65,30°, 47,30° ve 28,50° değerlerine karşılık gelmektedir. Çapraz donatılı her bir numune, TDY2007 tarafından önerilen sınırlar içerisinde bulunun R100-2 referans numunesi ve diğer çapraz donatılı numuneler ile karşılaştırılarak deneysel çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. Boyut ve donatı detaylandırması aynı olmasına rağmen Seri-3 deney numunelerinin Seri-1 deney numunelerinden farkı mesnetlenme şeklidir. Çalışmanın bu kısmında, Seri-3'de betonarme kısa kirişlerin her iki mesneti de sabit olarak tasarlanmıştır.

### 7.3.1. S200X400-3 ve S200X800-3

S200X400-3 ve S200X800-3 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.36. ve Şekil 7.37.'de görülmektedir.



Şekil 7.36. S200X400-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası



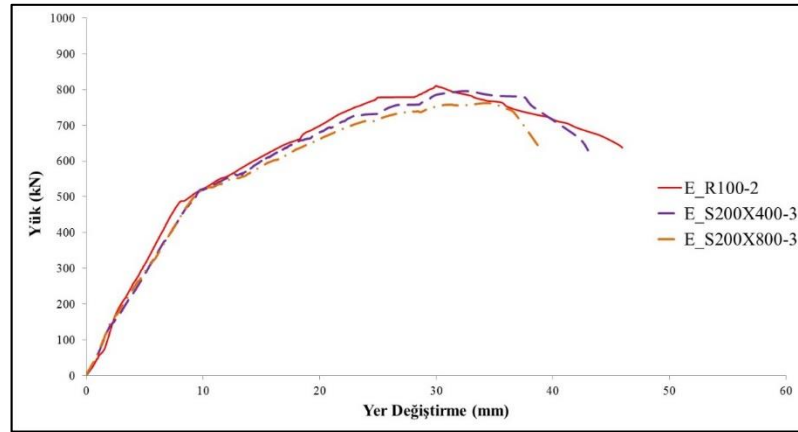
Şekil 7.37. S200X800-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S200X400-3 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 144kN yük etkisinde ve 2,2mm değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 517kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 9,7mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 796kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 32,5mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna donatısı akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Daha sonra eğilme ve kesme çatlaklarının oluşmasıyla birlikte uygulanan yük 630kN değerine düşmüştür. Bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 43,0mm'ye ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren eğilme ve kesme çatlakları daha da genişlemiştir.



Sonuç olarak kiriş kesmeli eğilme davranışı göstererek kırılma konumuna ulaşmıştır (Şekil 7.38.).

S200X800-3 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 138kN yük etkisinde ve 1,9mm değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 515kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 9,6mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 762kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 34,5mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna donatısı az miktarda olsa akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Daha sonra eğilme ve kesme çatlaklarının oluşmasıyla birlikte uygulanan yük 630kN değerine düşmüştür. Bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 39,0mm'ye ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren eğilme ve özellikle kesme çatlakları daha da genişlemiştir. Sonuç olarak kiriş kesmeli eğilme davranışı göstererek kırılma konumuna ulaşmıştır. S200X400-3, S200X800-3 ve R100-2 test numunelerine ait yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 7.38.'de verilmiştir.



Şekil 7.38. R100-2, S200X400-3 ve S200X800-3 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

Yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak, sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 4,43 ile 4,06 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 25,970kNm ile 22,508kNm olarak hesaplanmıştır.

Etriye adım mesafesi 200mm olarak seçilen 400 ve 800mm çapraz donatı yerleştirilen S200X400-3 ve S200X800-3 kirişleri R100-2 referans kirişi ile karşılaştırıldığında aralarında fark olmakla birlikte her üçü de birbirine yakın dayanım değerlerine ulaşmıştır. Beklendiği üzere çapraz donatı adım mesafesi 400mm olan kiriş, 800mm olan kirişe kıyasla daha sünek davranış göstermiştir (Şekil 7.38.).

### 7.3.2. S100X200-3, S100X400-3 ve S100X800-3

Yapılan deneyler sonucunda tüm karşılaştırmaların yapıldığı TDY2007 şartlarını sağlayan R100-2 referans kirişinin her iki mesneti de sabit olan sistemde kesme kırılması davranışı göstermiştir. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında R100-2 referans kirişinin davranışını daha sünek hale getirmek amacıyla aynı özelliklere sahip ve çapraz donatıları bulunan üç adet betonarme kısa kiriş hazırlanmıştır. Hazırlanan bu betonarme kirişler 100mm etriye adım mesafesi ve 200, 400 ve 800mm çapraz donatı adım mesafesine sahiptir.

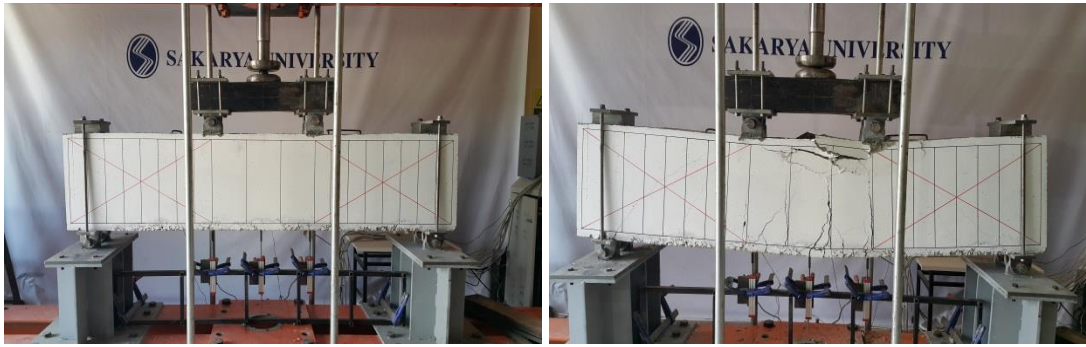
S100X200-3, S100X400-3 ve S100X800-3 kirişlerine ait deney öncesi hasarsız ve deney sonrası limit yüke ulaşmış durumlar Şekil 7.39, Şekil 7.40. ve Şekil 7.41.'de görülmektedir.



Şekil 7.39. S100X200-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası



Şekil 7.40. S100X400-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası



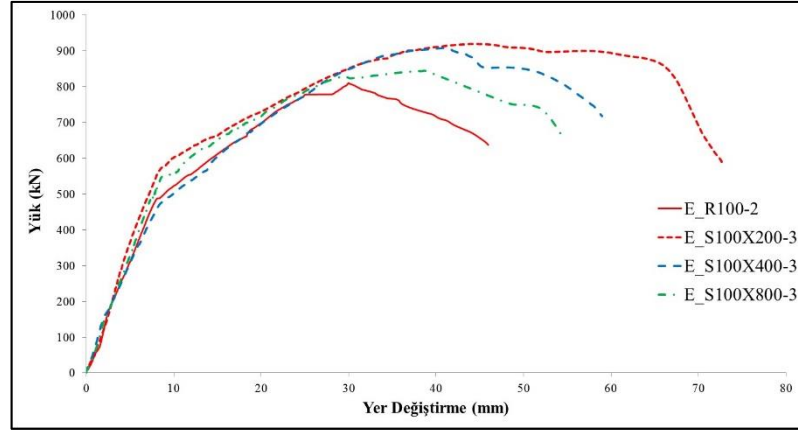
Şekil 7.41. S100X800-3 kirişi deney öncesi ve deney sonrası

S100X200-3 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 186kN yük etkisinde ve 2,8mm değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 575kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,7mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 920kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 44,1mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna donatısı akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Daha sonra eğilme ve kesme çatlaklarının oluşmasıyla birlikte uygulanan yük 587kN değerine düşmüştür. Bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 72,7mm'ye ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren eğilme ve kesme çatlakları daha da genişlemiştir. Sonuç olarak kiriş kesme hakim bir şekilde kesmeli eğilme davranışı göstererek kırılma konumuna ulaşmıştır (Şekil 7.42.).

S100X400-3 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlakları olup 157kN yük etkisinde ve 2,1mm değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri

504kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,9mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 908kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 41,2mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna donatısı akmaya devam etmiş ve eğilme ve kesme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Daha sonra eğilme ve kesme atkalarının oluşmasıyla birlikte uygulanan yük 718kN değerine düşmüştür. Bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 59,0mm'ye ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren eğilme ve özellikle kesme çatlakları daha da genişlemiştir. Sonuç olarak kiriş kesme hakim bir şekilde kesmeli eğilme davranışı göstererek kırılma konumuna ulaşmıştır (şekil 7.42.).

S100X800-3 kirişi için yapılan deney esnasında oluşan ilk çatlak eğilme çatlağı olup 138kN yük etkisinde ve 1,97mm değerinde gerçekleşmiştir. Uygulanan yük değeri 519kN ve orta nokta yer değiştirme değeri 8,9mm olduğunda kiriş boyuna donatılarında akma başlamıştır. Bu noktadan sonra eğilme çatlaklarının miktarı ve genişliği artarak devam etmiştir. Uygulanan maksimum yük değeri 843kN ve bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 37,1mm olarak belirlenmiştir. Bu esnada çapraz donatıların pozitif katkısı sayesinde kiriş boyuna donatısı akmaya devam etmiş ve eğilme çatlaklarında ilerleme gözlenmiştir. Daha sonra eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve kesme çatlaklarının oluşmasıyla birlikte uygulanan yük 650kN değerine düşmüştür. Bu yük değerine karşılık gelen orta nokta yer değiştirme değeri 54,7mm'ye ulaşmıştır. Bu noktadan itibaren özellikle eğilme ve az miktarda kesme çatlakları genişlemiştir. Sonuç olarak kiriş basınç bölgesinde beton ezilmesiyle ve eğilme çatlaklarının açılmasıyla birlikte eğilme davranışı göstererek kırılma konumuna ulaşmıştır. Etriye adım mesafesi 100mm olarak seçilen, 200, 400 ve 800mm çapraz donatı yerleştirilen S100X200-3, S100X400-3 ve S100X800-3 kirişleri R100-2 referans kirişine ait yük-yer değiştirme eğrisi şekil 7.42.'de verilmiştir.

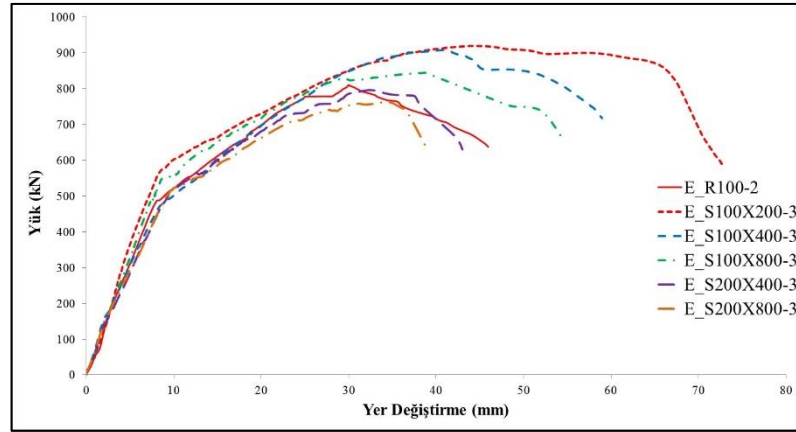


Şekil 7.42. R100-2, S100X200-3, S100X400-3 ve S100X800-3 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

Çapraz donatı yerleştirilen tüm kirişler referans kirişe kıyasla daha yüksek dayanım ve sünekliğe sahip olmuşlardır. Kesme açıklığına sadece bir adet çapraz donatı yerleştirilen S100X800-3 kirişi referans kirişe kıyaslandığında çapraz donatıların çok büyük katkısı olmadığı söylenebilir. Ancak kesme açıklığına iki ve dört adet yerleştirilen S100X400-3 ve S100X200-3 kirişlerinden referans kirişe kıyasla oldukça yüksek dayanım ve süneklik elde edilmiştir. S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3 ve R100-2 test numunelerine ait yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 7.42.'de verilmiştir. Yük-yer değiştirme eğrisi kullanılarak, sırası ile kesitlerin yer değiştirme sünekliği değerleri 8,36, 6,64 ile 6,15 ve enerji tüketebilme kapasiteleri ise 55,178kNm, 41,481kNm ve 35,255kNm olarak hesaplanmıştır.

### 7.3.3. Seri-3 sonuçları

Seri-3 test numunelerinin tamamında çapraz kesme donatısı kullanılmış ve test edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda numunelerin kesme ve yer değiştirme kapasitelerinde önemli oranda artışlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu kirişlere ait deney sonuçları Şekil 7.43. ve Tablo 7.6.'da verilmiştir.



Şekil 7.43. Seri-3 ve R100-2 kirişlerine ait yük-yer değiştirme grafiği

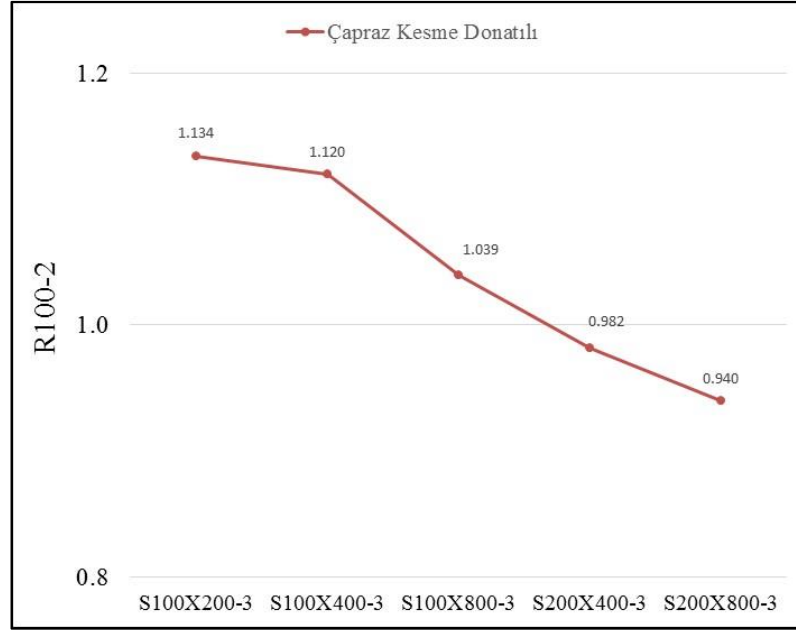
Tablo 7.6. Seri-3 deney sonuçları

Deney Numunesi	Yük P (kN)			Yer Değiştirme $\Delta$ (mm)			Yer Değiştirme Sünekliği $\delta u / \delta y$	Enerji Tüketimi P- $\Delta$ (kNm)
	Akma	Tepe	Son	Akma $\delta y$	Tepe	Son $\delta u$		
S200X800-3	515	762	630	9,6	34,5	39,0	4,06	22,508
S200X400-3	517	796	630	9,7	32,5	43,0	4,43	25,970
S100X800-3	519	843	650	8,9	37,1	54,7	6,15	35,255
S100X400-3	504	908	718	8,9	41,2	59,0	6,63	41,481
S100X200-3	575	920	587	8,7	44,1	72,7	8,36	55,178
R100-2	487	811	637	8,6	30,0	45,9	5,34	28,408

Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi çapraz kesme donatılarının kullanımı ile çatlak genişliklerinin artması engellenmiş ve kesme kritik davranış gösteren test numunelerinin tümü daha sünek davranış göstermiştir.

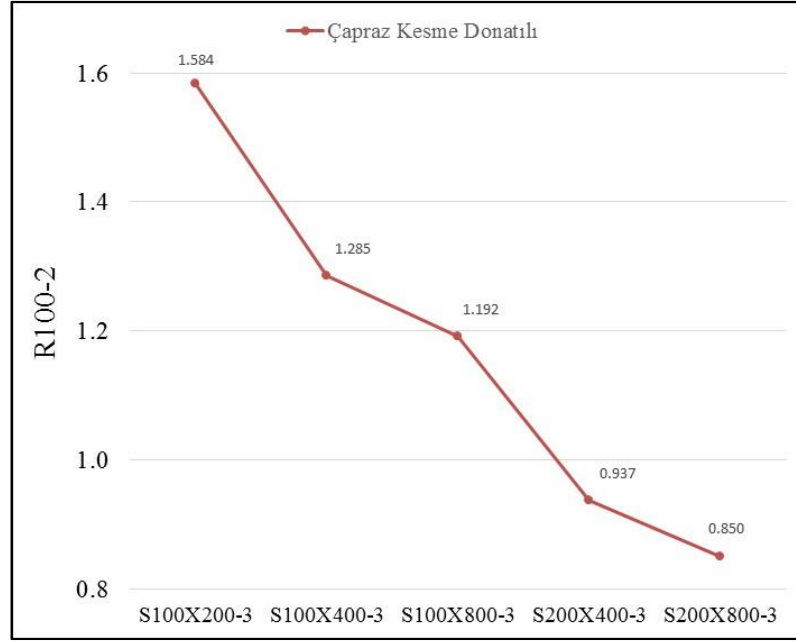
Seri-3 deney numuneleri için yük-yer değiştirme eğrileri dikkate alınarak akma ve nihai durumda elde edilen yük ve yer değiştirme değerleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim değerleri hesaplanmıştır (Tablo 7.6.). Bu tablodan da görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının adım mesafesinin azalması ile kirişlerin yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim kapasitesi artmaktadır.

Seri-3 deney numunelerinin R100-2'ye oranla maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri Şekil 7.44. ve Şekil 7.45.'de sunulmuştur.



Şekil 7.44. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yük oranları

S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3, S200X400-3, S200X800-3 kirişleri R100-2 kirişi ile maksimum yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında sırasıyla 1,134, 1,120, 1,039, 0,982 ve 0,940 kat yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.44.'ten de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitelerinde ciddi oranlarda iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

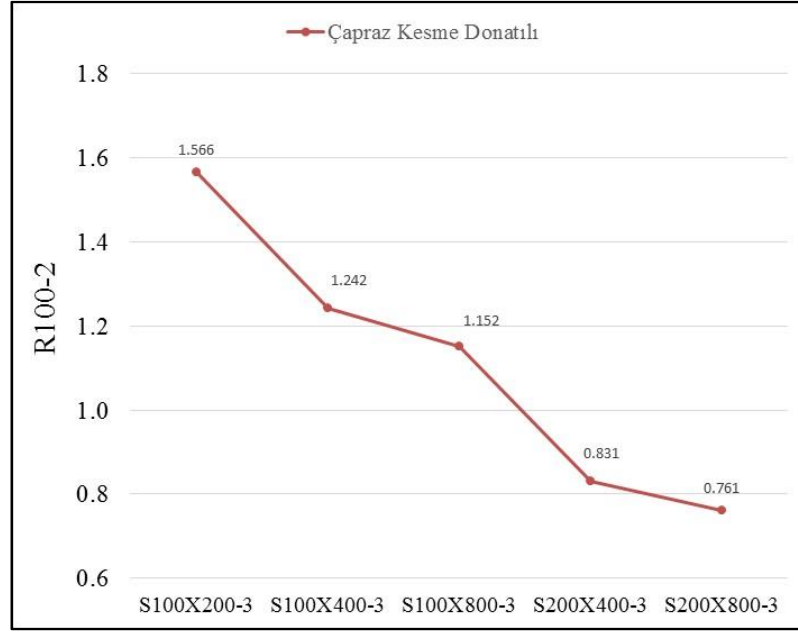


Şekil 7.45. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre maksimum yer değiştirme oranları

S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3, S200X400-3, S200X800-3 kirişleri R100-2 kirişi ile maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında sırasıyla 1,584, 1,285, 1,192, 0,937 ve 0,850 kat yer değiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.45.'ten de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin maksimum yer değiştirme oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

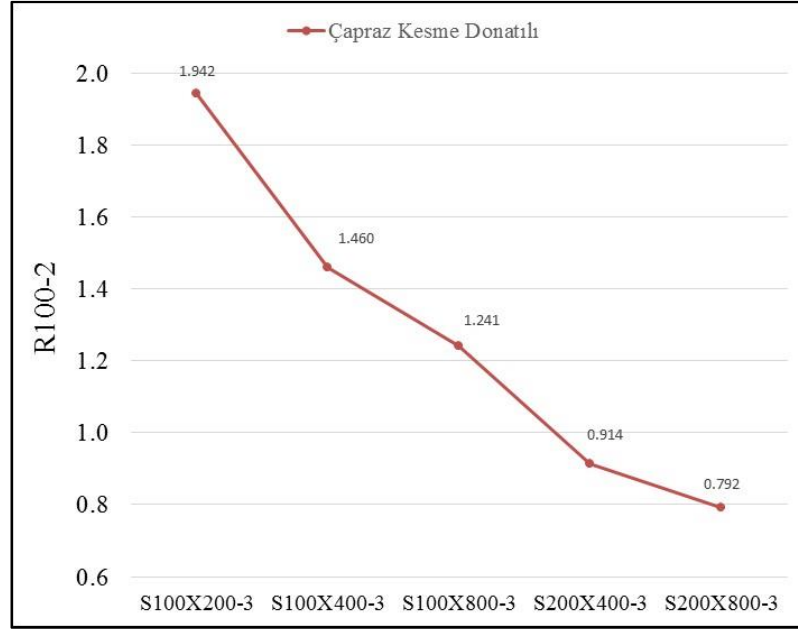
Seri-3 deney numunelerinin R100-2'ye oranla yer değiştirme sünekliği ve enerji tüketim değerleri Şekil 7.46. ve Şekil 7.47.'de sunulmuştur.





Şekil 7.46. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre yer değiştirme sünekliği oranları

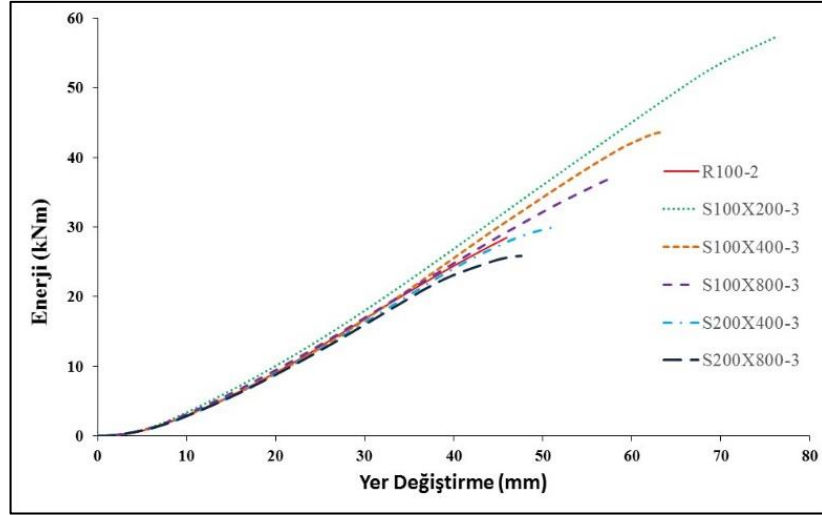
S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3, S200X400-3, S200X800-3 kirişleri R100-2 kirişi ile yer değiştirme sünekliği oranları açısından karşılaştırıldığında sırasıyla 1,566, 1,242, 1,152, 0,831 ve 0,761 kat yer değiştirme sünekliğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.46.'dan da görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin yer değiştirme sünekliği oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.



Şekil 7.47. Seri-3 deney numuneleri R100-2'ye göre enerji tüketim oranları

S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3, S200X400-3, S200X800-3 kirişleri R100-2 kirişi ile enerji tüketim oranları açısından karşılaştırıldığında sırasıyla 1,942, 1,460, 1,241, 0,914 ve 0,792 kat enerji tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 7.47.'den de görüldüğü gibi çapraz kesme donatısının kullanımı ile betonarme kirişlerin enerji tüketim oranlarında ciddi iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle çapraz kesme donatılarının adım mesafelerinin azalması ile bu iyileşme belirginleşmektedir.

Şekil 7.48.'de yer değiştirmeye bağlı olarak meydana gelen enerji tüketim grafikleri sunulmuştur.



Şekil 7.48. Seri-3 deney numuneleri enerji tüketimi-yer değiştirme

Şekil 7.48.'e göre S100X200-3, S100X400-3, S100X800-3, S200X400-3, S200X800-3 ve R100-2 kirişlerine ait enerji tüketim değerleri sırasıyla 55,178, 41,481, 35,255, 25,970, 22,508 ve 28,408kNm olarak belirlenmiştir. Seri-3 test numunelerinin deney sonuçlarından elde edilen veriler doğrultusunda diyagonal kesme çatlaklarına dik olarak yerleştirilen çapraz donatıların yük etkisi altında davranışları oldukça önemlidir. Seri-3 deney sonuçları için her bir numunenin kendi içerisinde ve referans numuneye göre yük ve yer değiştirme açısından yüzde olarak karşılaştırılması Tablo 7.7.'de verilmiştir.

Tablo 7.7. Seri-3 deney sonuçları yük-yer değiştirme yüzdelerinin karşılaştırılması

Deney Numunesi	S200X 800-3	S200X 400-3	S100X 800-3	S100X 400-3	S100X 200-3	R100-2
	Yerdeğiştirme kapasitesi (%)					
S200X 800-3	-	10,26	40,26	51,28	86,41	17,69
S200X 400-3	4,46	-	27,21	37,21	69,07	6,74
S100X 800-3	10,63	0,38	-	7,86	32,91	-16,09
S100X 400-3	19,16	14,07	7,71	-	23,22	-22,20
S100X 200-3	20,73	15,58	9,13	1,32	-	-36,86
R100-2	6,43	1,88	-3,80	-10,68	-11,85	-

Burada alt üçgen maksimum yük, üst üçgen ise maksimum yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Örneğin S200X400-3 kirişi maksimum yük taşıma kapasitesi açısından S200X800-3 ile karşılaştırıldığında %4,46 oranında daha fazla yük taşımaktadır. Benzer şekilde S200X400-3 kirişi maksimum yer değiştirme kapasitesi açısından S200X800-3 ile karşılaştırıldığında %10,26 oranında daha fazla yer değiştirme kapasitesine sahiptir.

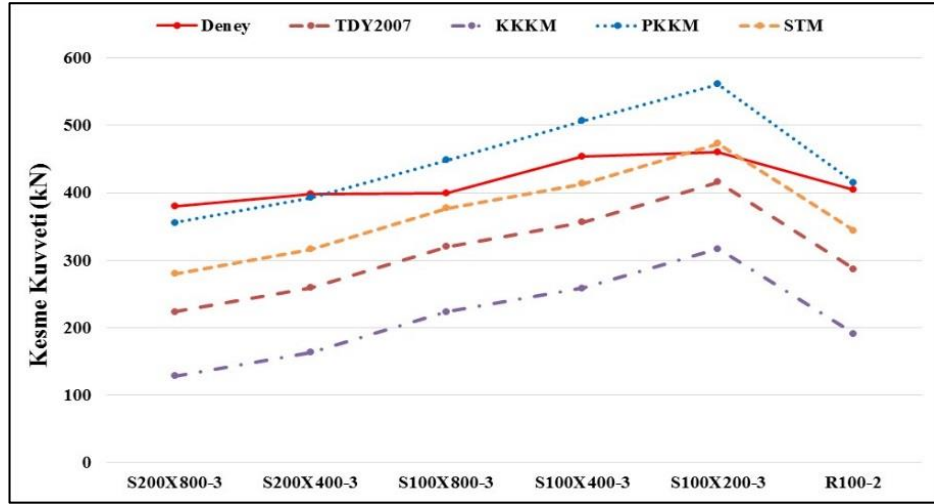
Seri-3 deney sonuçlarından elde edilen kesme kuvveti değerleri, Bölüm 4’de anlatılan klasik kafes kiriş model, plastik kafes kiriş model, strut and tie model ve TDY2007 ile hesaplanan kesme kuvveti değerleri ile Tablo 7.8.’de karşılaştırılmıştır. Klasik kafes kiriş modelde beton basınç çubuğunun eğimi  $45^\circ$  alınırken kesme donatısı üzerindeki gerilme değerleri okunarak hesaplar yapılmıştır. Plastik kafes kiriş modelde ise beton basınç çubuğunun eğimi deney sonucu oluşan çatlağın eğimi dikkate alınırken kesme donatısı üzerindeki gerilme kesme donatısı akma değeri kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Önceki yıllarda yapılan deneyler ve bu deneylere ait hesaplamalar sonucunda klasik kafes kiriş modele göre hesaplanan değerlerin deney sonuçlarından daha düşük çıktığı belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu hesaplanan kesme donatısının yaklaşık %50’sinin bile güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu nedenle klasik kafes kiriş modeli kullanılarak yapılan hesaplar bazı durumlarda gerçekçi sonuçlar vermemektedir [134].

Tablo 7.8. Seri-3 deney ve hesap sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri

Deney Numunesi	Deney V-kN	TDY2007 V-kN	KKKM V-kN	PKKM V-kN	STM V-kN
S200X800-3	381,0	223,0	128,0	355,8	280,0
S200X400-3	398,0	259,0	162,8	392,6	316,0
S100X800-3	399,5	320,0	223,5	448,3	377,0
S100X400-3	454,0	356,0	258,2	506,6	413,0
S100X200-3	460,0	416,0	316,5	561,5	473,0
R100-2	405,5	298,0	190,5	415,3	344,0

Seri-3 deney numuneleri için deneyler sonucu bulunan kesme kuvveti değerleri TDY2007, klasik kafes kiriş model, plastik kafes kiriş model ve strut and tie model hesap yöntemleri kullanılarak hesaplanan kesme kuvveti değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 7.49.’da verilmiştir. Deprem yönetmelikleri genel olarak güvenli tarafta

kalan çözümle önermektedir. Şekil 7.49'dan da görüldüğü gibi TDY2007 sonuçlarının da güvenli tarafta kalması beklenen bir sonuçtur. Deney sonuçlarına en iyi uyum gösteren hesap yöntemlerinin plastik kafes kiriş modeli ile strut and tie model olduğu görülmektedir. Klasik kafes kiriş modeline ait sonuçların çok daha düşük çıkmasının nedeni ise hesaplarda beton ve boyuna donatıların katkısının dikkate alınmamasıdır.



Şekil 7.49. Seri-3 kesme kuvveti deney ve hesap sonuçları

## **BÖLÜM 8. PARAMETRİK ÇALIŞMA VE SONUÇLARI**

Bu bölümde, önerilen çapraz kesme donatısı uygulamasının etkinliğini daha belirgin olarak belirleyebilmek için sonlu elemanlar yardımıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, deneysel çalışmalarda göz önüne alınamayan etriye, çapraz kesme donatısı ve eğilme donatısı çapı ve akma dayanımı dikkate alınarak 76 farklı betonarme kısa kirişin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Ayrıca, parametrik çalışmada kullanılacak olan sonlu eleman modelinin doğrulanması ise bu tez kapsamında test edilen 19 betonarme kısa kiriş deney sonuçları ile gerçekleştirilmiştir.

### **8.1. Sonlu Eleman Modeli**

Bu bölümde nümerik çalışmada kullanılan sonlu eleman modellerinin malzeme davranış özellikleri, geometrik özellikleri, sınır şartları ve çözüm stratejisi hakkında bilgiler verilmiştir.

#### **8.1.1. Beton basınç davranış modeli**

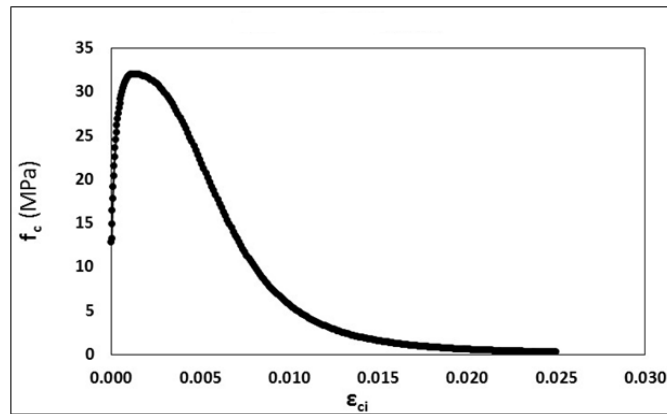
Bu çalışmada betonun doğrusal olmayan davranışı, beton hasar plastisite (BHP) yöntemi kullanılarak tanımlanmıştır. Bu yöntem beton ve gevrek (quasi-brittle) davranış gösteren bütün malzeme modellerinin tanımlanmasına imkân vermektedir. Ayrıca bu model çekme ve basınç plastik şekil değiştirmeleri nedeniyle elastisite modülünde meydana gelen azalmayı da dikkate almaktadır [184]. Beton hasar plastisite modelinin tanımlanabilmesi için ABAQUS yazılımında kullanılan ve bu tez çalışması kapsamında nümerik analizlerde belirlenecek olan parametreler Tablo 8.1.'de verilmiştir.

Tablo 8.1. Beton malzeme modeli için ABAQUS’de kullanılan bazı parametreler

Parametre	Açıklama
$\psi$	Dilasyon/Genleşme açısı
$\epsilon$	Eksantirisite
$F_{b0}/f_{c0}$	Eş iki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç akma gerilmesine oranı
$K_c$	Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı
$\mu$	Vizkozite parametresi

BHP yönteminde betonun eksenel basınç davranışı için maksimum gerilme öncesi ve sonrası (pre and post peak stress) davranışı dikkate alınmıştır. Maksimum gerilme öncesi davranış için CEB-FIB 2010 sargısız beton modeli tanımlanmıştır [170]. Maksimum gerilme sonrası davranışını belirlemek için ise Vonk ve Van Mier tarafından önerilen beton modeli kullanılmıştır [185, 186]. Bu beton modeli çözüm ağı boyut etkisini de dikkate alması nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Çözüm ağı boyut etkisi, kesme davranışının kritik olduğu elemanlarda sonuçları etkilemesi nedeniyle oldukça önemli bir parametredir [184].

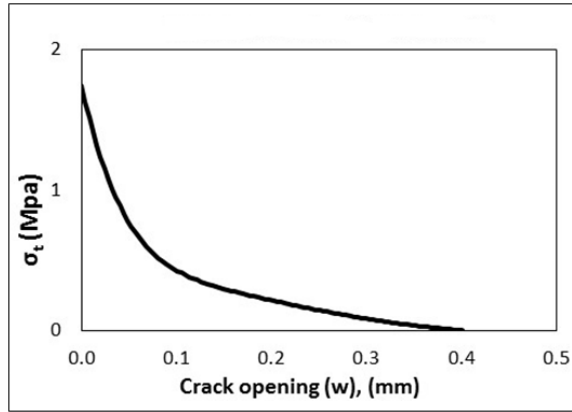
ABAQUS’de beton hasar plastisite yönteminde beton basınç davranışının belirlenebilmesi için gerilme-inelastik şekil değiştirme ilişkisinin tanımlanması gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında kullanılan betonun eksenel basınç etkisi altında gerilme-inelastik şekil değiştirme ( $\sigma_c - \epsilon_{ci}$ ) davranışını gösteren ilişki Şekil 8.1.’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Betonun eksenel basınç etkisi altında gerilme-inelastik şekil değiştirme davranışı

### 8.1.2. Beton çekme davranış modeli

Bu çalışmada betonarme kısa kirişlerin gerçek davranışını daha iyi modelleyebilmek için betonun maksimum çekme gerilmesi sonrasındaki davranışı da dikkate alınmıştır. Betonun çatlak sonrası çekme yumuşaması davranışını temsil eden doğrusal olmayan (exponential-üstel fonksiyon) çekme yumuşama modeline ait gerilme-çatlak genişliği ( $\sigma_{ct-w}$ ) modeli kullanılmıştır (Şekil 8.2.) [170].



Şekil 8.2. Çatlak sonrası betonun gerilme-çatlak genişliği ( $\sigma_{ct-w}$ ) davranışı

Doğrusal olmayan (exponential-üstel fonksiyon) model için aşağıdaki eşitlikler (Denklem 6.10 ve 6.11) dikkate alınmaktadır. Kırılma enerjisi ( $G_f$ ), çatlak genişliğine bağlı çekme gerilmesi parametresi kullanılarak tanımlanmıştır [170].

$$G_f = 73f_{cm}^{0,18} \quad (6.10)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (6.11)$$

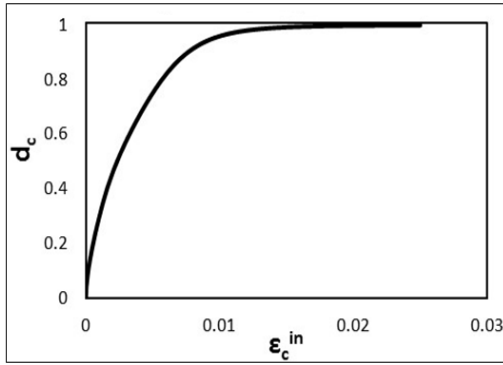
Burada  $\Delta f = 8 \text{ MPa}$  alınırken,  $f_{cm}$ , betonun ortalama basınç dayanımını,  $f_{ck}$  ise betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir.

Deneylerde kullanılan maksimum agrega boyutunun 22,4mm olduğu dikkate alınarak kırılma enerjisi ( $G_f$ ) 136 N/m olarak hesaplanmıştır [170].

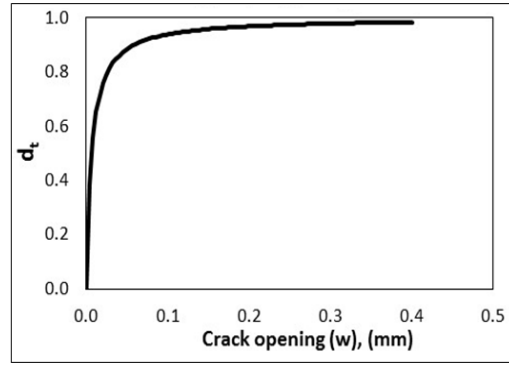


### 8.1.3. Beton basınç ve çekme hasar parametreleri

BHP yönteminde betonda oluşan hasarı tanımlayabilmek için gerilme-şekil değiştirme diyagramında beton numunenin elastisite modülünde meydana gelen azalmayı temsil eden basınç ve çekme hasar parametreleri ( $d_c - d_t$ ) dikkate alınmıştır (Şekil 8.3 ve Şekil 8.4.). Basınç ve çekme hasar parametrelerinde sıfır hasar oluşmadığını bir ise maksimum hasarı ifade etmektedir.



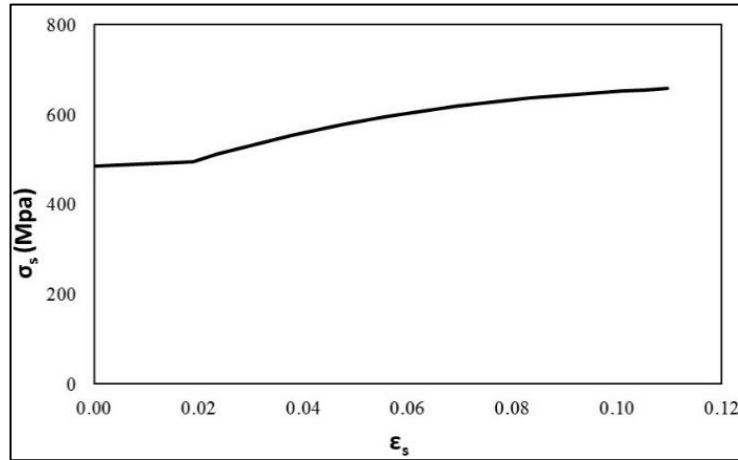
Şekil 8.3. Beton basınç hasar parametresi



Şekil 8.4. Beton çekme hasar parametresi

### 8.1.4. Donatı davranış modeli

Sonlu eleman hesaplarında donatı için pekleşmeyi içeren elastik ve inelastik gerilme-inelastik şekil değiştirme davranışı dikkate alınmıştır (Şekil 8.5.).



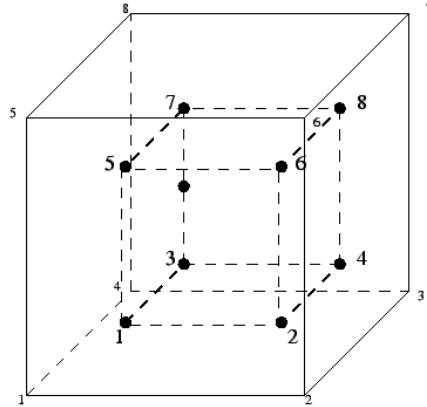
Şekil 8.5. Donatı gerçek gerilme-plastik şekil değiştirme davranışı

ABAQUS’de farklı kesit alanlarına sahip etriye-çapraz kesme donatısı ( $\text{Ø}8$ ), basınç ( $\text{Ø}12$ ) ve eğilme ( $\text{Ø}16$ ) donatıları için üç farklı gerçek gerilme-inelastik şekil değiştirme davranışı tanımlanmıştır.

### 8.1.5. Geometrik model ve sınır şartlarının belirlenmesi

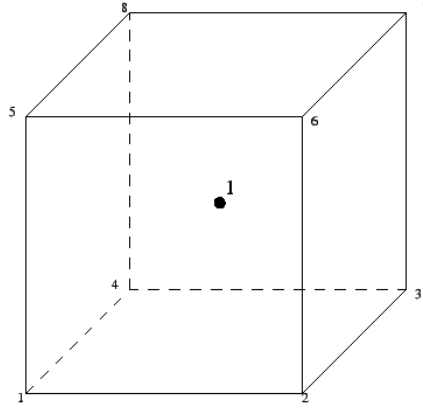
Modeller simetri özelliği kullanılmadan deneysel aşamada gerçekleştirilen yükleme ve sınır şartlarının tamamı dikkate alınarak oluşturulmuştur. ABAQUS’te beton eleman donatılı veya donatısız olacak şekilde modellenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında ise deney numunelerinde etriye ve çapraz kesme donatılarındaki konfigürasyonlar düşünülerek beton ve donatı ayrı elemanlar olarak modellenmiştir. Dolayısıyla, beton ve donatı çubuklarının sonlu eleman modellerinde farklı eleman tipleri kullanılmıştır.

Beton için kullanılan model çekme ile çatlama ve basınç ile ezilme özelliği ile üç yer değiştirme serbestlik derecesine sahip 8 düğüm noktalı azaltılmış integrasyona sahip doğrusal kübik (C3D8R) eleman olarak tanımlanmıştır. Bu elemanlarda  $2 \times 2 \times 2$  integrasyon kuralı uygulanmaktadır (Şekil 8.6.).



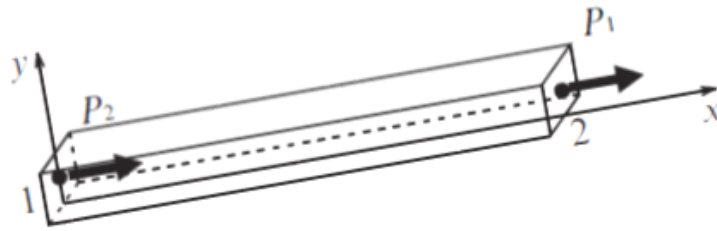
Şekil 8.6.  $2 \times 2 \times 2$  integrasyon noktasına sahip 8 düğüm noktalı kübik eleman (Solid) [187]

Azaltılmış integrasyon durumunda ise integrasyon noktası sayısı 1 olmaktadır. İntegrasyon noktası sayısının fazla olması bilinmeyen eleman sayısının fazla olmasına dolayısıyla da çözüm süresinin uzamasına neden olmaktadır (Şekil 8.7.).



Şekil 8.7. 1x1x1 integrasyon noktasına sahip 8 düğüm noktalı kübik eleman (Solid) [187]

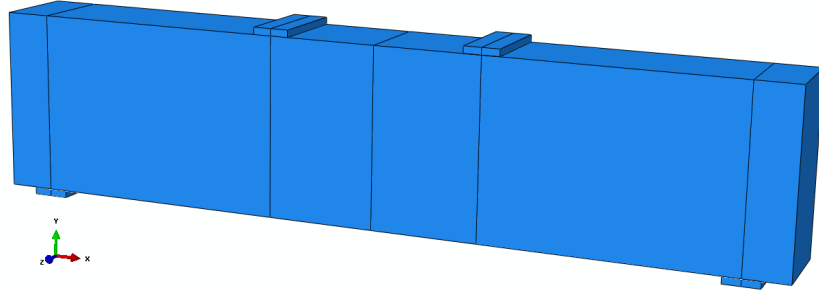
Donatı çubuklarının modellenmesi için iki noktalı doğrusal üç boyutlu çubuk (T3D2) eleman tanımlanmıştır (Şekil 8.8.). Donatı ile beton arasında tam aderans kabulü ile donatı beton içerisine gömülü (embedded) olarak modellenmiştir. İki noktalı ve üç boyutlu olarak modellenen donatı için elastikte modülü, poisson oranı, kesit alanı ve deneyler sonucunda elde edilen malzeme özellikleri de tanımlanmıştır.



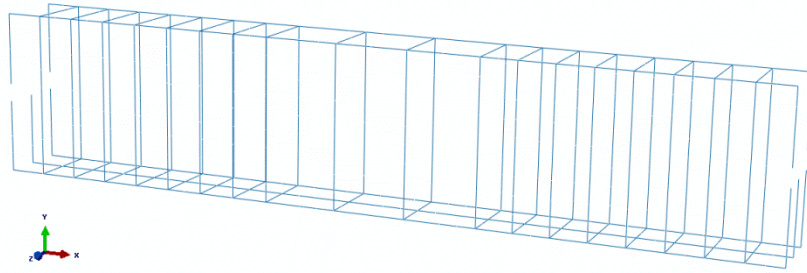
Şekil 8.8. 2 düğüm noktalı 3 boyutlu lineer çubuk eleman (Truss) [167]

Sınır şartları modellenirken deneysel aşamada gerçekleştirilen yükleme ve sınır şartları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalarda yük ve mesnet bölgelerinde gerilme yığılmalarını önleyebilmek için kullanılan 100mm genişliğinde ve 10mm kalınlığında metal levhalar modellemeye dahil edilmiştir. Mesnetler Seri-1 numuneleri için basit mesnet (sabit-hareketli), Seri-2 ve Seri-3 numuneleri için ise birinci dereceden hiperstatik (sabit-sabit) olacak şekilde tanımlanmıştır. Yükün deneysel çalışmada

düsey doğrultuda uygulandığı dikkate alınarak nümerik çalışmada analizler yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. ABAQUS'te tanımlanan beton ve donatı modelleri için genel görünüm sırası ile Şekil 8.9. ve Şekil 8.10.'da verilmiştir.

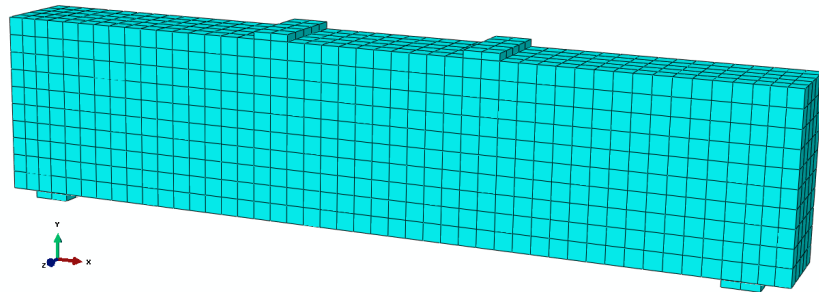


Şekil 8.9. ABAQUS sonlu eleman beton modeli



Şekil 8.10. ABAQUS sonlu eleman donatı modeli

Sonlu eleman analizlerinde en uygun çözüm ağı (mesh) boyutun belirlenmesi için parametrik çalışma yapılmış ve ideal çözüm ağı boyutu 50mm (en-boy oranı bir) olacak şekilde analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.11.).



Şekil 8.11. ABAQUS sonlu eleman çözüm ağı modeli

## 8.2. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Bu bölümde, sonlu eleman modelinin doğrulanması için bu tez kapsamında deneyleri yapılmış olan 19 adet betonarme kısa kiriş sonuçları ile kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerinin doğrulanması çalışmalarında Tablo 8.1.'deki parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesi amacıyla yüzlerce sonlu eleman analizi yapılmış ve betonarme kısa kirişlerin gerçek davranışı modellenmeye çalışılmıştır. Sonlu eleman modelinin doğrulanması çalışması sonucunda belirlenen değerler Tablo 8.2.'de verilmiştir.

Tablo 8.2. Beton malzeme modeli için ABAQUS'de belirlenen bazı parametreler

Parametre	Alınan Değer	Açıklama
$\psi$	56	Dilasyon/Genleşme açısı
$\epsilon$	0,1	Eksantirisite
$F_{b0}/f_{c0}$	1,16	Eş iki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç akma gerilmesine oranı
$K_c$	0,6667	Çekme fonksiyonu üzerindeki ikincil sabit gerilme oranı
$\mu$	0,0001	Vizkozite parametresi

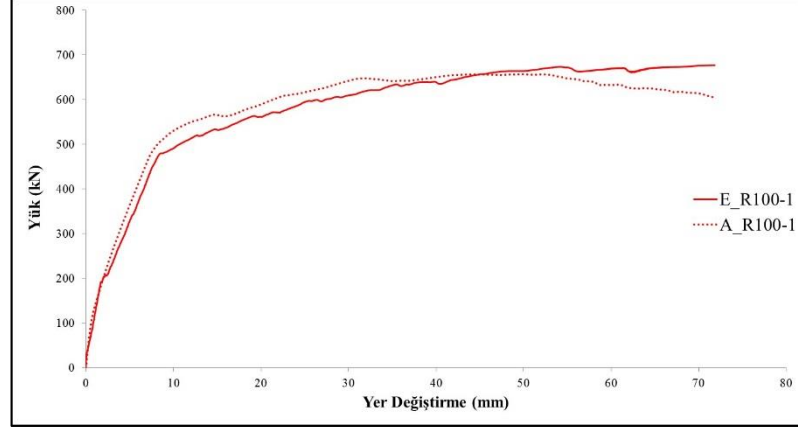
Bu tez kapsamında yapılan deneysel ve nümerik çalışma sonuçları göz önüne alınarak beton malzeme modeli için belirlenen bu parametrelerin betonun ve donatının etkileşimi ve davranışını gerçekçi bir şekilde yansıttığı deney numunelerinin doğrulanması bölümünde gösterilmiştir (Şekil 8.12. - Şekil 8.55.). Ayrıca, beton davranış modeli ve belirlenen bu parametreler değiştirilmeden parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

### 8.2.1. Seri-1 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması

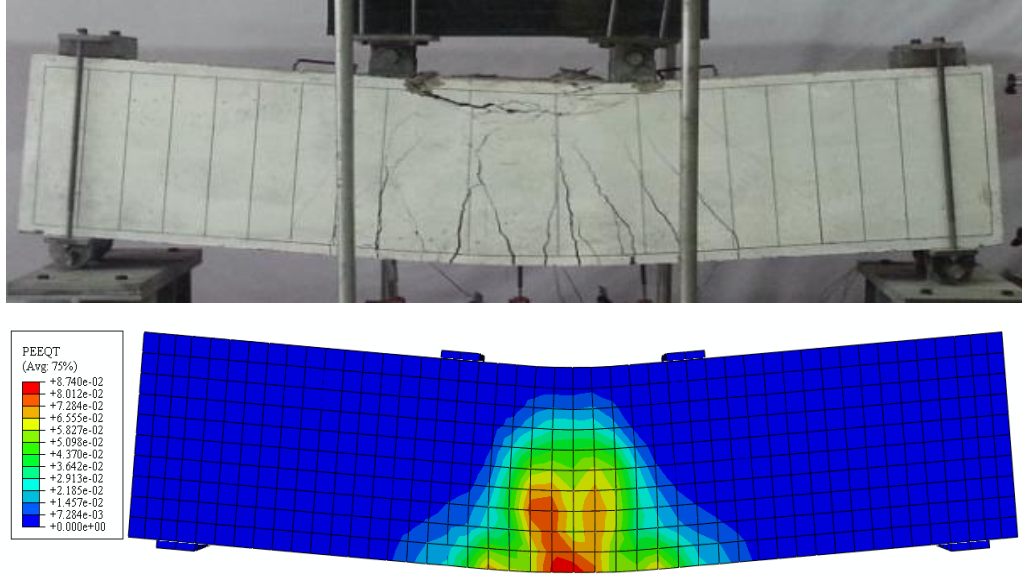
Seri-1'de deneyleri yapılan 7 adet betonarme kısa kirişin sonlu eleman analizlerinden yük-yer değiştirme ve gerilme dağılım verileri elde edilmiştir. Doğrulama amacıyla yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri, deneyler sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile uyumlu olması açısından, analizler aynı yer değiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Burada 7 kirişe ait elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçları hem sayısal hemde grafiksel olarak sunulmuştur.

### 8.2.1.1. R100-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.12’de ve hasar mekanizması Şekil 8.13.’de verilmiştir.



Şekil 8.12. R100-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.13. R100-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

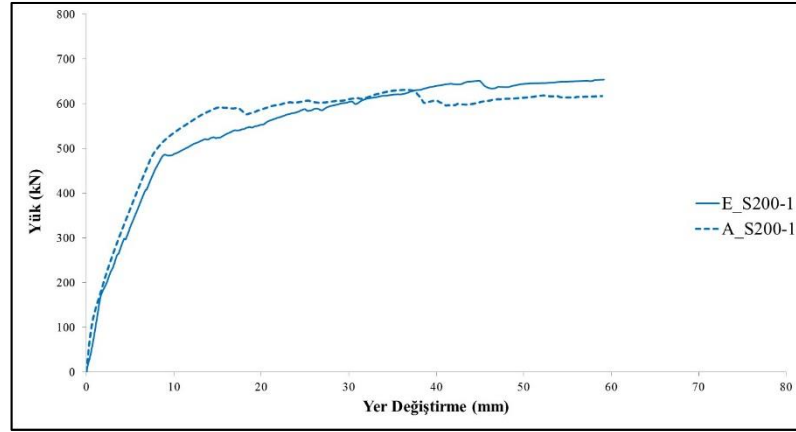
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman (SE) analiz sonuçları oranları Tablo 8.3.’de verilmiştir.

Tablo 8.3. R100-1 kirişi deney ve SE sonuçları

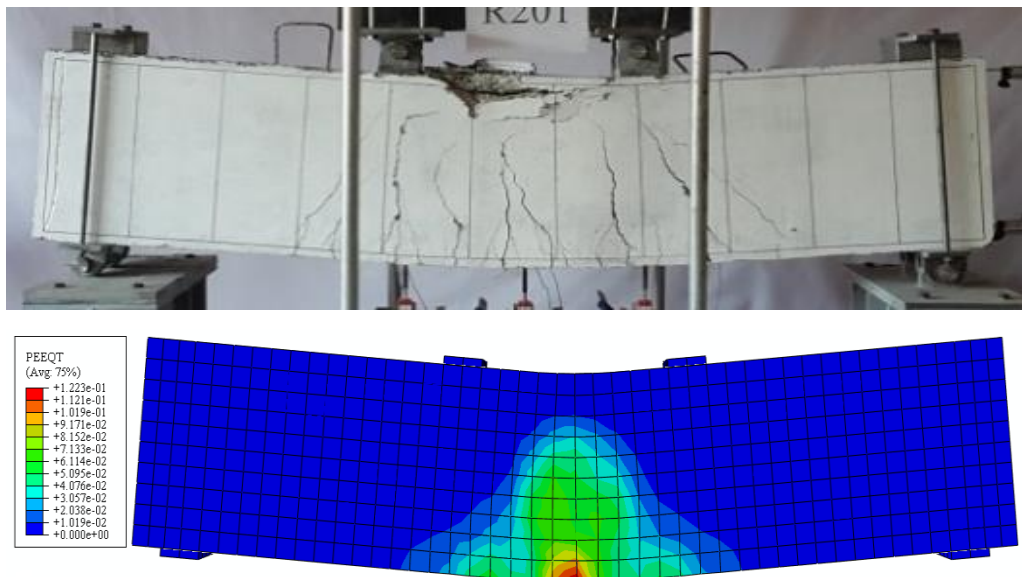
R100-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	486	9,5	515	9,1	0,94	1,04
Göçme ( $\delta_u$ )	678	71,8	606	71,7	1,12	1,00

### 8.2.1.2. S200-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.14.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.15.'de verilmiştir.



Şekil 8.14. S200-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.15. S200-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

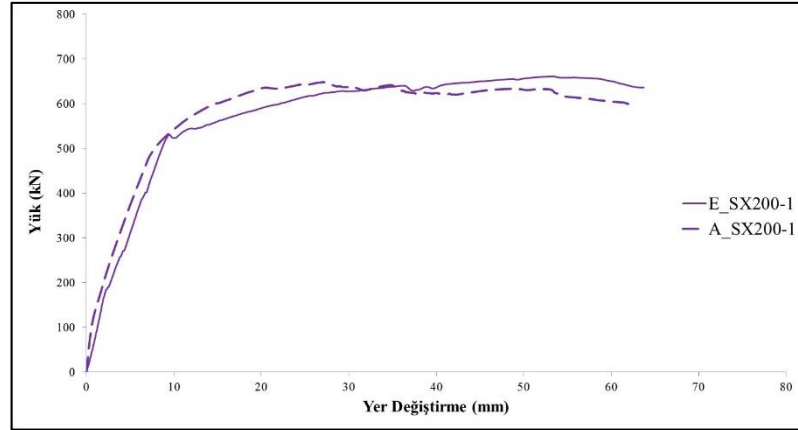
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.4.'de verilmiştir.

Tablo 8.4. S200-1 kirişi deney ve SE sonuçları

S200-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	478	8,4	502	8,1	0,95	1,04
Göçme ( $\delta_u$ )	654	59	617	59	1,06	1,00

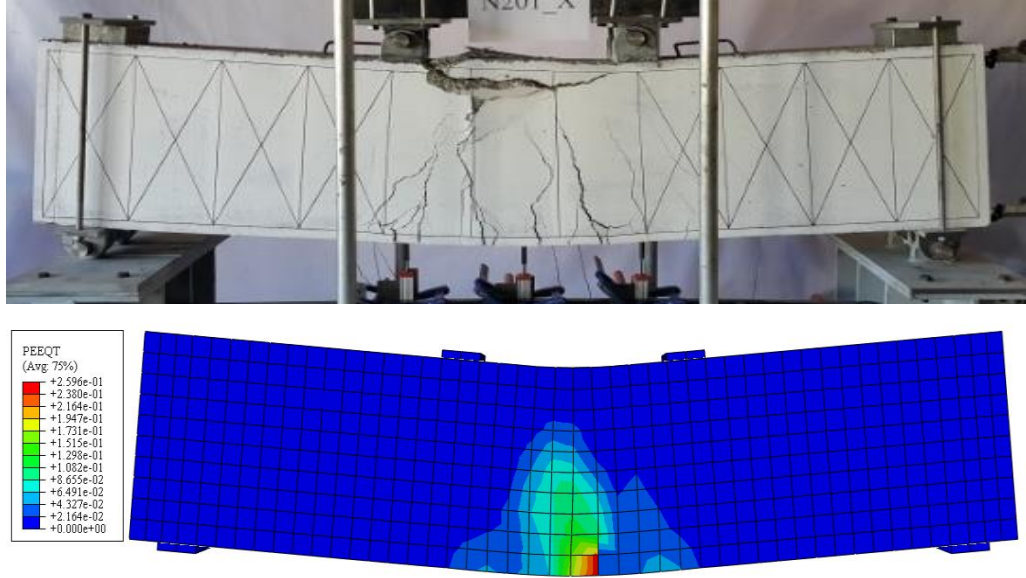
### 8.2.1.3. SX200-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.16.'da ve hasar mekanizması Şekil 8.17.'de verilmiştir.



Şekil 8.16. SX200-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği





Şekil 8.17. SX200-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

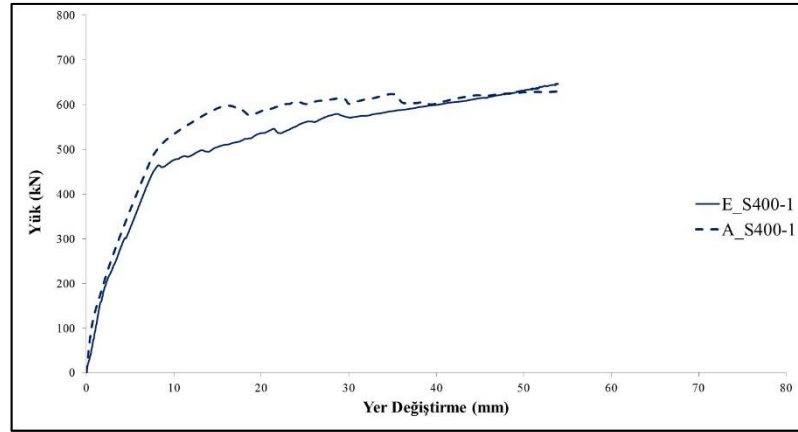
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.5.'de verilmiştir.

Tablo 8.5. SX200-1 kirişi deney ve SE sonuçları

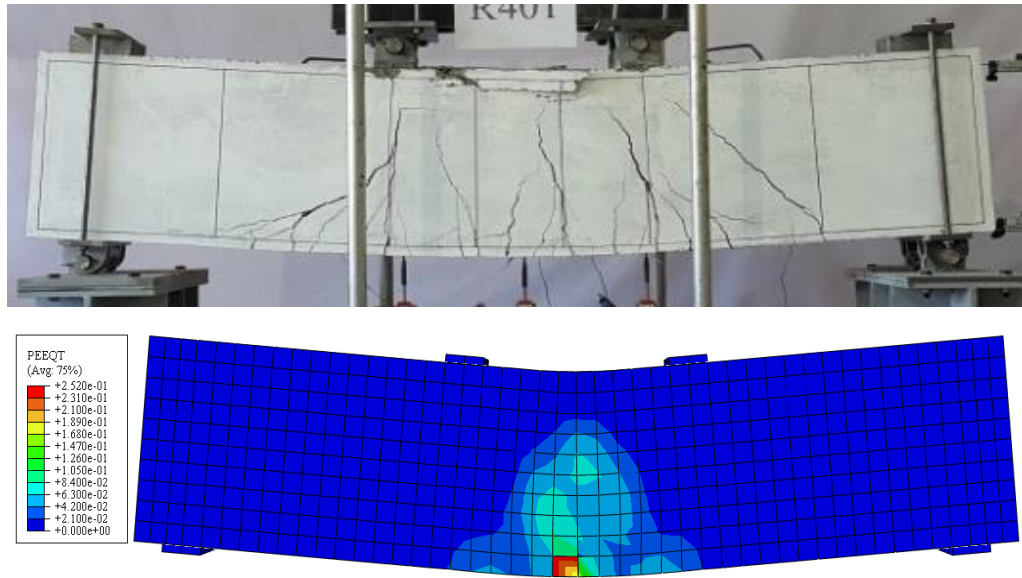
SX200-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	519	8,8	544	9,9	0,95	0,89
Göçme ( $\delta_u$ )	662	62,3	598	62,3	1,11	1,00

#### 8.2.1.4. S400-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.18.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.19.'da verilmiştir.



Şekil 8.18. S400-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.19. S400-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

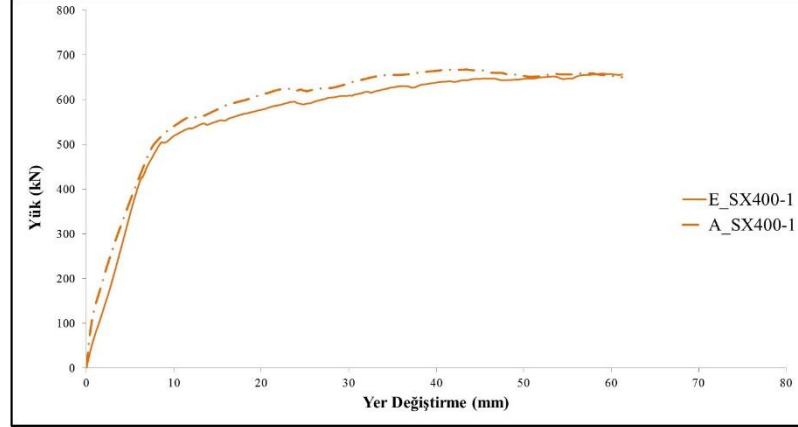
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.6.'da verilmiştir.

Tablo 8.6. S400-1 kirişi deney ve SE sonuçları

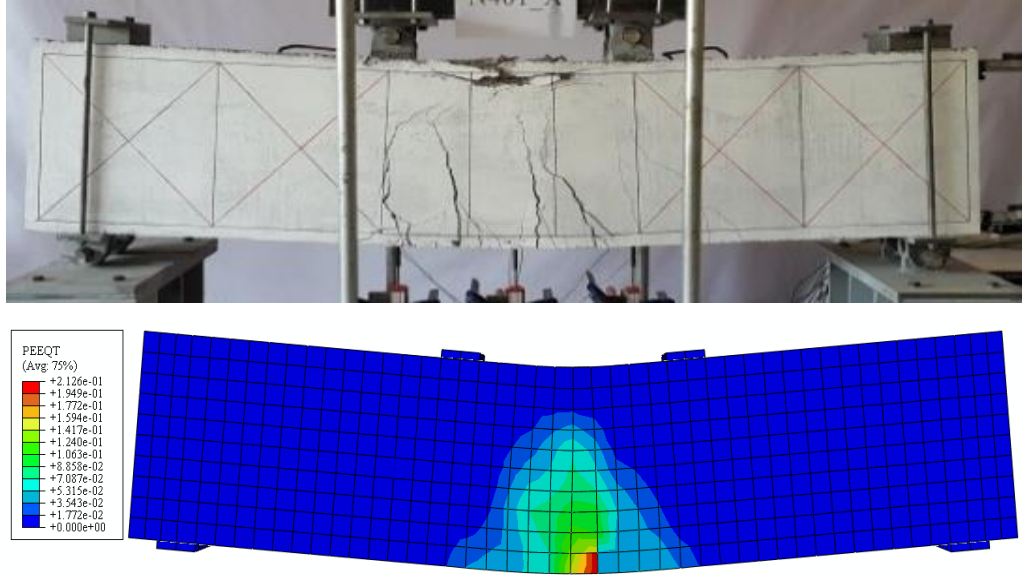
S400-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	467	8,2	491	7,8	0,95	1,05
Göçme ( $\delta_u$ )	647	54,3	630	54,1	1,03	1,00

### 8.2.1.5. SX400-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.20.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.21.'de verilmiştir.



Şekil 8.20. SX400-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.21. SX400-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

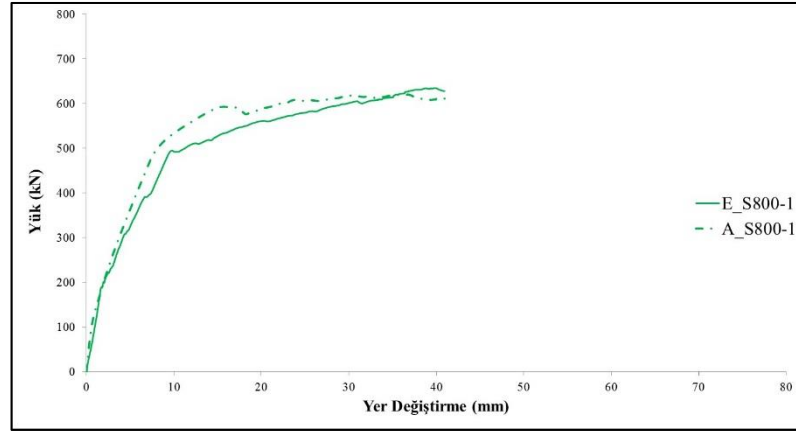
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.7.'de verilmiştir.

Tablo 8.7. SX400-1 kirişi deney ve SE sonuçları

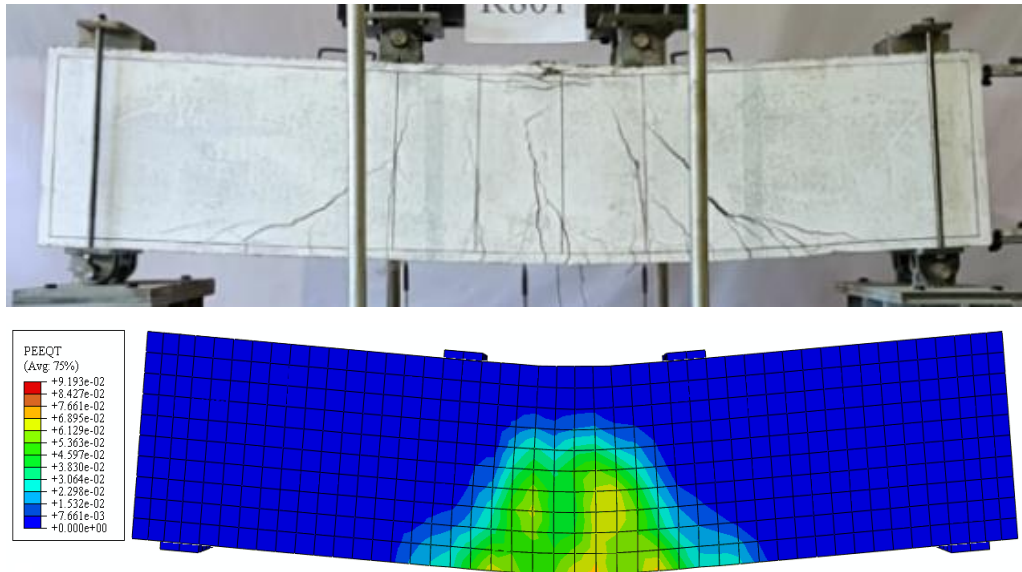
SX400-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	502	8,6	525	8,99	0,96	0,96
Göçme ( $\delta_u$ )	658	61,1	651	61,1	1,01	1,00

### 8.2.1.6. S800-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.22.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.23.'de verilmiştir.



Şekil 8.22. S800-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.23. S800-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

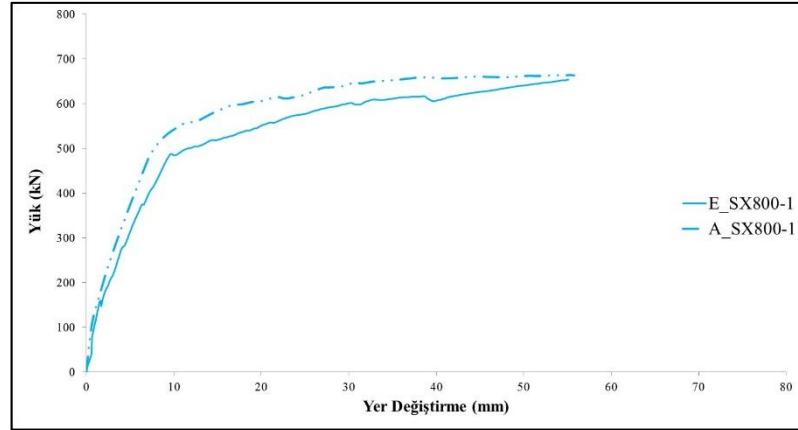
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.8.'de verilmiştir.

Tablo 8.8. S800-1 kirişi deney ve SE sonuçları

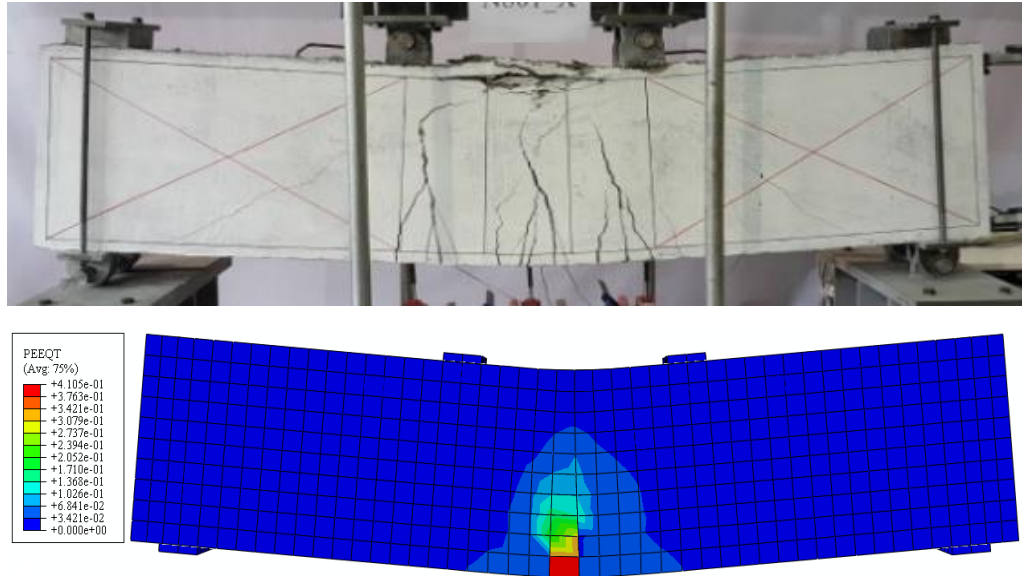
S800-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	461	8,7	482	7,5	0,96	1,16
Göçme ( $\delta_u$ )	635	41,4	611	41,3	1,04	1,00

### 8.2.1.7. SX800-1 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.24.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.25.'de verilmiştir.



Şekil 8.24. SX800-1 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.25. SX800-1 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

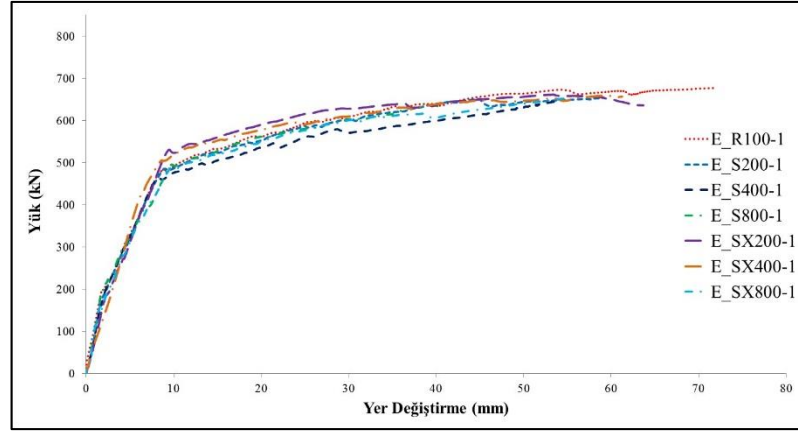
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.9.'da verilmiştir.

Tablo 8.9. SX800-1 kirişi deney ve SE sonuçları

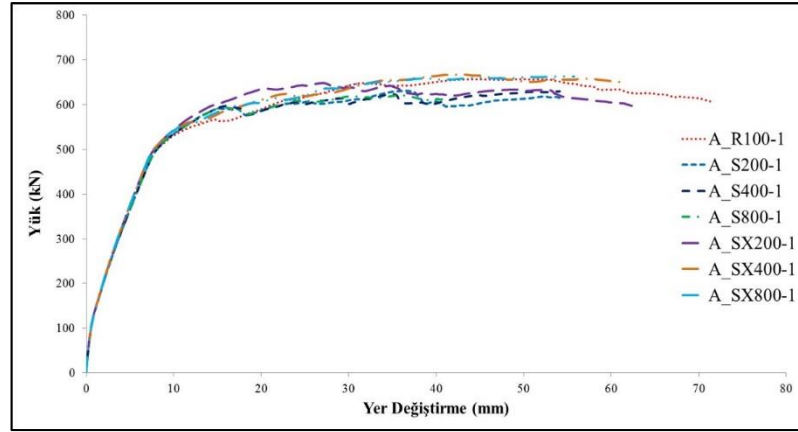
SX800-1	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	489	9,6	518	8,6	0,94	1,12
Göçme ( $\delta_u$ )	654	55,2	664	55,4	0,98	1,00

### 8.2.1.8. Seri-1 deney numuneleri SEA sonuçları

Basit mesnetli (sabit-hareketli) olarak tasarlanan Seri-1 test numunelerinin tamamına ait deney sonuçları Şekil 8.26. ve sonlu eleman sonuçları Şekil 8.27.'de sunulmuştur.



Şekil 8.26. Seri-1 kirişlerine ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.27. Seri-1 kirişlerine ait sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.26. ve Şekil 8.27.'de verilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında sonlu eleman modelinin daha rijit olmasına rağmen genel olarak deney numuneleri ile sonlu eleman modellerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Sonlu eleman modellerinin davranışının daha rijit olmasının nedeni, deney numunesine göre sonlu eleman modelinin geometrisinin, malzemesinin, mesnet ve yük aktarma düzeneklerinin daha kusursuz olmasıdır. Şekil 8.26. ve Şekil 8.27. dikkatle incelendiğinde donatının akmasına kadar sonlu eleman modelinin deney numunesine göre daha rijit davranış gösterdiği donatı aktıktan sonra ise sonlu eleman modelinin dayanımındaki azalmaların deney numunesine göre daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. Deney numuneleri ve sonlu eleman modellerinin yaklaşık olarak aynı yük ve yer değiştirme değerinde akmaya başladığı ve maksimum yer değiştirme noktasına ulaşıldığında aynı yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

TDY2007 tarafından önerilen R100-1 kirişi, kesme bölgesinde hiç etriye bulunmayan S800-1 kirişi ve bu iki uç kiriş arasındaki diğer kirişlerin de aynı davranışı göstermesinin tek açıklaması daha önce de anlatıldığı gibi mesnetlenme şartlarıdır. Yani hareketli olan mesnet yük etkisinde hareket ettikçe tüm kirişlerin eğilme bölgesinde çatlaklar oluşmakta ve eğilme etkisiyle nihai duruma ulaşmaktadır.

Deney numuneleri ve sonlu eleman modellerinin sonuçları yük değerleri için Tablo 8.10. ve yerdeğiştirme değerleri için Tablo 8.11.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8.10. Seri-1 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri

Deney Numunesi	Yük-P (kN)							
	Deney		SE		SE/Deney		SE-Deney Yüzde Değişimi	
	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S800-1	461	635	482	611	1,05	0,96	4,56	-3,78
SX800-1	489	654	518	664	1,06	1,02	5,93	1,53
S400-1	467	647	491	630	1,05	0,97	5,14	-2,63
SX400-1	502	658	525	651	1,05	0,99	4,58	-1,06
S200-1	478	654	502	617	1,05	0,94	5,02	-5,66
SX200-1	519	662	544	598	1,05	0,90	4,82	-9,67
R100-1	486	678	515	606	1,06	0,89	5,97	-10,62

Tablo 8.11. Seri-1 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Deney Numunesi	Yer Değiştirme- $\Delta$ (mm)							
	Deney		SE		SE/Deney		SE-Deney Yüzde Değiştirme	
	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S800-1	8,7	41,4	7,5	41,4	0,86	1,00	-13,79	0,00
SX800-1	9,6	55,2	8,6	55,2	0,90	1,00	-10,42	0,00
S400-1	8,2	54,3	7,8	54,3	0,95	1,00	-4,88	0,00
SX400-1	8,6	61,1	9,0	61,1	1,05	1,00	4,53	0,00
S200-1	8,4	59,0	8,1	59,0	0,96	1,00	-3,57	0,00
SX200-1	8,8	62,3	9,9	62,3	1,13	1,00	12,50	0,00
R100-1	9,5	71,8	9,1	71,8	0,96	1,00	-4,21	0,00



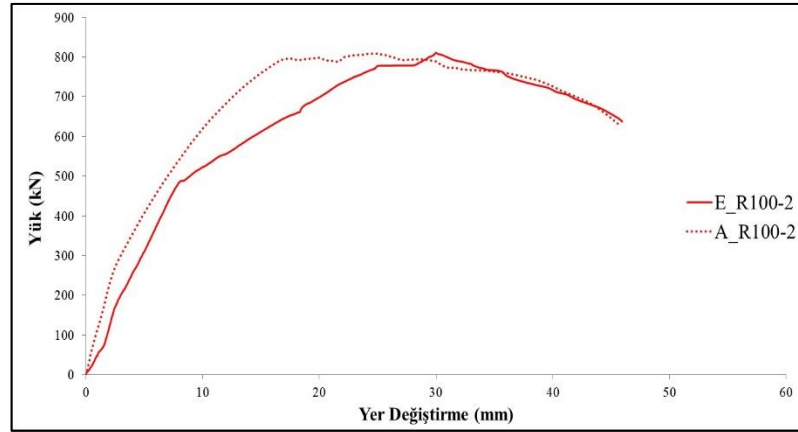
Tablo 8.10. ve Tablo 8.11. dikkatle incelendiğinde sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri sonuçları hem yük hem de yerdeğiştirme açısından yaklaşık olarak aynıdır. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında sonlu eleman modellerinin akma noktası için %4,56 ile %5,97 ve göçme noktası için %1,06 ile %10,62 arasında değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında ise sonlu eleman modellerinin akma noktası için %3,57 ile %13,79 değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modellerinin analizleri deney numunelerinin ölçülen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sonlu eleman modelleri ile deney numunelerinin göçme noktasındaki yerdeğiştirme değerleri aynıdır.

### **8.2.2. Seri-2 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması**

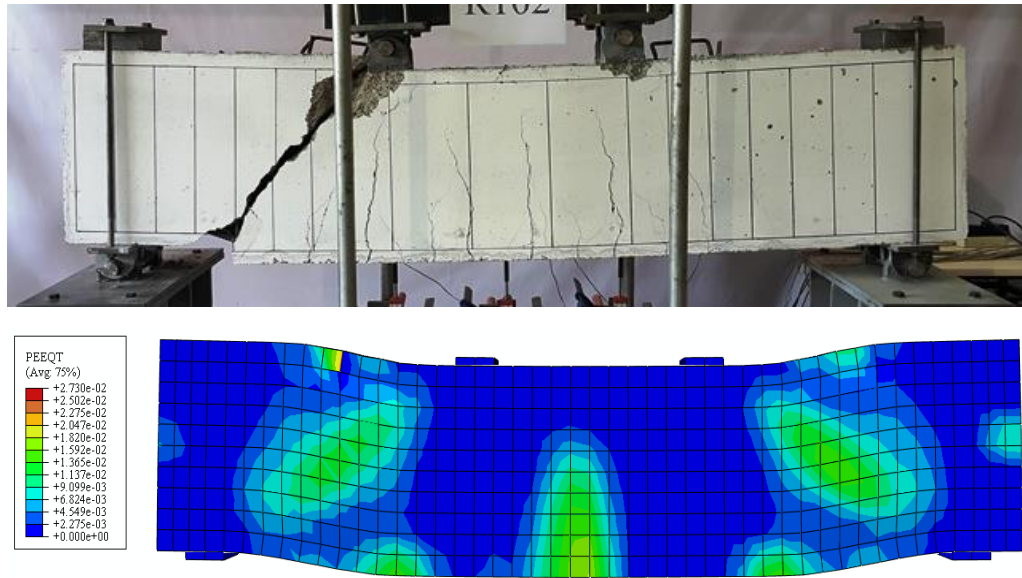
Seri-2 de deneyleri yapılan 7 adet betonarme kısa kirişin sonlu eleman analizlerinden yük-yer değiştirme ve gerilme dağılım verileri elde edilmiştir. Doğrulama amacıyla yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri, deneyler sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile uyumlu olması açısından, analizler aynı yer değiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu 7 kirişe ait elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçları hem sayısal hemde grafiksel olarak sunulmuştur.

#### **8.2.2.1. R100-2 kirişinin SEA ile doğrulanması**

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.28.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.29.'da verilmiştir.



Şekil 8.28. R100-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.29. R100-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

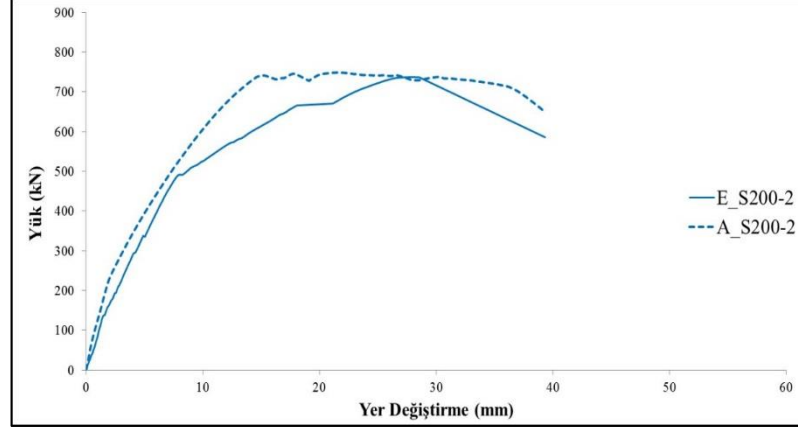
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman (SE) analiz sonuçları oranları Tablo 8.12.'de verilmiştir.

Tablo 8.12. R100-2 kirişi deney ve SE sonuçları

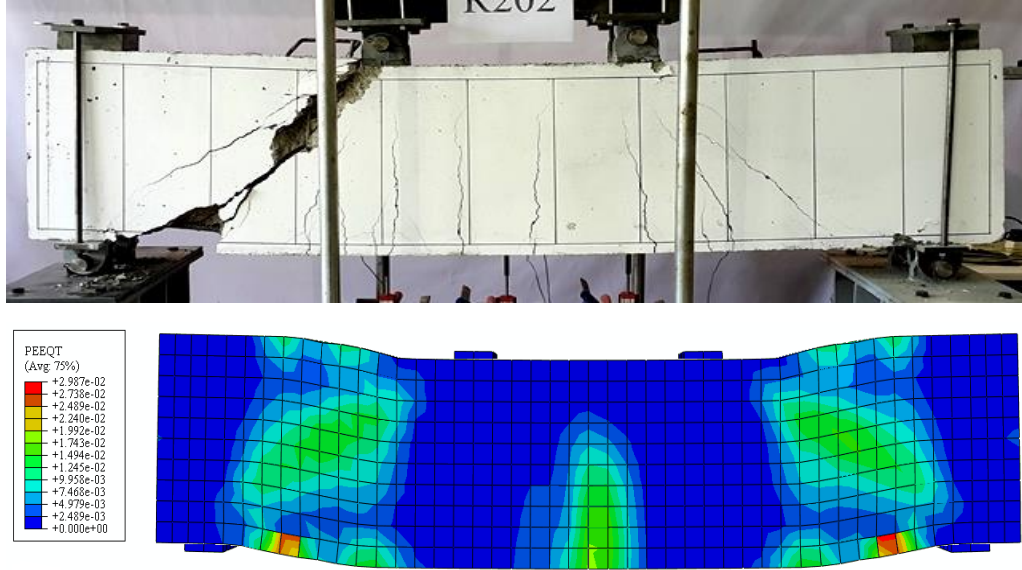
R100-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	487	8,6	793	17,0	0,61	0,51
Tepe ( $\delta_m$ )	811	30,0	808	24,0	1,00	1,25
Göçme ( $\delta_u$ )	637	45,9	631	45,7	1,01	1,00

### 8.2.2.2. S200-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.30.'da ve hasar mekanizması Şekil 8.31.'de verilmiştir.



Şekil 8.30. S200-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.31. S200-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

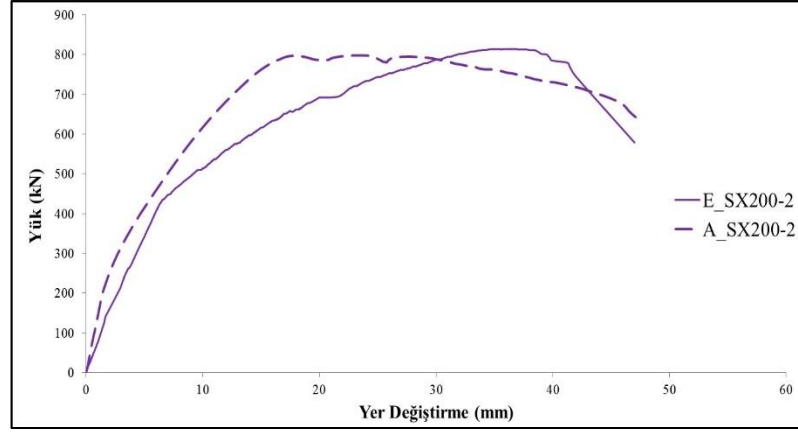
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.13.'de verilmiştir.

Tablo 8.13. S200-2 kirişi deney ve SE sonuçları

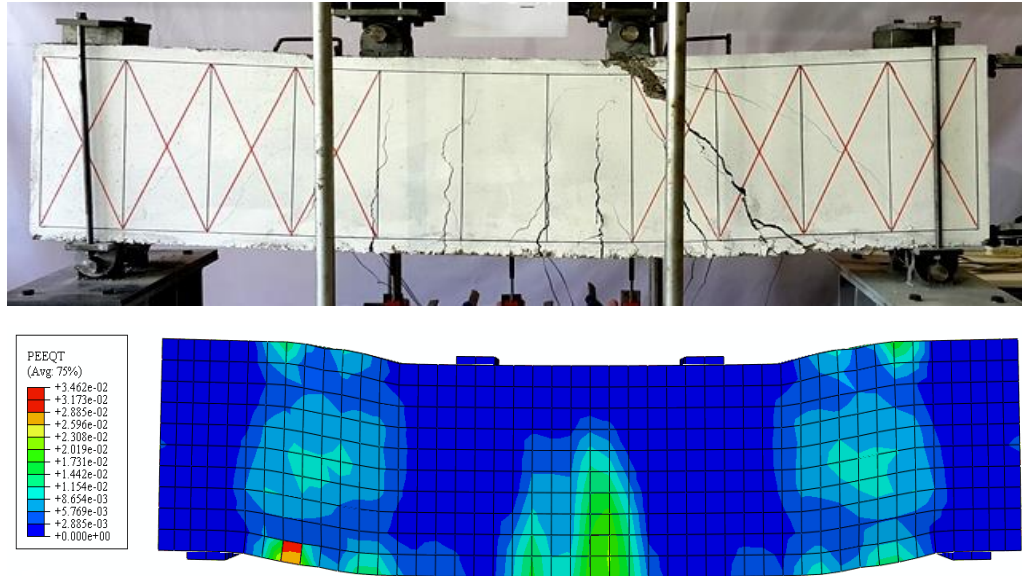
S200-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	485	7,7	738	14,0	0,66	0,55
Tepe ( $\delta_m$ )	737	27,8	749	22,0	0,98	1,26
Göçme ( $\delta_u$ )	586	39,3	648	39,4	0,90	1,00

### 8.2.2.3. SX200-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.32.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.33.'de verilmiştir.



Şekil 8.32. SX200-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.33. SX200-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

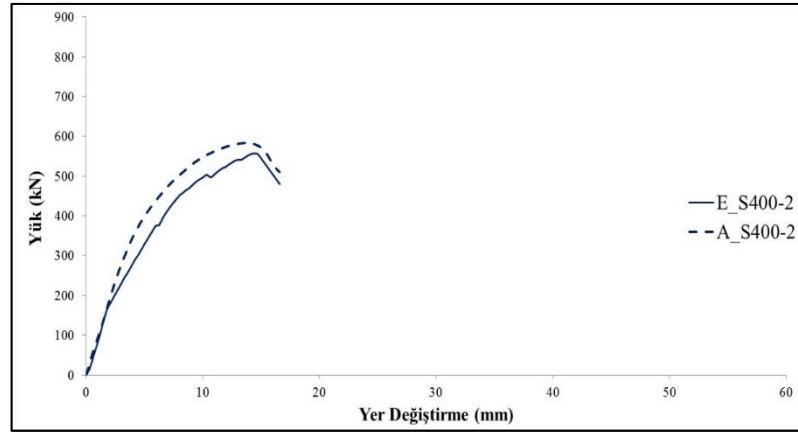
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.14.'de verilmiştir.

Tablo 8.14. SX200-2 kirişi deney ve SE sonuçları

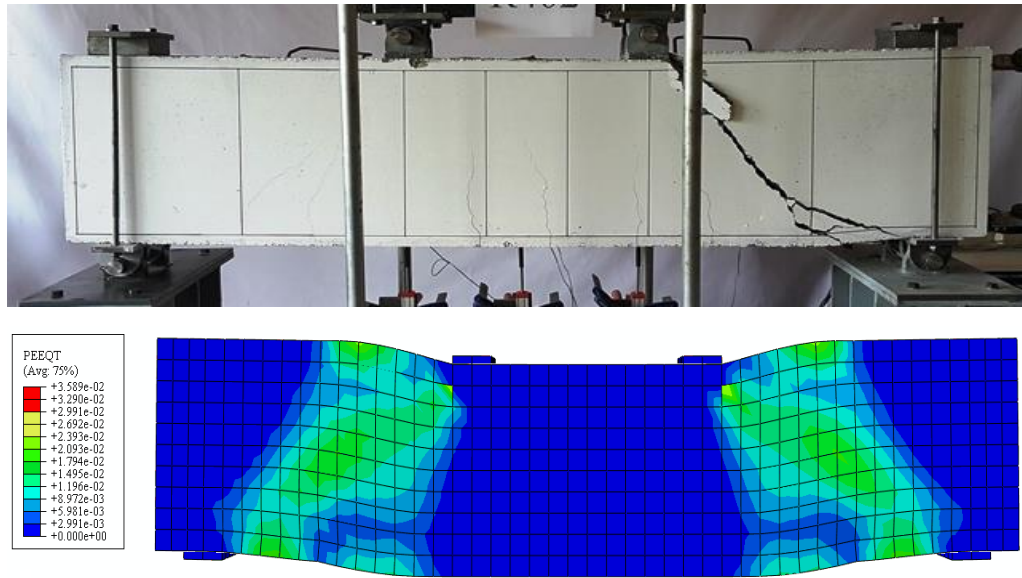
SX200-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	464	7,7	787	16	0,59	0,48
Tepe ( $\delta_m$ )	814	36,4	872	20	0,93	1,82
Göçme ( $\delta_u$ )	579	47,0	636	48	0,91	0,99

#### 8.2.2.4. S400-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.34.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.35.'de verilmiştir.



Şekil 8.34. S400-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.35. S400-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

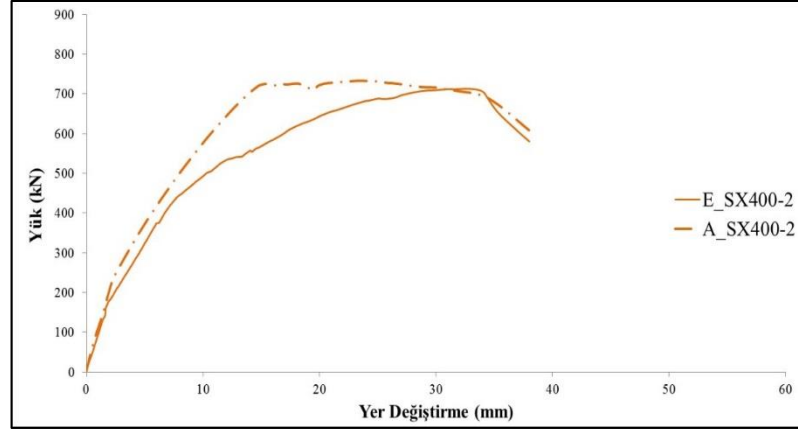
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.15.'de verilmiştir.

Tablo 8.15. S400-2 kirişi deney ve SE sonuçları

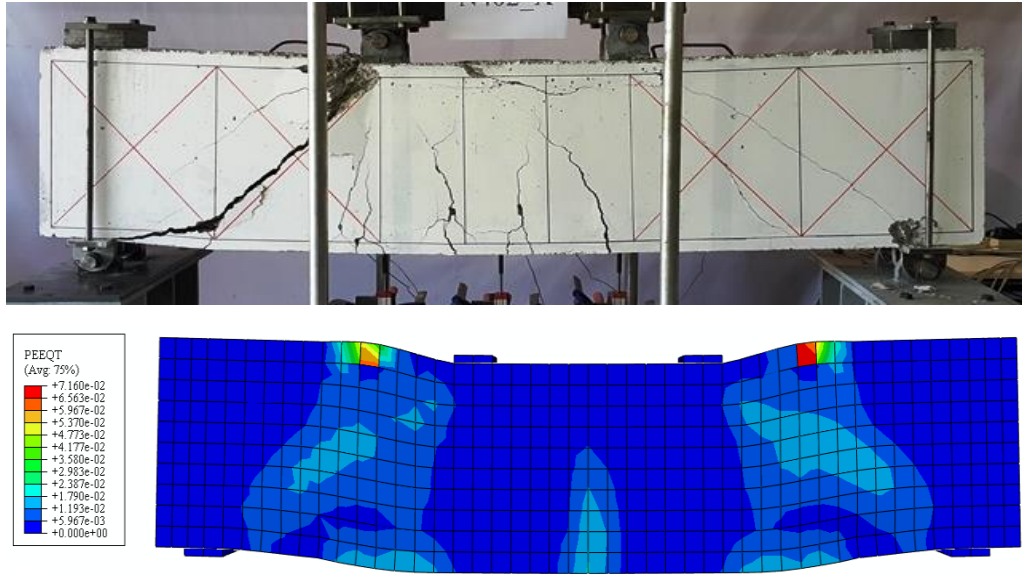
S400-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	452	8,4	532	9,6	0,85	0,88
Tepe ( $\delta_m$ )	557	14,5	583	14,0	0,96	1,04
Göçme ( $\delta_u$ )	480	16,6	510	17,0	0,94	1,00

### 8.2.2.5. SX400-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.36.'da ve hasar mekanizması Şekil 8.37.'de verilmiştir.



Şekil 8.36. SX400-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.37. SX400-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

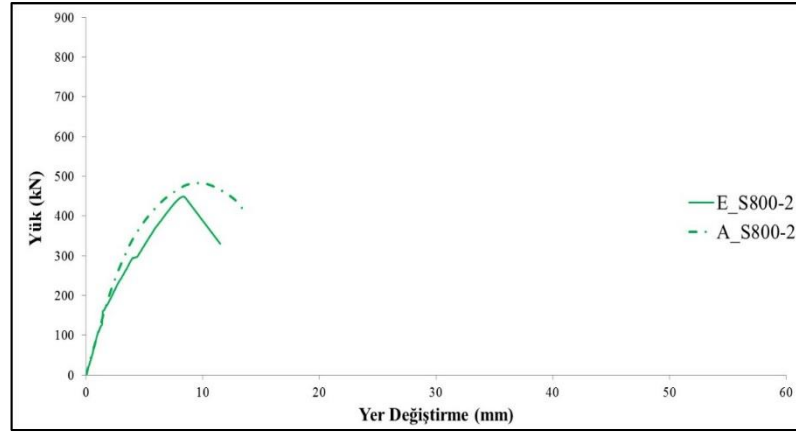
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.16.'da verilmiştir.

Tablo 8.16. SX400-2 kirişı deney ve SE sonuçları

SX400-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	457	8,5	723	15	0,63	0,57
Tepe ( $\delta_m$ )	712	32,7	732	25	0,97	1,31
Göçme ( $\delta_u$ )	580	37,0	608	38	0,95	0,98

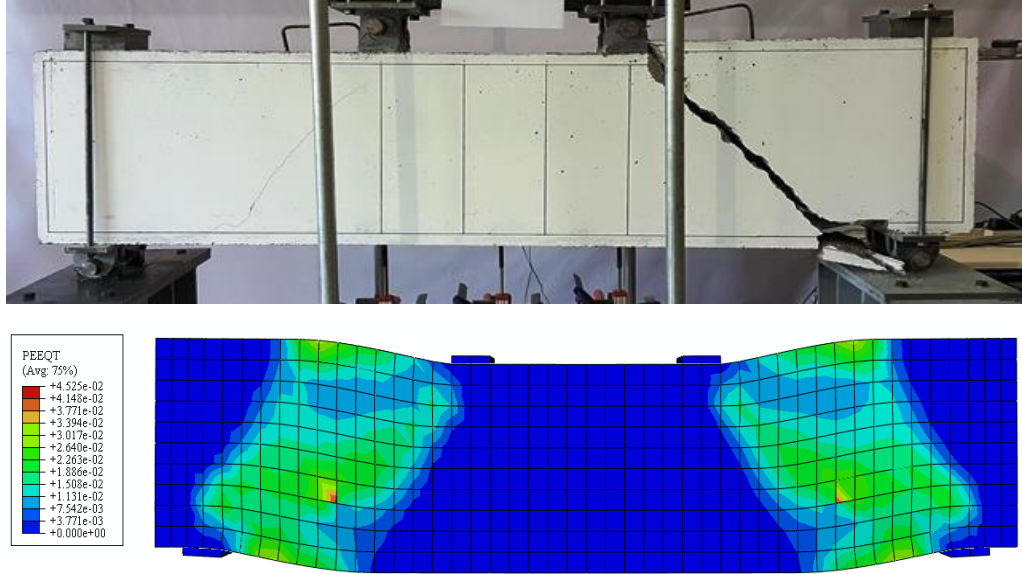
### 8.2.2.6. S800-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.38.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.39.'da verilmiştir.



Şekil 8.38. S800-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği





Şekil 8.39. S800-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

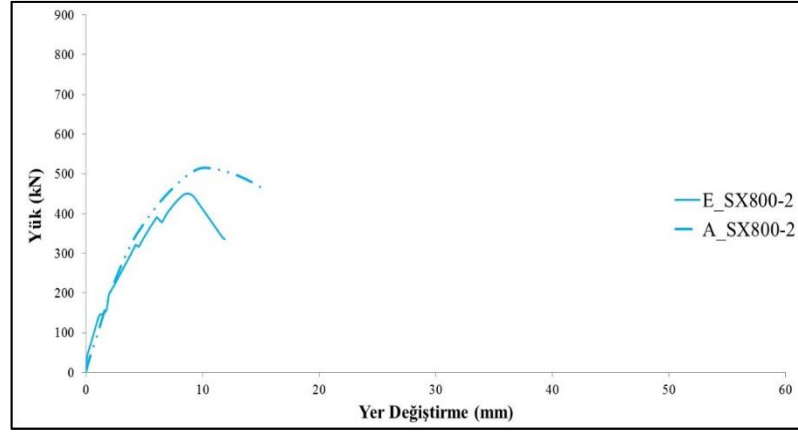
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.17.'de verilmiştir.

Tablo 8.17. S800-2 kirişi deney ve SE sonuçları

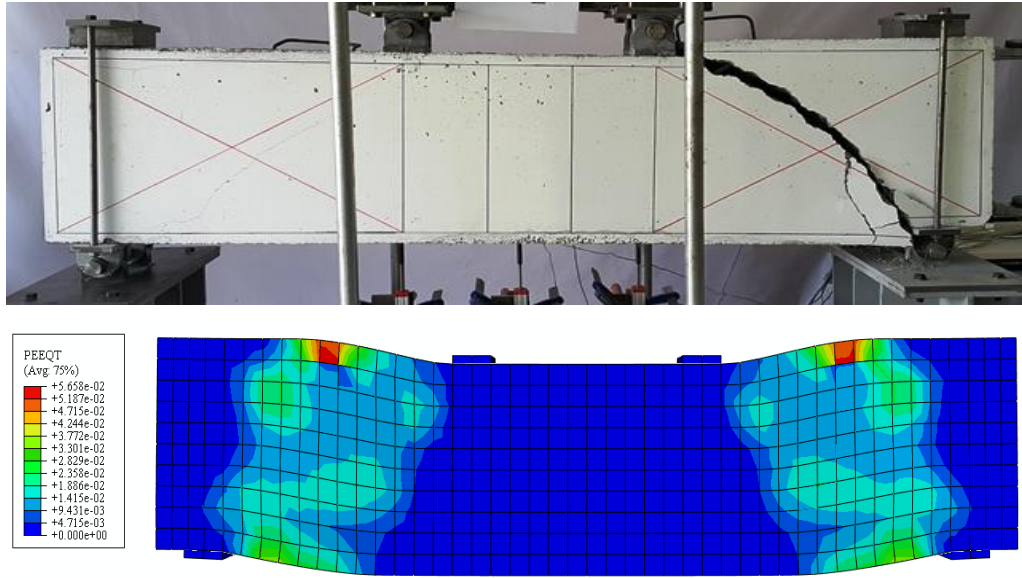
S800-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	-	-	-	-	-	-
Tepe ( $\delta_m$ )	448	8,3	482	9,0	0,93	0,90
Göçme ( $\delta_u$ )	330	11,5	416	13,5	0,79	0,85

### 8.2.2.7. SX800-2 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.40.'da ve hasar mekanizması Şekil 8.41.'de verilmiştir.



Şekil 8.40. SX800-2 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.41. SX800-2 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

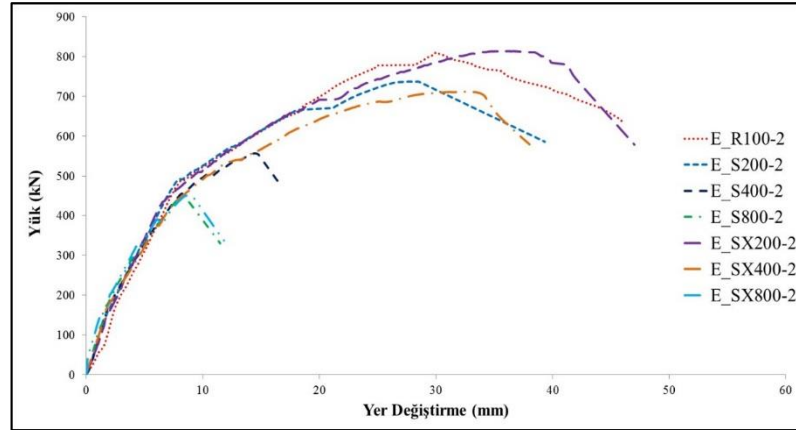
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.18.'de verilmiştir.

Tablo 8.18. SX800-2 kirişi deney ve SE sonuçları

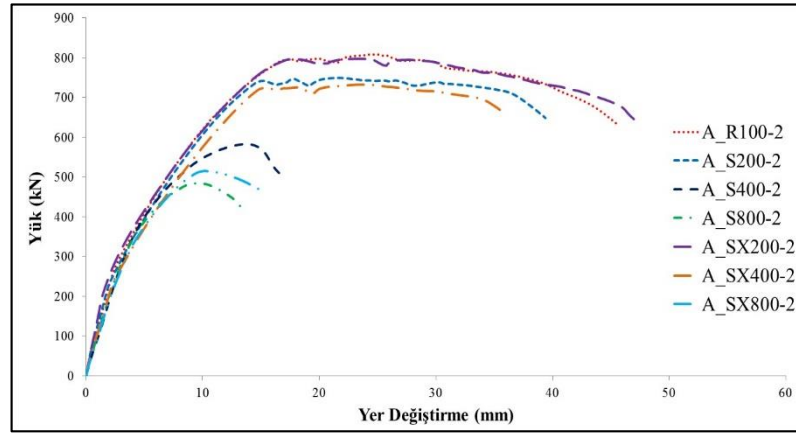
SX800-2	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	-	-	-	-	-	-
Tepe ( $\delta_m$ )	450	8,7	519	9,0	0,87	0,93
Göçme ( $\delta_u$ )	336	11,9	460	14,5	0,73	0,82

### 8.2.2.8. Seri-2 deney numuneleri SEA sonuçları

Her iki mesneti de sabit olarak tasarlanan Seri-2 test numuneleri için Şekil 8.42. ve Şekil 8.43.'de deney ve sonlu eleman analiz sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur.



Şekil 8.42. Seri-2 kirişlerine ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.43. Seri-2 kirişlerine ait sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği

Seri-1 kirişleri ile Seri-2 kirişlerinin tüm özellikleri aynı seçilmekle birlikte sadece mesnetlenme şartı değiştirilmiştir. Seri-1 kirişlerinin davranışı birbirlerine benzer iken Şekil 8.42. ve Şekil 8.43.'den de görüldüğü gibi Seri-2 kirişlerinin davranışları ise birbirlerinden oldukça farklıdır. Bunun nedeni, mesnetlenme şartı nedeniyle yatay yöndeki hareket engelendiğinden düşey yük etkisinde kiriş içerisinde ek çekme gerilmeleri oluşmasıdır. Bu ek çekme gerilmeleri nedeniyle kiriş kesme bölgesinde

kesme çatlakları oluşmakta ve eğilme kırılması yerine gevrek davranış gösteren kesme ve kesmeli eğilme davranışı meydana gelmektedir.

Şekil 8.42. ve Şekil 8.43.'de verilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında sonlu eleman modelinin daha rijit olmasına rağmen genel olarak deney numuneleri ile sonlu eleman modellerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Sonlu eleman modellerinin davranışının daha rijit olmasının nedeni, deney numunesine göre sonlu eleman modelinin geometrisinin, malzemesinin, mesnet ve yük aktarma düzeneklerinin daha kusursuz olmasıdır. Şekil 8.42. ve Şekil 8.43. dikkatle incelendiğinde donatının akmasına kadar sonlu eleman modelinin deney numunesine göre daha rijit davranış gösterdiği donatı aktıktan sonra ise sonlu eleman modelinin dayanımındaki azalmaların deney numunesine göre daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile deneysel sonuçlar doğrulanmış ve bununla birlikte nümerik çalışmalarda bulunan eğilme ve kesme çatlakları ile çatlak formlarının deney numunelerinin testlerinde gözlemlenen çatlak formlarıyla örtüştüğü gösterilmiştir.

Deney numuneleri ve sonlu eleman modellerinin sonuçları yük değerleri için Tablo 8.19. ve yerdeğiştirme değerleri için Tablo 8.20.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8.19. Seri-2 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri

Deney Numunesi	Yük-P (kN)											
	Deney			SE			SE/Deney			SE-Deney Yüzde Değişimi		
	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S800-2	-	448	330	-	482	416	-	1,08	1,26	-	7,59	26,06
SX800-2	-	450	336	-	519	460	-	1,15	1,37	-	15,33	36,90
S400-2	452	557	480	532	583	510	1,18	1,05	1,06	17,70	4,67	6,25
SX400-2	457	712	580	723	732	608	1,58	1,03	1,05	58,21	2,81	4,83
S200-2	485	737	586	738	749	648	1,52	1,02	1,11	52,16	1,63	10,58
SX200-2	464	814	579	787	872	636	1,70	1,07	1,10	69,61	7,13	9,84
R100-2	487	811	637	793	808	631	1,63	1,00	0,99	62,83	-0,37	-0,94

Tablo 8.20. Seri-2 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Deney Numunesi	Yer Değiştirme- $\Delta$ (mm)											
	Deney			SE			SE/Deney			SE-Deney Yüzde Değişimi		
	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S800-2	-	8,3	11,5	-	9	11,5	-	1,11	1,00	-	11,4	0,00
SX800-2	-	8,7	11,9	-	9	11,9	-	1,08	1,00	-	8,0	0,00
S400-2	8,4	14,5	16,6	9,6	14	16,6	1,14	0,97	1,00	14,3	-3,4	0,00
SX400-2	8,5	32,7	37,0	15	25	37,0	1,76	0,76	1,00	76,5	-23,5	0,00
S200-2	7,7	27,8	39,3	14	22	39,3	1,82	0,79	1,00	81,8	-20,9	0,00
SX200-2	7,7	36,4	47,0	16	20	47,0	2,08	0,55	1,00	107,8	-45,1	0,00
R100-2	8,6	30,0	45,9	17	24	45,9	1,98	0,80	1,00	97,7	-20,0	0,00

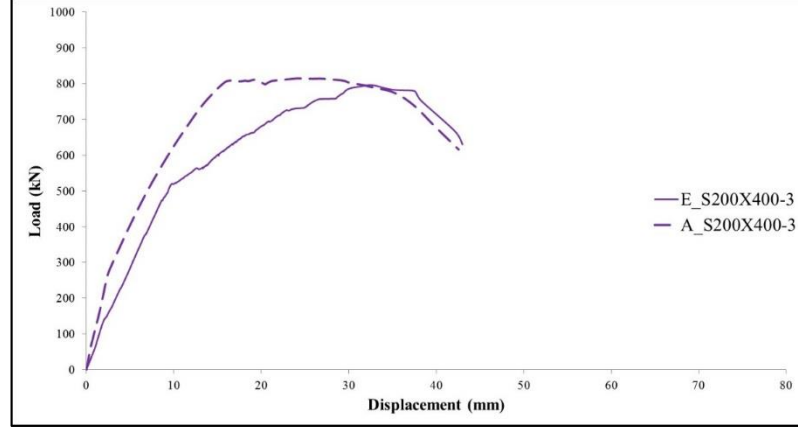
Tablo 8.19. ve 8.20. dikkatle incelendiğinde hem yük hem de yerdeğiştirme açısından sonlu eleman modelleri ile deney numuneleri benzer davranışı sergilemektedir. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında sonlu eleman modellerinin akma noktası için %17,70 ile %69,61, tepe noktası için %-0,37 ile %15,33 ve göçme noktası için %-0,94 ile %36,90 arasında değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında ise sonlu eleman modellerinin akma noktası için %14,3 ile %107,8 ve tepe noktası için %-45,1 ile %8,00 arasında değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modellerinin analizleri deney numunelerinin ölçülen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sonlu eleman modelleri ile deney numunelerinin göçme noktasındaki yerdeğiştirme değerleri aynıdır.

### 8.2.3. Seri-3 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması

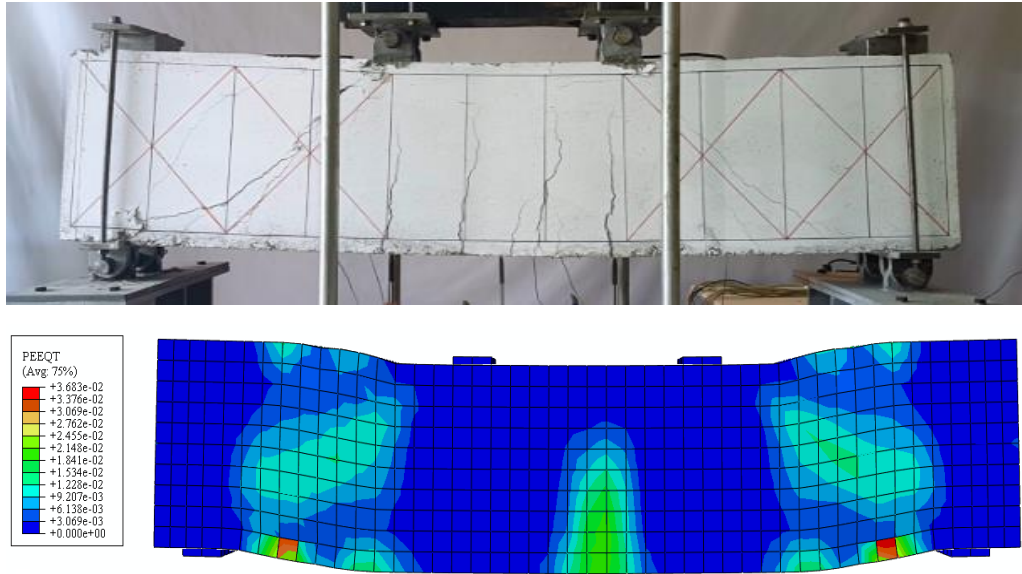
Seri-3 de deneyleri yapılan 5 adet betonarme kısa kirişin sonlu eleman analizlerinden yük-yer değiştirme ve gerilme dağılım verileri elde edilmiştir. Doğrulama amacıyla yapılan sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri, deneyler sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile uyumlu olması açısından, analizler aynı yer değiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu 5 kirişe ait elde edilen deneysel ve nümerik analiz sonuçları hem sayısal hemde grafiksel olarak sunulmuştur.

### 8.2.3.1. S200X400-3 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.44.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.45.'de verilmiştir.



Şekil 8.44. S200X400-3 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.45. S200X400-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

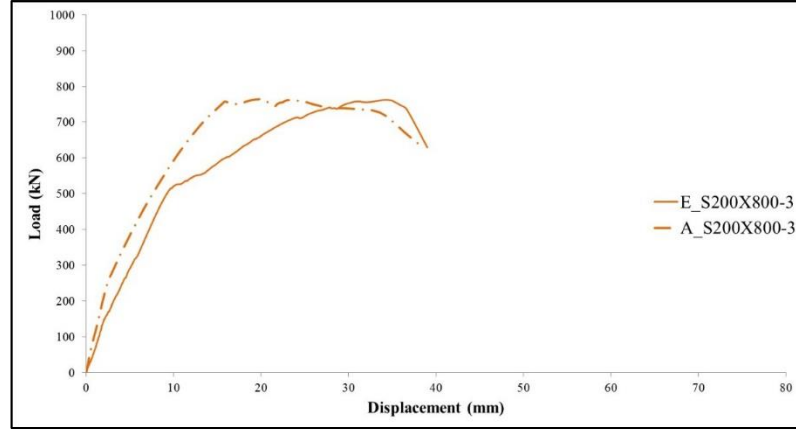
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman (SE) analiz sonuçları oranları Tablo 8.21.'de verilmiştir.

Tablo 8.21. S200X400-3 kirişi deney ve SE sonuçları

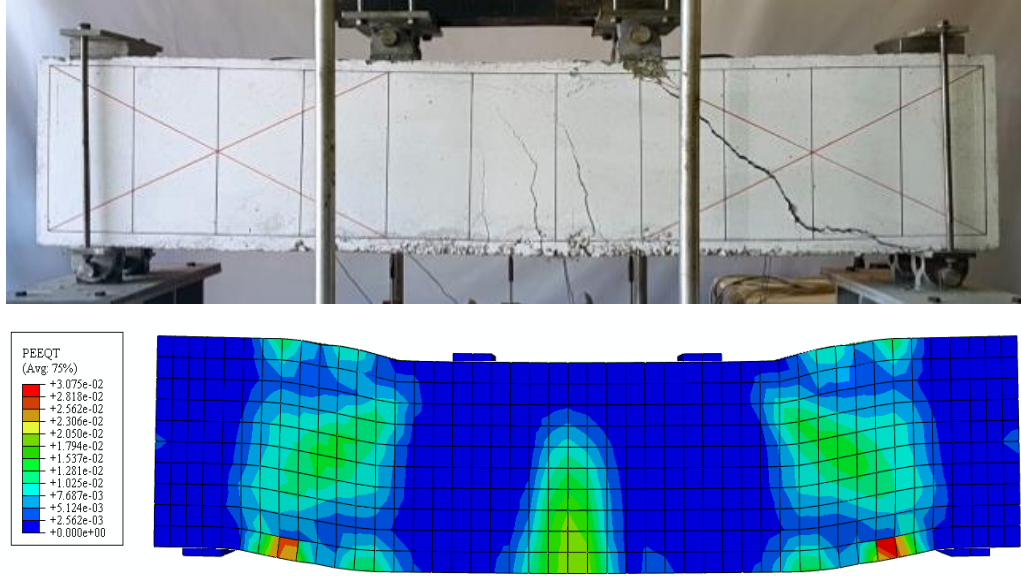
S200X400-3	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	517	9,7	805	16,1	0,64	0,60
Tepe ( $\delta_m$ )	796	32,5	811	28,0	0,98	1,16
Göçme ( $\delta_u$ )	630	43,0	615	43,0	1,02	1,01

### 8.2.3.2. S200X800-3 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.46.'da ve hasar mekanizması Şekil 8.47.'de verilmiştir.



Şekil 8.46. S200X800-3 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.47. S200X800-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.22.'de verilmiştir.

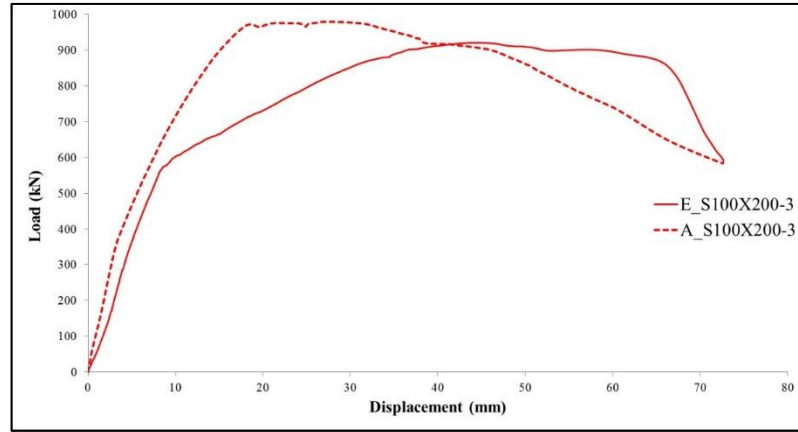
Tablo 8.22. S200X800-3 kirişi deney ve SE sonuçları

S200X800-3	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	515	9,6	754	15,9	0,68	0,60
Tepe ( $\delta_m$ )	762	34,5	761	24,0	1,00	1,44
Göçme ( $\delta_u$ )	630	39,0	626	39,0	1,01	1,01

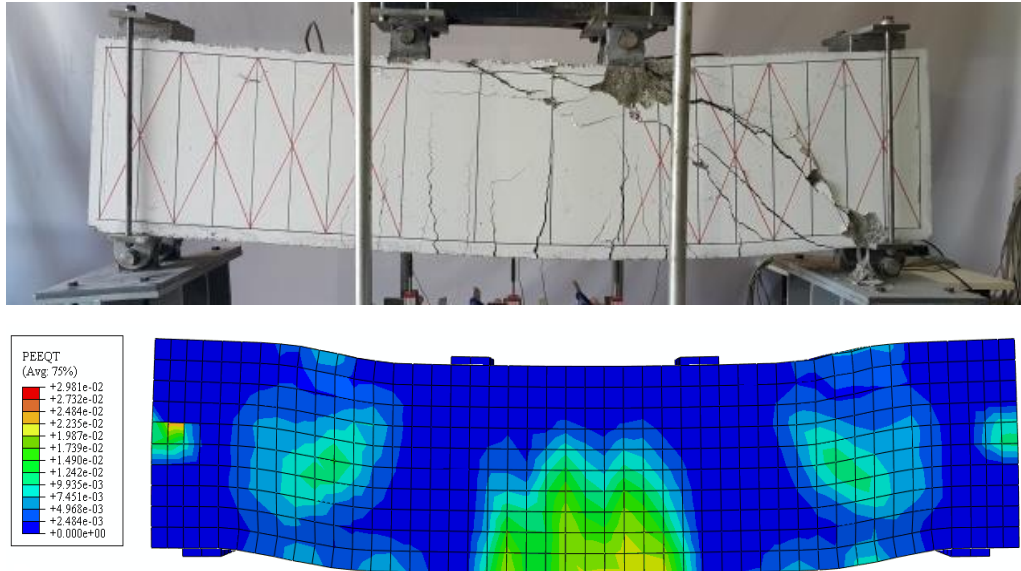
### 8.2.3.3. S100X200-3 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.48.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.49.'da verilmiştir.





Şekil 8.48. S100X200-3 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değıştirme grafiği



Şekil 8.49. S100X200-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

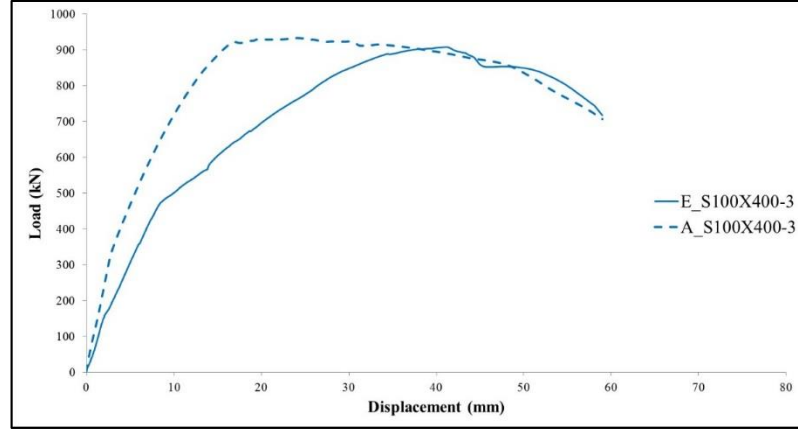
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değıştirme değeri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.23.'de verilmiştir.

Tablo 8.23. S100X200-3 kiriş deney ve SE sonuçları

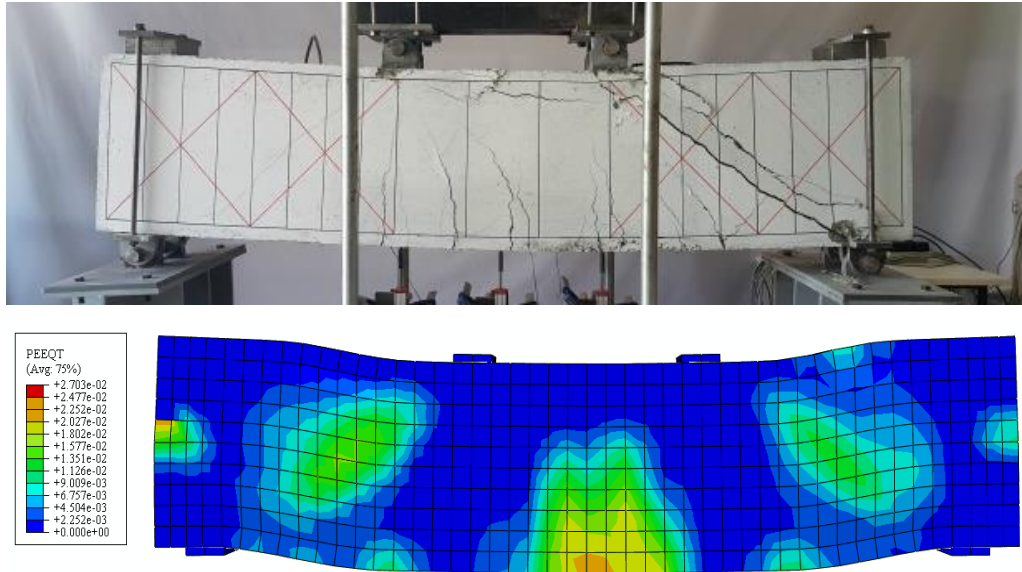
S100X200-3	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	575	8,7	970	17,8	0,59	0,49
Tepe ( $\delta_m$ )	920	44,1	976	32,0	0,94	1,38
Göçme ( $\delta_u$ )	587	72,7	583	72,6	1,01	1,00

#### 8.2.3.4. S100X400-3 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.50.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.51.'de verilmiştir.



Şekil 8.50. S100X400-3 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.51. S100X400-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

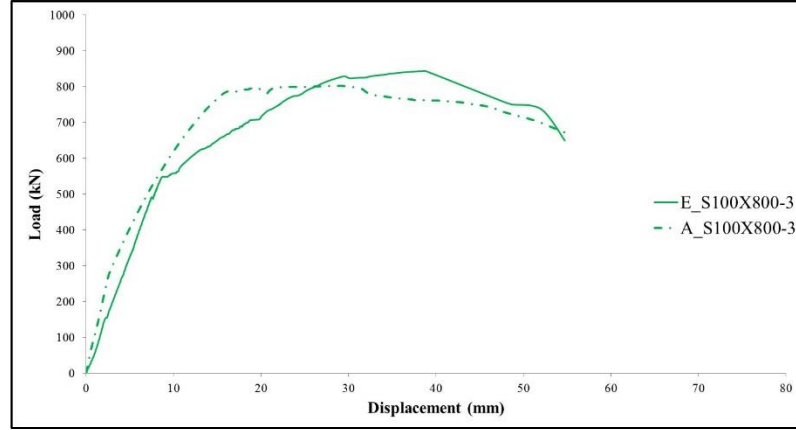
Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.24.'de verilmiştir.

Tablo 8.24. S100X400-3 kirişi deney ve SE sonuçları

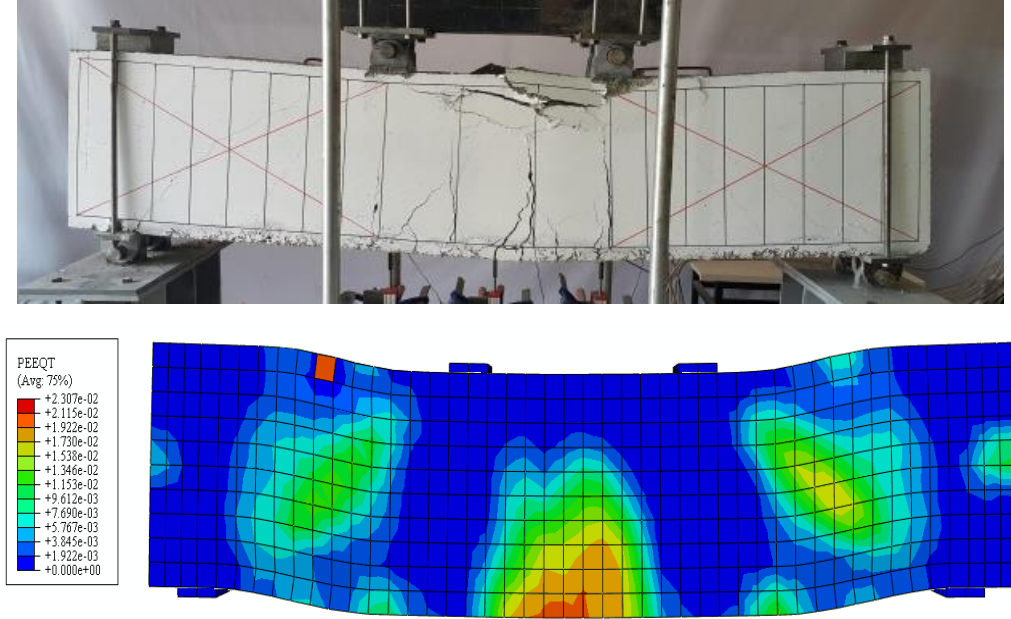
S100X400-3	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	504	10,2	920	17,1	0,55	0,60
Tepe ( $\delta_m$ )	908	41,2	922	27,0	0,98	1,53
Göçme ( $\delta_u$ )	718	59,0	706	59,0	1,02	1,00

### 8.2.3.5. S100X800-3 kirişinin SEA ile doğrulanması

Deney ve sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği Şekil 8.52.'de ve hasar mekanizması Şekil 8.53.'de verilmiştir.



Şekil 8.52. S100X800-3 deney ve sonlu eleman analizi yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.53. S100X800-3 deney ve sonlu eleman analizi hasar mekanizması

Yapılan deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait akma ve tepe noktasına karşılık gelen yük ve yer değiştirme değerleri ile deney ve sonlu eleman analiz sonuçları oranları Tablo 8.25.'de verilmiştir.

Tablo 8.25. S100X800-3 kirişi deney ve SE sonuçları

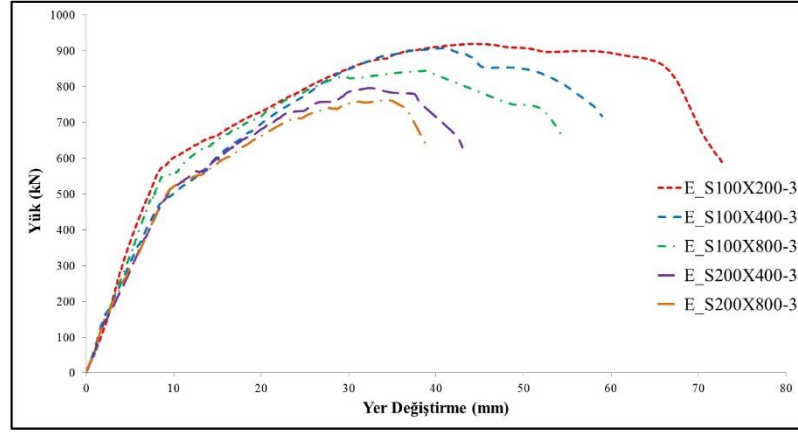
S100X800-3	Deney		SE		Deney/SE	
	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)	P (kN)	$\Delta$ (mm)
Akma ( $\delta_y$ )	519	9,1	785	15,8	0,66	0,58
Tepe ( $\delta_m$ )	843	37,1	797	30,0	1,06	1,24
Göçme ( $\delta_u$ )	650	54,7	671	55,0	0,97	1,00

### 8.2.3.6. Seri-3 deney numuneleri SEA sonuçları

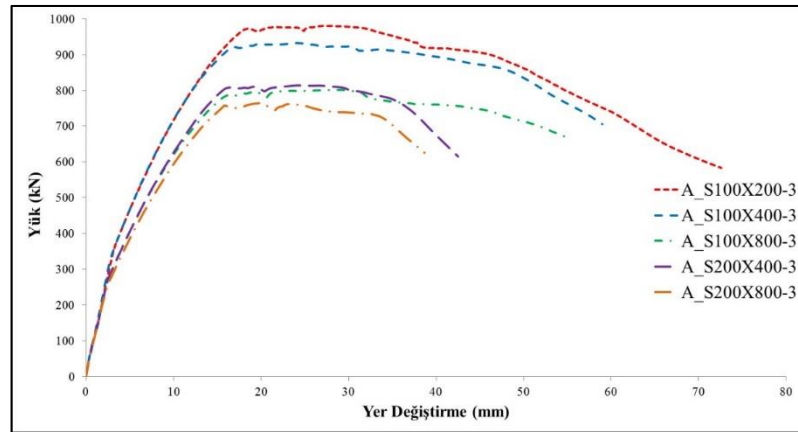
Her iki mesneti de sabit (sabit-sabit) olarak tasarlanan Seri-3 test numuneleri için Şekil 8.54. ve Şekil 8.55.'de deney ve sonlu eleman analiz sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur.

Her iki mesnetin de sabit olması nedeniyle mesnetlerde yatay yönde hareket meydana gelmediği için düşey yük etkisinde kiriş içerisinde ek çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

Bu ek çekme gerilmeleri nedeniyle Seri-3 kirişleri basit mesnetli sistemde meydana gelen eğilme kırılması yerine yarı-gevrek davranış gösteren kesmeli eğilme kırılması davranışı sergilemiştir.



Şekil 8.54. Seri-3 kirişlerine ait deney sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.55. Seri-3 kirişlerine ait sonlu eleman analizi sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.54. ve Şekil 8.55.'de verilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında sonlu eleman modelinin daha rijit olmasına rağmen genel olarak deney numuneleri ile sonlu eleman modellerinin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir. Sonlu eleman modellerinin davranışının daha rijit olmasının nedeni, deney numunesine göre sonlu eleman modelinin geometrisinin, malzemesinin, mesnet ve yük aktarma düzeneklerinin daha kusursuz olmasıdır. Şekil 8.54. ve Şekil 8.55. dikkatle incelendiğinde donatının akmasına kadar sonlu eleman modelinin deney numunesine göre daha rijit davranış gösterdiği donatı aktıktan sonra ise sonlu eleman modelinin

dayanımındaki azalmaların deney numunesine göre daha hızlı olduğu gözlemlenmektedir. Seri-3 kirişleri yapılan deney süresince oluşan eğilme ve kesme çatlaklarının gelişimi gerçekleştirilen sonlu eleman analizi ile doğrulanmıştır.

Deney numuneleri ve sonlu eleman modellerinin sonuçları yük değerleri için Tablo 8.26. ve yerdeğiştirme değerleri için Tablo 8.27.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 8.26. Seri-3 deney ve SE sonucu elde edilen yük değerleri

Deney Numunesi	Yük-P (kN)											
	Deney			SE			SE/Deney			SE-Deney Yüzde Değişimi		
	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S200X 800-3	515	762	630	754	761	626	1,46	1,00	0,99	46,41	-0,1	-0,63
S200X 400-3	517	796	630	805	811	615	1,56	1,02	0,98	55,71	1,88	-2,38
S100X 800-3	519	843	650	785	797	671	1,51	0,95	1,03	51,25	-5,5	3,23
S100X 400-3	504	908	718	920	922	706	1,83	1,02	0,98	82,54	1,54	-1,67
S100X 200-3	575	920	587	970	976	583	1,69	1,06	0,99	68,70	6,09	-0,68
R100-2	487	811	637	793	808	631	1,63	1,00	0,99	62,83	-0,4	-0,94

Tablo 8.27. Seri-3 deney ve SE sonucu elde edilen yer değiştirme değerleri

Deney Numunesi	Yer Değiştirme- $\Delta$ (mm)											
	Deney			SE			SE/Deney			SE-Deney Yüzde Değiştirme		
	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )	Akma ( $\delta y$ )	Tepe ( $\delta m$ )	Göçme ( $\delta u$ )
S200X 800-3	9,6	34,5	39,0	15,9	24	39,0	1,66	0,70	1,00	65,63	-30,4	0,00
S200X 400-3	9,7	32,5	43,0	16,1	28	43,0	1,66	0,86	1,00	65,98	-13,9	0,00
S100X 800-3	9,1	37,1	54,7	15,8	30	54,7	1,78	0,81	1,00	73,63	-19,2	0,00
S100X 400-3	10,2	41,2	59,0	17,1	27	59,0	1,92	0,66	1,00	67,65	-34,5	0,00
S100X 200-3	8,7	44,1	72,7	17,8	32	72,7	2,05	0,73	1,00	104,60	-27,5	0,00
R100-2	8,6	30,0	45,9	17,0	24	45,9	1,98	0,80	1,00	97,67	-20,0	0,00

Tablo 8.26. ve 8.27. dikkatle incelendiğinde hem yük hem de yerdeğiştirme açısından sonlu eleman modelleri ile deney numuneleri benzer davranışı sergilemektedir. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yük taşıma kapasitesi açısından karşılaştırıldığında sonlu eleman modellerinin akma noktası için %46,41 ile %82,54, tepe noktası için %-0,10 ile %6,09 ve göçme noktası için %-0,63 ile %3,23 arasında değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modelleri sonuçları ile deney numuneleri yer değiştirme kapasitesi açısından karşılaştırıldığında ise sonlu eleman modellerinin akma noktası için %65,63 ile %104,60 ve tepe noktası için %-34,50 ile %13,90 arasında değişen oranlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonlu eleman modellerinin analizleri deney numunelerinin ölçülen maksimum yerdeğiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle sonlu eleman modelleri ile deney numunelerinin göçme noktasındaki yerdeğiştirme değerleri aynıdır.

### 8.3. Parametrik Çalışma Modelleri

Bu çalışmanın deneysel kısmında eğilme donatısı, etriye ve önerilen çapraz kesme donatılarının betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımına ve davranışına etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde zaman, bütçe, iş gücü ve gerekli araç ve gereçlerin temin edilmesi gibi zorluklar göz önüne alındığında deneysel olarak incelenemeyen parametreler için bu bölümde parametrik bir çalışma yapılmıştır.

Parametrik çalışmalar çapraz kesme donatılı ve birinci dereceden hiperstatik sistem (sabit-sabit) olan Seri-2 numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm sonlu eleman analizlerinde malzeme modelleri ve boyutlar sabit tutulurken değişken olarak, eğilme donatısı, çapraz kesme donatısı ve etriye için çap ve akma dayanım değerleri ayrı ayrı parametreler halinde incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışma hakkında özet bilgi Tablo 8.28.'de verilmiştir.

Parametrik çalışmada etriye ve çapraz kesme donatısı için donatı çapı Ø10 ve Ø12 alınırken akma dayanımları 420 ve 500 MPa alınmıştır. Eğilme donatısı için donatı çapları Ø12, Ø14, Ø18 ve Ø20 alınırken akma dayanımları 485 ve 550 MPa alınmıştır.

Tablo 8.28. Parametrik çalışma modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Eğilme Donatısı	Ø16	Ø12	485	485 / 550
		Ø14		
		Ø18		
		Ø20		
Çapraz Kesme Donatı	Ø8	Ø10 Ø12	420	420 / 500
Etriye ve Çapraz Kesme Donatısı	Ø8	Ø10 Ø12	420	420 / 500

Deneysel sonuçların doğrulanması kısmında, sonlu eleman (SE) analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri deneyler sonucu elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri ile uyumlu olması açısından aynı yer değiştirme değerine kadar gerçekleştirilmiştir. Ancak parametrik çalışma kısmında aynı yer değiştirme değerleri yerine beton ve donatıda meydana gelen şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Bu amaçla TDY2007’de betonarme elemanların kesit birim şekil değiştirme kapasiteleri bölümündeki, kesit göçme sınırı (GÇ) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekil değiştirme değeri üst sınırı 0,018 ve donatı çeliği birim şekil değiştirme değeri üst sınırı 0,06 değerleri göz önüne alınmıştır [144]. Bunun sonucu olarak kesme davranışı gösteren kirişlerde beton basınç birim şekil değiştirme değeri üst sınıra ulaşırken, sünek davranış gösteren parametrik çalışma kirişlerinde donatı çeliği birim şekil değiştirme değeri üst sınıra ulaşmıştır.

### 8.3.1. Eğilme donatısı çap modelleri

Çapraz kesme donatısının farklı eğilme donatısı çapları ile kullanımı durumunda kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesi amacıyla Seri-2 numuneleri üzerinde parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha önce deneyi ve sonlu eleman (SE) analizi gerçekleştirilen Ø16 eğilme donatı çapının yanı sıra Ø12, Ø14, Ø18 ve Ø20 donatı çapları kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda

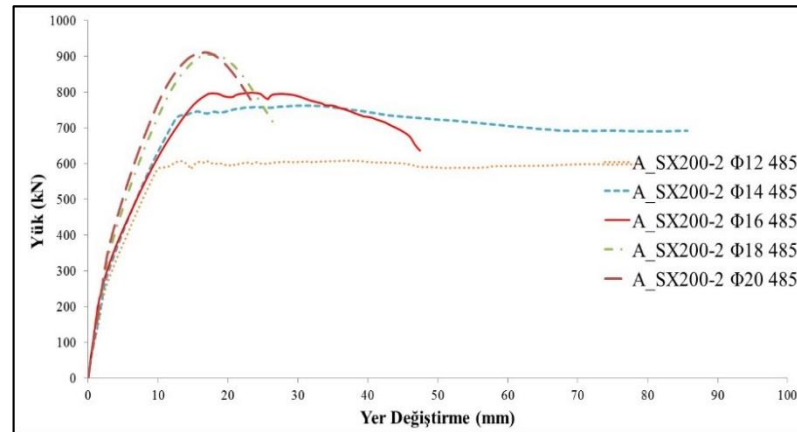


kullanılan eğilme donatısı için donatı çekme deneyinden elde edilen akma dayanımı 485 MPa olarak alınmıştır (Tablo 8.29.). Deneysel ve nümerik çalışmalar bu akma değeri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece donatı çapı ve akma dayanımındaki bu değişimin betonarme kısa kirişin davranışını, dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ne ölçüde etkilediği nümerik olarak incelenmiştir.

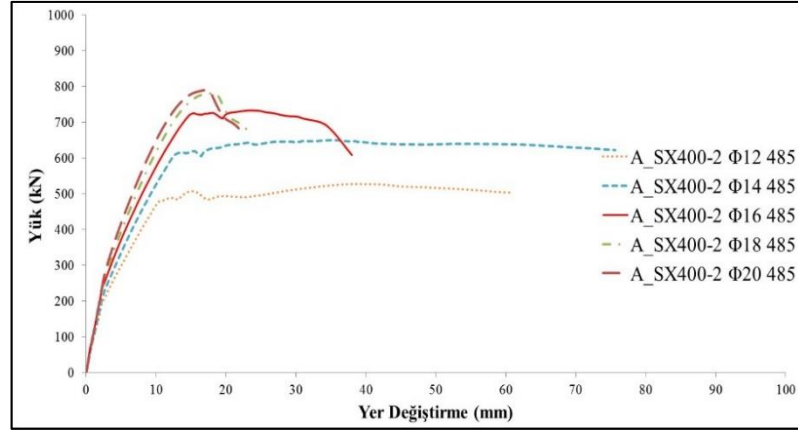
Tablo 8.29. Eğilme donatısı çapı parametrik modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Eğilme Donatısı	Ø16	Ø12	485	485
		Ø14		
		Ø18		
		Ø20		

Çapraz kesme donatısının farklı eğilme donatısı çapları ile kullanımına karşılık gelen parametrik çalışmalar SX200, SX400 ve SX800 olarak isimlendirilen tüm Seri-2 kiriş modelleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 8.56-Şekil 8.58.'de ve maksimum yük (V-kN) ve maksimum yer değiştirme ( $\Delta$ -mm) değerleri Tablo 8.30.'da sunulmuştur.

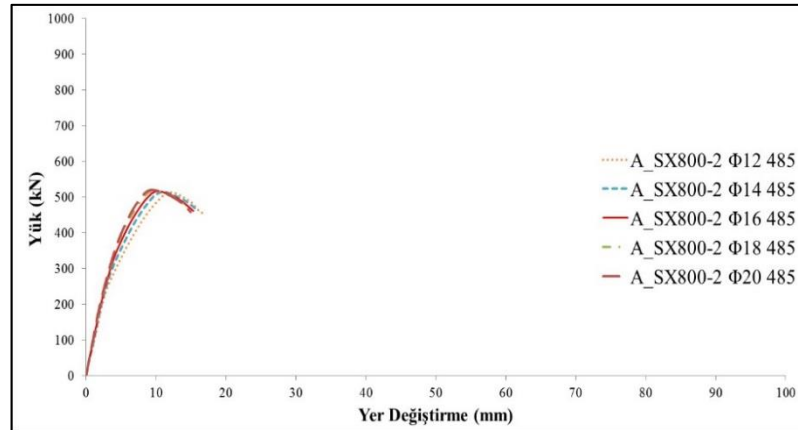


Şekil 8.56. SX200-2 kirişi eğilme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.57. SX400-2 kirişi eğilme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.56. ve Şekil 8.57. dikkatle incelendiğinde çapraz kesme donatısının kiriş davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmekle birlikte boyuna donatı çapının artırılması ile çekme donatısı oranının maksimum donatı oranına yaklaştığı ve beklendiği gibi kiriş davranışının gevrek hale geldiği görülmektedir. Çekme donatısı oranının maksimum donatı oranına yaklaşması durumunda çapraz kesme donatılarının dayanıma olumlu yönde etki etmesine rağmen kiriş davranışı yine gevrek olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 8.58. SX800-2 kirişi eğilme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.58. incelendiğinde ise kesme donatısız kiriş modeline karşılık gelen S800 kirişlerinde çapraz kesme donatısı uygulansa dahi davranışın gevrek olduğu ve çapraz kesme donatısının tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında önerilen çapraz kesme donatılarının kiriş kesme bölgelerinde

etriyelerle birlikte kullanılması durumunda daha etkin olduğu ve davranışı hem dayanım hem de süneklik açısından iyileştirdiği söylenebilir. Ayrıca, Şekil 8.58.'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi boyuna donatıların kesme yüklerini karşılamadığı ve dolayısıyla boyuna donatı çapının değiştirilmesinin kesme bölgesinde kesme donatısı bulunmayan kiriş davranışını etkilemediği ve davranışa betonun hakim olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.30. Seri-2 numuneleri eğilme donatı çapı parametrik SE sonuçları

Test Numunesi L-485 Mpa	Ø12		Ø14		Ø16		Ø18		Ø20	
	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)
A_SX200-2	607	79,1	762	85,7	797	47,5	903	26,9	910	23,4
A_SX400-2	527	60,9	649	75,6	733	38,0	781	23,3	789	22,3
A_SX800-2	513	16,6	514	15,9	516	15,3	517	14,8	519	14,9

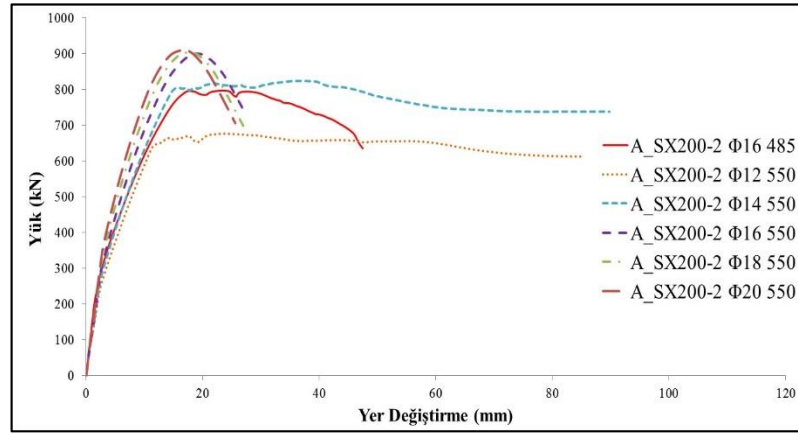
### 8.3.2. Eğilme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri

Çapraz kesme donatısının farklı eğilme donatısı çapları ve akma dayanımı ile kullanımı durumunda kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesi amacıyla Seri-2 numuneleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Daha önce deneyi ve sonlu eleman (SE) analizi gerçekleştirilen Ø16 eğilme donatı çapının yanı sıra Ø12, Ø14, Ø18 ve Ø20 donatı çapları ve 550 MPa akma dayanımı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır (Tablo 8.31.). Donatı çap ve akma dayanımındaki bu değişimin betonarme kısa kirişin davranışını, dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ne ölçüde etkilediği nümerik olarak incelenmiştir.

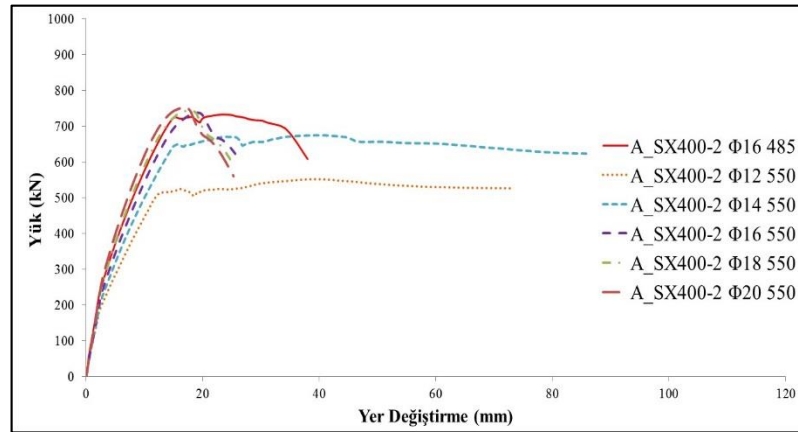
Tablo 8.31. Eğilme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Eğilme Donatısı	Ø16	Ø12	485	550
		Ø14		
		Ø18		
		Ø20		

Çapraz kesme donatısının farklı eğilme donatı çapları ve akma dayanımı ile kullanımına karşılık gelen parametrik çalışmalar SX200, SX400 ve SX800 olarak isimlendirilen tüm Seri-2 kiriş modelleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 8.59-Şekil 8.61.'de ve maksimum yük (V-kN) ve maksimum yer değiştirme ( $\Delta$ -mm) değerleri Tablo 8.32.'de sunulmuştur.



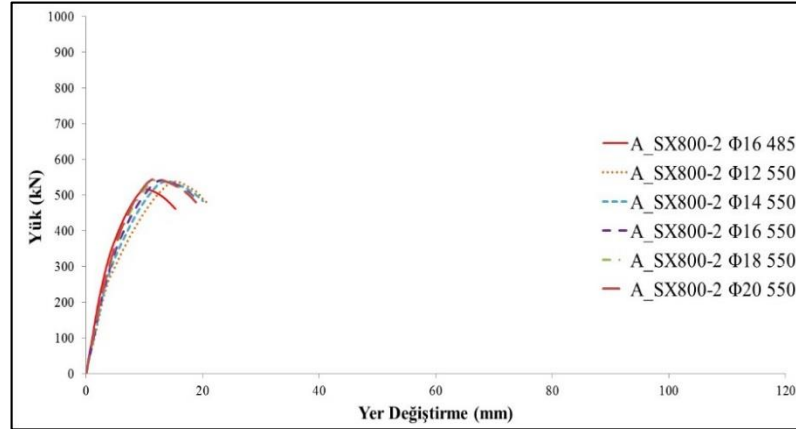
Şekil 8.59. SX200-2 kirişi eğilme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.60. SX400-2 kirişi eğilme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.59. ve Şekil 8.60. dikkatle incelendiğinde çapraz kesme donatısının kiriş davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmekle birlikte boyuna donatı çapının ve akma dayanımının artırılması ile çekme donatısı oranının maksimum donatı oranına yaklaştığı ve beklendiği gibi kiriş davranışının gevrek hale geldiği görülmektedir. Çekme donatısı oranının maksimum donatı oranına yaklaşması

durumunda çapraz kesme donatıları dayanıma olumlu yönde etki etmesine rağmen kiriş davranışı yine gevrek olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 8.61. SX800-2 kirişi eğilme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.61. incelendiğinde ise kesme donatısız kiriş modeline karşılık gelen S800 kirişlerinde çapraz kesme donatısı uygulansa dahi davranışın gevrek olduğu ve çapraz kesme donatısının tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla çapraz kesme donatılarının kiriş kesme bölgelerinde etriyelerle birlikte kullanılması durumunda daha etkin olduğu ve davranışı hem dayanım hem de süneklik açısından iyileştirdiği söylenebilir. Ayrıca, Şekil 8.61.'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi boyuna donatıların kesme yüklerini karşılamadığı ve dolayısıyla boyuna donatı çapının ve akma dayanımının değiştirilmesinin kesme bölgesinde kesme donatısı bulunmayan kiriş davranışını etkilemediği ve davranışa betonun hakim olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.32. Seri-2 numuneleri eğilme donatı çap ve akma dayanımı parametrik SE sonuçları

Test Numunesi	Ø12		Ø14		Ø16		Ø18		Ø20	
	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)
A_SX200-2	678	84,8	824	89,8	901	43,3	903	43,2	910	43,5
A_SX400-2	551	73,1	675	85,8	737	32,1	744	32,2	752	32,5
A_SX800-2	537	21,0	538	20,0	540	19,3	542	18,9	544	18,8

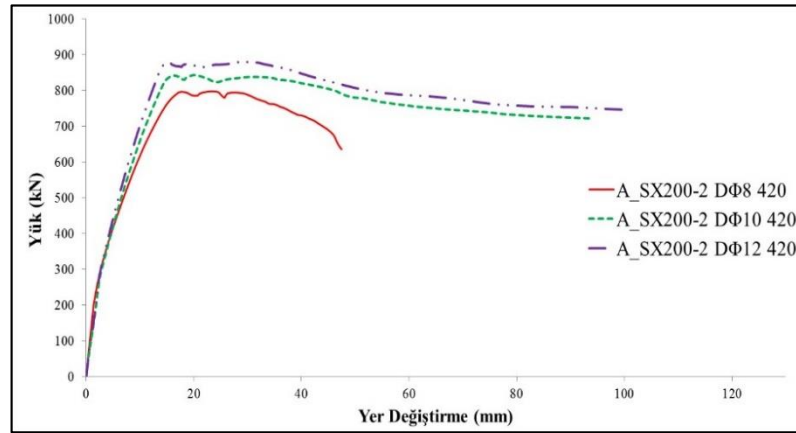
### 8.3.3. Çapraz kesme donatısı çap modelleri

Çapraz kesme donatısının kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesi amacıyla çapraz kesme donatı çapı değiştirilerek Seri-2 numuneleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Daha önce deneyi ve sonlu eleman (SE) analizi gerçekleştirilen Ø8 çapraz kesme donatı çapının yanı sıra Ø10 ve Ø12 çapraz kesme donatı çapları kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır (Tablo 8.33.). Çapraz kesme donatı çapındaki bu değişimin betonarme kısa kirişin davranışını, dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ne ölçüde etkilediği nümerik olarak incelenmiştir.

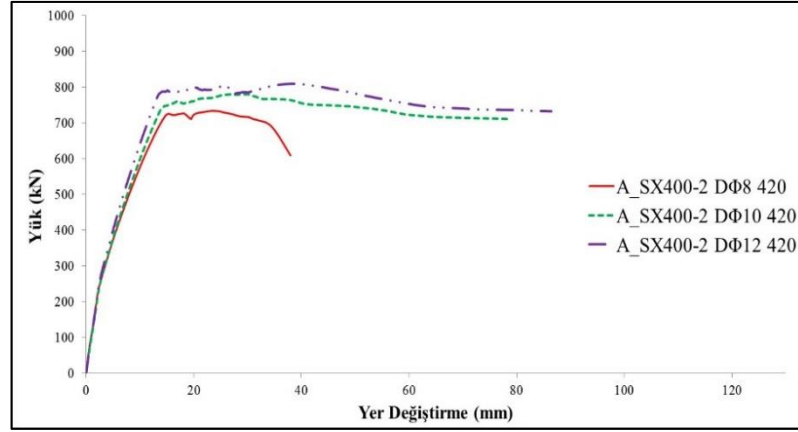
Tablo 8.33. Çapraz kesme donatısı çapı parametrik modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Çapraz Kesme Donatı	Ø8	Ø10 Ø12	420	420

Çapraz kesme donatısının farklı çapları ile kullanımına karşılık gelen parametrik çalışmalar SX200, SX400 ve SX800 olarak isimlendirilen tüm Seri-2 kiriş modelleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 8.62. - Şekil 8.64.'de ve maksimum yük (V-kN) ve maksimum yer değiştirme ( $\Delta$ -mm) değerleri Tablo 8.34.'de sunulmuştur.

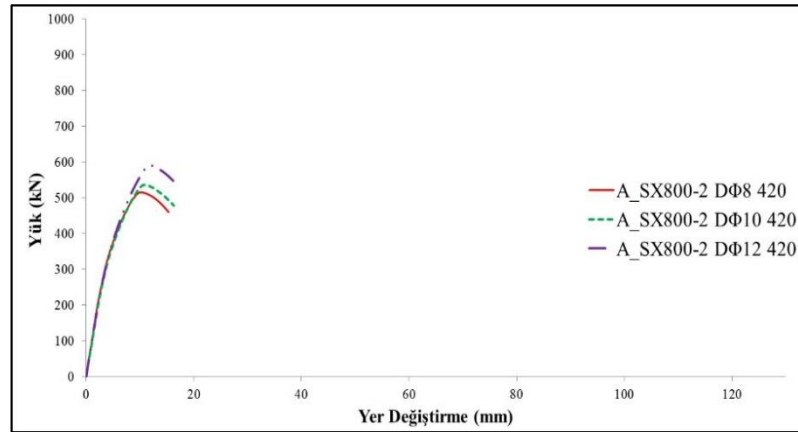


Şekil 8.62. SX200-2 kirişi çapraz kesme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.63. SX400-2 kirişi çapraz kesme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.62. ve Şekil 8.63. dikkatle incelendiğinde çapraz kesme donatısının kiriş davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu gör¼lmektedir. Çapraz kesme donatı çapının artmasıyla yük taşıma kapasitesi ve süneklikte artışlar meydana gelmektedir. Sonuçlar dikkatle incelendiğinde kullanılan çapraz kesme donatısı çapının Ø8 yerine Ø10 kullanılması durumunda SX200-2 kirişlerinin sünekliğinde %100 (Şekil 8.62.) ve SX400-2 kirişlerinin sünekliğinde ise %130 (Şekil 8.63.) civarında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. Çapraz kesme donatısı çapının Ø8 yerine Ø12 kullanılması durumunda ise SX200-2 kirişlerinin sünekliğinde %126 (Şekil 8.62.) ve SX400-2 kirişlerinin sünekliğinde ise %150 (Şekil 8.63.) civarında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.



Şekil 8.64. SX800-2 kirişi çapraz kesme donatı çapı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.64. incelendiğinde ise kesme donatısız kiriş modeline karşılık gelen S800 kirişlerinde çapraz kesme donatısı uygulansa dahi davranışın gevrek olduğu ve çapraz

kesme donatısının tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, Şekil 8.64.'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi çapraz donatı çapının artırılması durumunda kesme bölgesinde kesme donatısı bulunmayan kiriş davranışını etkilemediği ve davranışa betonun hakim olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.34. Seri-2 numuneleri çapraz kesme donatı çapı parametrik SE sonuçları

Test Numunesi	Ø8		Ø10		Ø12	
	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)
A_SX200-2	797	47,5	843	93,8	880	100,6
A_SX400-2	733	38,0	780	78,2	808	86,5
A_SX800-2	516	15,3	536	16,3	590	17,4

### 8.3.4. Çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri

Çapraz kesme donatısının kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesi amacıyla çapraz kesme donatı çapı ve akma dayanımı değiştirilerek Seri-2 numuneleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Daha önce deneyi ve sonlu eleman (SE) analizi gerçekleştirilen Ø8 çapraz kesme donatı çapının yanı sıra Ø10 ve Ø12 çapraz kesme donatı çapları ve 500 MPa akma dayanımı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır (Tablo 8.35.). Çapraz kesme donatı çapı ve akma dayanımındaki bu değişimin betonarme kısa kirişin davranışını, dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ne ölçüde etkilediği nümerik olarak incelenmiştir.

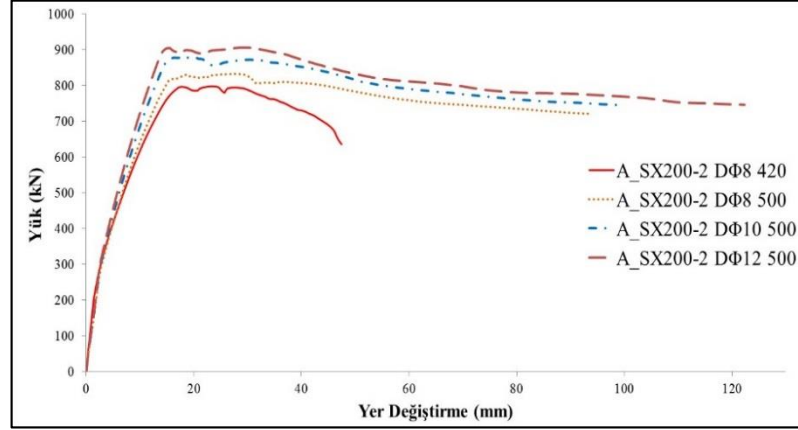
Tablo 8.35. Çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Çapraz Kesme Donatısı	Ø8	Ø10 Ø12	420	500

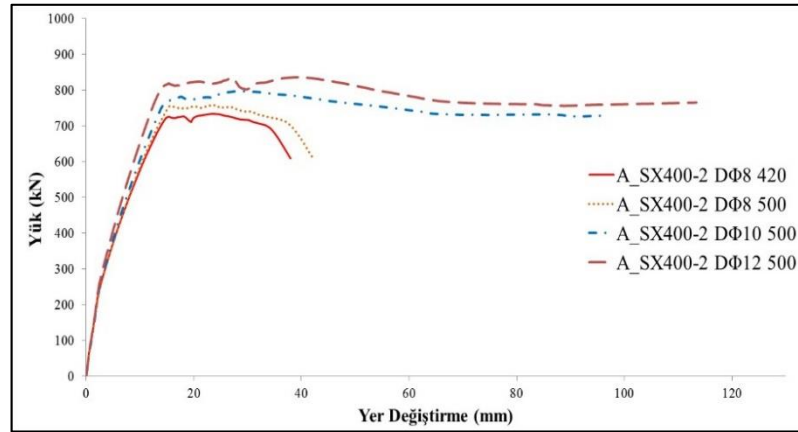
Çapraz kesme donatısının farklı çapları ve akma dayanımı ile kullanımına karşılık gelen parametrik çalışmalar SX200, SX400 ve SX800 olarak isimlendirilen tüm Seri-2 kiriş modelleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda elde



edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 8.65. - Şekil 8.67.'de ve maksimum yük (V-kN) ve maksimum yer değiştirme ( $\Delta$ -mm) değerleri Tablo 8.36.'da sunulmuştur.



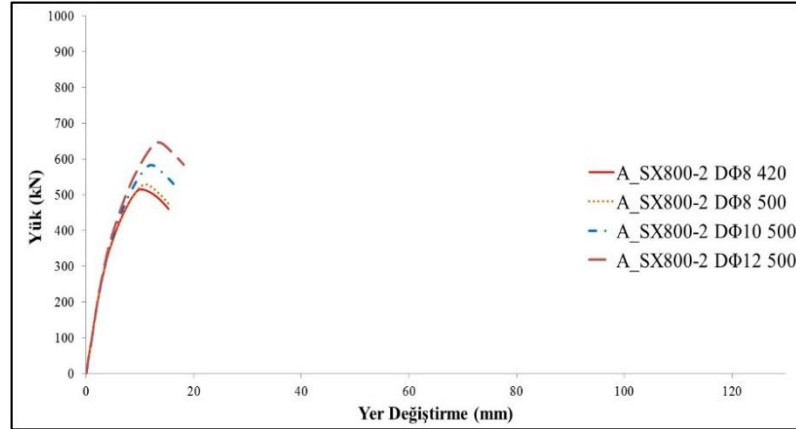
Şekil 8.65. SX200-2 kirişi çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.66. SX400-2 kirişi çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.65. ve Şekil 8.66. dikkatle incelendiğinde çapraz kesme donatısının kiriş davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu gsterilmektedir. Çapraz kesme donatı çapının ve akma dayanımının artmasıyla yük taşıma kapasitesi ve suneqlikte ciddi oranda artışlar meydana gelmektedir. Sonuçlar dikkatle incelendiğinde kullanılan çapraz kesme donatısı çapının Ø8 yerine Ø10 kullanılması durumunda SX200-2 kirişlerinin suneqliğinde %100 (Şekil 8.62.) ve SX400-2 kirişlerinin suneqliğinde ise %130 (Şekil 8.63.) civarında iyileşmeler olduğu gsterilmiştir. Çapraz kesme donatısı çapının Ø8 yerine Ø12 kullanılması durumunda ise SX200-2 kirişlerinin suneqliğinde %126

(Şekil 8.62.) ve SX400-2 kirişlerinin süneklüğünde ise %150 (Şekil 8.63.) civarında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.



Şekil 8.67. SX800-2 kirişi çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.67. incelendiğinde ise kesme donatısız kiriş modeline karşılık gelen S800 kirişlerinde çapraz kesme donatısı uygulansa dahi davranışın gevrek olduğu ve çapraz kesme donatısının tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, Şekil 8.67.'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi çapraz donatı çapının ve akma dayanımının artırılması durumunda yük taşıma kapasitesinde az miktarda artış olmasına rağmen kesme bölgesinde kesme donatısı bulunmayan kiriş davranışı gösterdiği ve davranışa betonun hakim olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.36. Seri-2 numuneleri çapraz kesme donatı çap ve akma dayanımı parametrik SE sonuçları

Test Numunesi	Ø8		Ø10		Ø12	
	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)	V (kN)	Δ (mm)
A_SX200-2	833	93,6	879	100,0	906	122,3
A_SX400-2	758	42,1	797	97,1	835	113,4
A_SX800-2	530	15,5	583	16,7	647	18,1

### 8.3.5. Etriye ve çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı modelleri

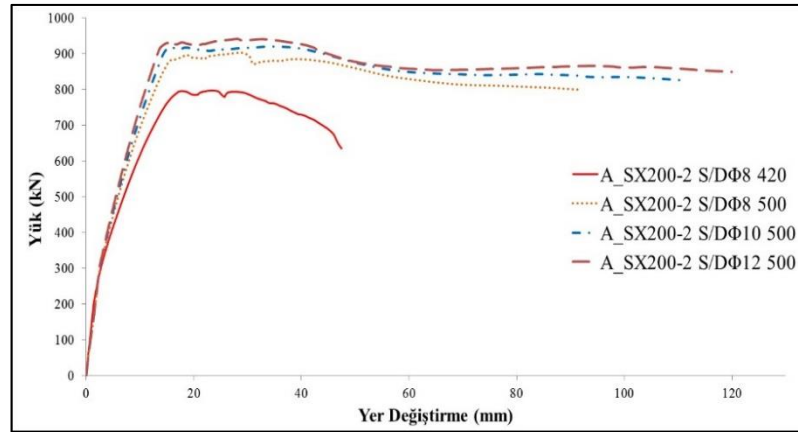
Çapraz kesme donatısının kiriş davranışına etkilerinin belirlenmesi amacıyla etriye ve çapraz kesme donatı çapı ve akma dayanımı değiştirilerek Seri-2 numuneleri üzerinde parametrik çalışma yapılmıştır. Daha önce deneyi ve sonlu eleman (SE) analizi

gerçekleştirilen Ø8 etriye ve çapraz kesme donatı çapının yanı sıra Ø10 ve Ø12 etriye ve çapraz kesme donatı çapları ile 500 MPa akma dayanımı kullanılarak parametrik çalışmalar yapılmıştır (Tablo 8.37.). Etriye ve çapraz kesme donatı çapı ve akma dayanımındaki bu değişimin betonarme kısa kirişin davranışını, dayanım ve yer değiştirme kapasitesini ne ölçüde etkilediği nümerik olarak incelenmiştir.

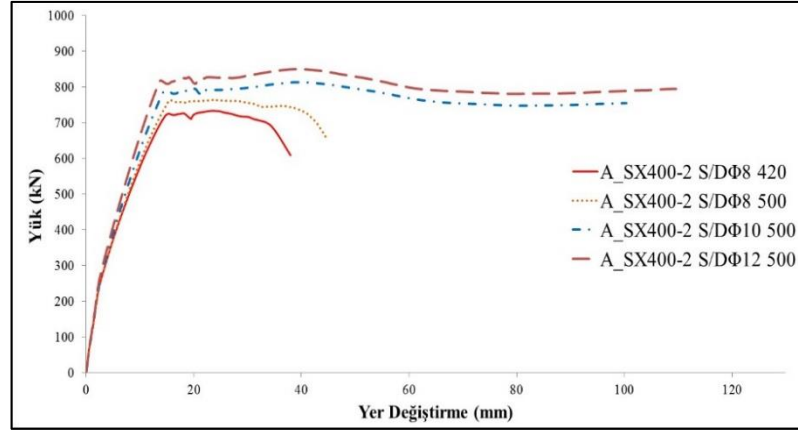
Tablo 8.37. Etriye ve çapraz kesme donatısı çap ve akma dayanımı parametrik modelleri

Parametre	Donatı Çapı (mm)		Donatı Akma Dayanımı (MPa)	
	Deney	Parametrik Çalışma	Deney	Parametrik Çalışma
Etriye ve Çapraz Kesme Donatısı	Ø8	Ø10 Ø12	420	500

Çapraz kesme donatısı ve etriyenlerin farklı çapları ve akma dayanımı ile kullanımına karşılık gelen parametrik çalışmalar SX200, SX400 ve SX800 olarak isimlendirilen tüm Seri-2 kiriş modelleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 8.68. - Şekil 8.70.'de ve maksimum yük (V-kN) ve maksimum yer değiştirme ( $\Delta$ -mm) değerleri Tablo 8.38.'de sunulmuştur.

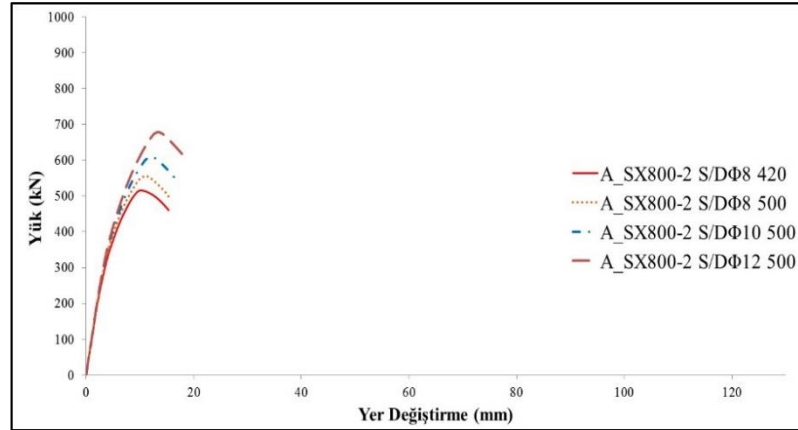


Şekil 8.68. SX200-2 kiriş etriye-çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 8.69. SX400-2 kirişi etriye-çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.68. ve Şekil 8.69. dikkatle incelendiğinde çapraz kesme donatısının kiriş davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmektedir. Çapraz kesme donatısı ve etriye çapının ve akma dayanımının artmasıyla yük taşıma kapasitesi ve süneklikte ciddi oranda artışlar meydana gelmektedir.



Şekil 8.70. SX800-2 kirişi etriye-çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik modeli yük-yer değiştirme grafiği

Şekil 8.70. incelendiğinde ise kesme donatısız kiriş modeline karşılık gelen S800 kirişlerinde çapraz kesme donatısı uygulansa dahi davranışın gevrek olduğu ve çapraz kesme donatısının tek başına yeterli olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, Şekil 8.70.'deki sonuçlardan da görüldüğü gibi çapraz kesme donatısı ve etriyenin çapının ve akma dayanımının artırılması durumunda yük taşıma kapasitesinde az miktarda artış olmasına rağmen kesme bölgesinde kesme donatısı bulunmayan kiriş davranışı gösterdiği ve davranışa betonun hakim olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 8.38. Seri-2 numuneleri etriye-çapraz donatı çap ve akma dayanımı parametrik SE sonuçları

Test Numunesi SD-500 Mpa	Ø8		Ø10		Ø12	
	V (kN)	$\Delta$ (mm)	V (kN)	$\Delta$ (mm)	V (kN)	$\Delta$ (mm)
A_SX200-2	904	91,4	921	111,7	941	119,9
A_SX400-2	763	44,9	813	100,4	850	109,6
A_SX800-2	555	15,3	610	16,7	678	18,0

## BÖLÜM 9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kısa kiriş davranışı gösteren betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve sünekliğinin artırılmasına yönelik olarak deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, literatürde yapılan birçok çalışmadan farklı olarak betonarme kısa kirişlerin tasarım aşamasında uygulanmak üzere yeni, basit ve etkin bir uygulama olarak “çapraz kesme donatısı” önerilmektedir. Bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılan önemli özelliklerinden biri de alternatif bir donatı tasarım düzeni öneriyor olmasıdır. Önerilen bu tasarım düzeninde, çapraz kesme donatıları kiriş yan yüzeylerinde enine donatılar arasına bağlanarak uygulanmaktadır.

Deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada 19 adet betonarme kısa kirişin deneyleri yapılmış ve 76 farklı betonarme kısa kirişin 3 boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Deney düzeneği oluşturulurken iki farklı mesnet tipi kullanılmış olup deneylerin ilk aşamasında basit mesnetli sistem ikinci aşamada ise her ikisi de sabit mesnetli olan 1. dereceden hiperstatik sistem kullanılmıştır. Çapraz kesme donatısı uygulamasının etkinliğini daha belirgin olarak belirleyebilmek için sonlu elemanlar yardımıyla parametrik bir çalışma yapılmış ve deneysel çalışmada göz önüne alınamayan etriye, çapraz kesme donatısı ve eğilme donatısı çapı ve akma dayanımı gibi parametreler dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Betonarme kısa kirişlerin deney sonuçları kullanılarak sonlu eleman modelinin doğrulanması yapılmış ve sonlu eleman modelinin betonarme kiriş davranışını gerçekçi bir şekilde yansıttığı gösterilmiştir. Sonlu eleman modellerinin doğrulanması çalışmalarında en uygun analiz parametreleri belirlenmiş ve bu parametreler değiştirilmeden nümerik çalışmaların tamamı gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmaların ilk aşamasında elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Deneilerin tamamında boyuna donatı özellikleri sabit tutulmuş ve sadece etriye adım mesafeleri değiştirilerek kesme açısından kritik betonarme kısa kirişler oluşturulmuştur. Mesnetlenme şartı basit mesnetli (sabit-hareketli) olarak seçilen Seri-1 deney kirişlerinde etriye adım mesafeleri 100mm ile 800mm arasında değişen kirişler benzer davranışlar göstermiştir. Deney sonuçları dikkatle incelendiğinde, kirişlerin tamamında yükün artmasıyla hareketli mesnetin yatay doğrultuda hareket ettiği ve bu hareket etkisiyle çatlakların eğilme bölgesinde olduğu ve kirişlerin eğilme etkisiyle nihai duruma ulaştığı görülmektedir. Deneysel sonuçlardan da görüldüğü gibi basit mesnetli (sabit-hareketli) olarak deneyleri yapılan betonarme kirişlerde kesme davranışı belirgin olarak ortaya çıkmamaktadır.
2. Sünek davranış göstermesi beklenen referans R100-1 (s=100mm) kirişi ile aşırı gevrek davranış göstermesi beklenen S800-1 (s=800mm) kirişinin benzer davranışı göstermesinin tek açıklaması mesnetlenme şartlarıdır. Deney numunelerinin mesnetlerinin her ikisinin de sabit olarak seçilmesi durumunda aksel yük ve çekme gerilmelerinde artmalar oluşacağından kesme davranışı daha belirgin olarak ortaya çıkacaktır. Bu nedenle çapraz kesme donatısının betonarme kısa kirişlerin kesme dayanımına etkisini daha iyi gözlemleyebilmek için mesnetlerinin her ikisi de sabit olacak şekilde değiştirilmesine karar verilmiştir.
3. Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmaların ikinci aşamasında deneyleri gerçekleştirilmiş olan Seri-2 ile Seri-3 kirişlerinin mesnetlenme şartı her ikisi de sabit mesnetli olan birinci dereceden hiperstatik sistem olarak tasarlanmıştır.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında hem deney numunelerinin hem de parametrik çalışmada kullanılan sonlu eleman modellerinin mesnetlerinin her ikisi de sabit olarak seçilerek deneyler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneyler ve nümerik çalışmalar sonucunda bulunan sonuçlar incelenmiş ve çapraz donatılı her bir numune, referans numunesi ve çapraz donatı bulunmayan numune ile karşılaştırılarak çapraz

kesme donatısının kiriş davranışına etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur;

1. Çapraz kesme donatıları kesme çatlaklarının oluşumuna engel olamamakla beraber kesme kuvvetinin düşük değerlerinde çatlak genişliklerinin ilerlemesine engel olmakta ve kuvvetin artırılması ile çatlak genişliğindeki ilerlemeyi beklendiği gibi önemli ölçülerde yavaşlatmaktadır. Çapraz kesme donatısı kullanılan betonarme kirişlerin çapraz kesme donatısı kullanılmayan kirişlere göre maksimum yerdeğiştirme kapasitelerinde %20 ( $s=200\text{mm}$ ) ve %123 ( $s=400\text{mm}$ ) civarında artışı meydana gelmiştir. Dolayısıyla kesme kritik davranış gösteren betonarme kısa kirişlerde çapraz kesme donatısı kullanımıyla kiriş davranışında süneklik açısından önemli iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. Özellikle gevrek davranış gösteren  $s=400\text{mm}$  olan kirişlerin davranışı sünek davranışa ve sünek davranış olarak tanımlanabilecek  $s=200\text{mm}$  olan kirişlerin davranışı da daha sünek hale dönüşmüştür.
2. Çapraz kesme donatısı kullanılan betonarme kirişlerin çapraz kesme donatısı kullanılmayan kirişlere oranla çok daha fazla yer değiştirme sünekliğine ve enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir.
3. Referans kirişi ile karşılaştırıldığında  $s=400\text{mm}$  olan kirişlerde %37 olan maksimum yerdeğiştirme kapasitesi çapraz kesme donatısı kullanılmasıyla %82 lere yükselmiş ve bu artış  $s=200\text{mm}$  olan kirişlerde %96 ile %114 seviyelerinde bulunmuştur.
4. Çapraz kesme donatısı kullanılan betonarme kirişlerin çapraz kesme donatısı kullanılmayan kirişlere göre maksimum yük taşıma kapasitelerinde %11 ( $s=200\text{mm}$ ) ve %28 ( $s=400\text{mm}$ ) civarında artışı meydana gelmiştir. Dolayısıyla kesme kritik davranış gösteren betonarme kısa kirişlerde çapraz kesme donatısı kullanımıyla kiriş davranışında yük taşıma kapasitesi açısından önemli iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.



5. Referans kirişi ile karşılaştırıldığında  $s=400\text{mm}$  olan kirişlerde %69 olan maksimum yük taşıma kapasitesi çapraz kesme donatısı kullanılmasıyla %88 lere yükselmiş ve bu artış  $s=200\text{mm}$  olan kirişlerde %91 ile %100 aralığında bulunmuştur.
6. Seri-2 ve Seri-3 kirişlerinin deneylerinde bulunan kesme kuvveti değerleri, farklı hesap modelleri ve TDY2007 göre hesaplanarak sonuçlar irdelenmiştir. Deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında beklendiği gibi TDY2007 nin sonuçları güvenli tarafta kalmaktadır. Deney sonuçlarına en iyi uyum gösteren hesap yöntemleri plastik kafes kiriş modeli ile strut and tie modelleridir. Klasik kafes kiriş modeline ait sonuçların çok daha düşük çıkmasının nedeni ise hesaplarda beton ve boyuna donatıların katkısının dikkate alınmamasıdır.
7. Sonlu eleman modellerinin doğrulanması için deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak eğilme ve kesme çatlakları ile çatlak formlarının örtüştüğü gösterilmiştir. Deney numuneleri ile sonlu eleman modelleri benzer davranışlar göstermekle birlikte sonlu eleman modelinin davranışı deney sonuçlarına göre daha rijittir. Bunun nedeni deney numunesine göre sonlu eleman modelinin geometrisinin, malzemesinin, mesnet ve yük aktarma düzeneklerinin daha kusursuz olmasıdır.
8. Çapraz donatı çapının arttırılması durumunda kiriş davranışı parametrik olarak irdelenmiştir. Bulunan sonuçlara göre  $\emptyset 8$  yerine  $\emptyset 10$  çapraz kesme donatısı kullanılması durumunda kirişlerinin sünekliğinde %100 (SX200-2) ile %130 (SX400-2) civarında  $\emptyset 8$  yerine  $\emptyset 12$  kullanılması durumunda ise %126 (SX200-2) ile %150 (SX400-2) civarında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde  $\emptyset 8$  yerine  $\emptyset 10$  çapraz kesme donatısı kullanılması durumunda kirişlerinin yük taşıma kapasitesinde %6 (SX200-2) ile %4 (SX400-2) civarında  $\emptyset 8$  yerine  $\emptyset 12$  kullanılması durumunda ise %10 (SX200-2) ile %10 (SX400-2) civarında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir.

9. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında çapraz kesme donatısının betonarme kısa kiriş davranışı üzerinde ciddi oranlarda iyileşmeye neden olduğu ve kirişin davranışını hem dayanım hem de süneklik açısından iyileştirdiği belirlenmiştir.
10. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında önerilen çapraz kesme donatısı uygulamasının alternatif bir uygulama olarak kullanılabilceği açıktır. Ayrıca çapraz olarak uygulanacak olması da dikkate alındığında depremin yön değiştirilmesi durumunda bile etkinliği koruyacak ve kesme donatısı olarak çalışacaktır.
11. Yeni bir tasarım düzeni ortaya çıkarması bu çalışmayı diğer çalışmalardan farklı kılmakla birlikte kolay uygulanabilir olması, deprem etkisinin tersinir özelliğini dikkate alması, betonarme kısa kirişlerin davranışını hem dayanım hem de süneklik açısından iyileştirmesi gibi özellikleri nedeniyle bu çalışma kapsamında önerilen Çapraz Kesme Donatısı uygulamada da etkin bir şekilde kullanılabilir.

### **9.1. Gelecekteki Çalışmalar İçin Öneriler**

Bu çalışmada yapılan deneysel ve nümerik sonuçlar dikkate alındığında gelecekte yapılabilir çalışmalar için aşağıda bir takım öneriler verilmektedir.

Bu tez kapsamında önerilen çapraz kesme donatıları kullanılarak deprem etkisini dikkate alan çevrimsel kuvvetlerin uygulanabileceği ve çapraz kesme donatılarının etkinliğini daha net bir şekilde ortaya çıkarabilecek deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Önerilen çapraz kesme donatıları ve beton malzeme modeli kullanılarak betonarme kısa kirişlerin çatlak genişliklerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılabilir.

Çapraz kesme donatıları kullanılarak kolon ve kirişlerden oluşan düzlem çerçeve sistemler ile üç boyutlu sistemler çevrimsel ve/veya sismik yük etkisi altında

incelenerek çapraz kesme donatılarının yapı içerisindeki etkinliği deneysel ve nümerik olarak araştırılabilir.

Bu çalışma kapsamında betonarme kısa kirişler çapraz kesme donatıları kullanılarak basit mesnetli ve birinci dereceden hiperstatik mesnetli sistemler olarak göz önüne alınmış, deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde her iki mesneti ankastre olacak şekilde tasarlanarak betonarme kısa kirişlerin davranışları ve çapraz kesme donatılarının katkıları deneysel ve nümerik olarak belirlenebilir.

Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler için dışarıdan çapraz kesme donatıları kullanılarak yapılacak güçlendirme çalışmaları deneysel ve nümerik olarak test edilebilir.

Farklı kesme açıklığı faydalı yükseklik oranına ( $a/d$ ) sahip betonarme kirişler dikkate alınarak çapraz kesme donatılarının performansa katkısı deneysel ve nümerik olarak araştırılabilir.

Kesme davranışının kritik olduğu derin (yüksek) kirişler ve perdelerde çapraz kesme donatıları kullanılarak çevrimsel yük etkisi altında davranışları ve taşıyıcı sisteme olan katkıları araştırılabilir. Ayrıca kullanılan çapraz donatıların betonarme elemanların çatlak genişliklerine ve yük taşıma kapasitelerine katkısı belirlenebilir.

Çapraz kesme donatıları kullanılarak betonarme kirişlerin darbe yükleri altındaki davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenebilir.

Bu çalışmada önerilen çapraz kesme donatıları ile aynı özelliklere sahip betonarme kısa kirişler üzerinde FRP ve türevleri sargı uygulamaları, çelik levha yapıştırma ve çelik lif uygulamalarının da dikkate alındığı deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilerek kıyaslamalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Çağlar, N., Demir, A., Öztürk, H., Akkaya, A., A new approach to determine the moment-curvature relationship of circular reinforced concrete columns, *Computers and Concrete*, 38(3),321-335, 2015.
- [2] Çağlar, N., Demir, A., Öztürk, H., Akkaya A., A simple formulation for effective flexural stiffness of circular reinforced concrete columns”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38, 79-87, 2015.
- [3] Altın, S., Anıl, Ö., Gökten, Y., Betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde bir kelepçe uygulaması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 19(4), 415-422, 2004.
- [4] Polat, Z., Köksal, H.O., Arslan, G., Tersinir yükler altında betonarme çubukların kesme mukavemeti, *YTÜ BAP Koord*, İstanbul, 2007.
- [5] Yang, K.H., Kim, G.H., Yang, H.S., Shear behavior of continuous reinforced concrete T-beams using wire rope as internal shear reinforcement, *Construction and Building Materials*, 25, 911–918, 2011.
- [6] Kakaletsis, D., Karayannis, C., Panagopoulos, G., Effectiveness of rectangular spiral shear reinforcement on infilled R/C frames under cyclic loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 15(8), 1178-1193, 2011.
- [7] Corte, W.D., Boel, V., Effectiveness of spirally shaped stirrups in reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 52, 667–675, 2013.
- [8] Karayannis, C., Chalioris, C., Shear tests of reinforced concrete beams with continuous rectangular spiral reinforcement, *Construction and Building Materials*, 46, 86–97, 2013.
- [9] Al-Nasra, M., Asha, N., Shear reinforcements in the reinforced concrete beams, *American Journal of Engineering Research*, 2(10), 191-199, 2013.

- [10] Al-Nasra, M., Asha, N., Najmi, A., Abu-Lebdeh, T., The use of swimmer bars as shear reinforcement in reinforced concrete beam, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(1), 87-94, 2013.
- [11] Colajanni, P., Mendola, L., Mancini, G., Recupero, A., Spinella, N., Shear capacity in concrete beams reinforced by stirrups with two different inclinations, *Engineering Structures*, 81, 444-453, 2014.
- [12] Ghallab, A., Khafaga, M., Farouk, M., Essawy, A., Shear behavior of concrete beams externally prestressed with Parafil ropes, *Ain Shams Engineering Journal*, 4, 1-16, 2013.
- [13] Dirikgil, T., Betonarme kısa kolonların tasarlanmasına ve güçlendirilmesine yönelik yeni yaklaşımların analitik ve deneysel araştırılması, Erciyes Üniversitesi FBE, Kayseri, 2014.
- [14] Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H., Wasti, S., Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeler, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı, 2008.
- [15] Celep, Z., Kumbasar, N., Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, Üçüncü Baskı., İstanbul: Beta Dağıtım, 2004.
- [16] Doğangün, A., Betonarme yapıların hesap ve tasarımı, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2007.
- [17] Can, H., Tankut, T., Ağır hasar görmüş betonarme kirişlerin eğilme için onarımı, *İMO Teknik Dergi*, 23, 309-317, 1991.
- [18] Can, H., Deprem etkisindeki betonarme kirişlerin onarılması, *İMO Teknik Dergi*, 58, 771-782, 1994.
- [19] Altun, F., Vekli, M., Özcan, D., Haktanır, T., Mantolu betonarme kirişlerin taşıma gücünün deneysel incelenmesi, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ankara, 2002.
- [20] Önal, M., Tokgöz, H., Hasarlı betonarme kirişlerin onarımı üzerine deneysel bir çalışma, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 2005.
- [21] Önal, M., Koçak, A., The experimental investigation of damaged beams repaired, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2006.

- [22] Aykaç, S., Tankut, T., Can, H., Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deprem davranışı, *International Journal of Engineering Research and Development*, 1(3), June, 2011.
- [23] Furlan, S., Hanai, J., Shear behaviour of fiber reinforced concrete beams, *Cement and Concrete Composites*, 19, 359-366, 1997.
- [24] Lim, D., Oh, B., Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 21, 937-944, 1999.
- [25] Kwak, Y., Eberhard, M., Kim, W., Kim, J., Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, *ACI Structural Journal*, 530-538, 2003.
- [26] Cucchiara, C., Mendola, L., Papia, M., Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement, *Cement & Concrete Composites*, 26, 777-786, 2004.
- [27] Minh. L., Rovnak, M., New formula for the estimation of shear resistance of fibre reinforced beams, *Can. J. Civ. Eng.*, 38, 23-35, 2011.
- [28] Dinh, H., Parra-Montesinos G., Wight, J., Shear strength model for steel fiber reinforced concrete beams without stirrup reinforcement, *American Society of Civil Engineers.*, 137(10), 1039-1051, 2011.
- [29] Ding, Y., Zhang, F., Torgal, F., Zhang, Y., Shear behaviour of steel fibre reinforced self-consolidating concrete beams based on the modified compression field theory, *Composite Structures*, 94, 2440-2449, 2012.
- [30] Slater, E., Moni, M., Alam, M., Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 26, 423-436, 2012.
- [31] Altun, F., Aktaş, B., Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 38, 575-581, 2013.
- [32] Chalioris, C.E., Steel fibrous RC beams subjected to cyclic deformations under predominant shear, *Engineering Structures*, 49, 104-118, 2013.

- [33] Lee, K., Lee, S., Shin, S., Shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by epoxy mortar panel with steel fibers, *Advances in Structural Engineering*, 16(6), 987-999, 2013.
- [34] Tailhan, J., Rossi, P., Daviau-Desnoyers, D., Probabilistic numerical modelling of cracking in steel fibre reinforced concretes (SFRC) structures, *Cement & Concrete Composites*, 55, 315-321, 2015.
- [35] Tankut, T., Arslan, M., Epoksili çelik plaka ile güçlendirilmiş betonarme kiriş davranışı, *İMO Teknik Dergi*, 43, 575-584, Ekim 1992.
- [36] Gendron, G., Picard, A., Guerin, M., A theoretical study on shear strengthening of reinforced concrete beams using composite plates, *Composite Structures*, 45, 303-309, 1999.
- [37] Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Sano, M., Shear strengthening of reinforced beams using steel plates bonded on beam web: Experiments and analysis, *Construction and Building Materials*, 14, 237-244, 2000.
- [38] Ahmed, M., Ohlers, D., Bradford, M., Retrofitting reinforced concrete beams by bolting steel plates to their sides. Part 1: Behaviour and experiments, *Structural Engineering and Mechanics*, 10(3), 211-226, 2000.
- [39] Ohlers, D., Ahmed, M., Nguyen, N., Retrofitting reinforced concrete beams by bolting steel plates to their sides. Part 2: Transverse interaction and rigid plastic design, *Structural Engineering and Mechanics*, 10(3), 227-243, 2000.
- [40] Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Numerical simulation of steel-plate strengthened concrete beam by a nonlinear finite element method model, *Construction and Building Materials*, 16, 291-301, 2002.
- [41] Köse, M., Özgen, K., Betonarme elemanların çelik lamalarla güçlendirilmesi, *İTÜ Dergisi*, 2(1), 41-50, Mart 2003.
- [42] Colotti, V., Spadea, G., Swamy, R., Structural model to predict the failure behavior of plated reinforced concrete beams, *Journal of Composites For Construction*, 8(2), 104-122, 2004.
- [43] Sevük, F., Arslan, G., Ekiz, İ., Çelik plaka ile güçlendirilen betonarme kirişlerde yan plakaların etkisi, *Deprem Sempozyumu, Kocaeli*, 2005.

- [44] Altın, S., Anıl, O., Kara, M.E., Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates, *Engineering Structures*, 27, 781–791, 2005.
- [45] Barnes, R., Mays, G., Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part-2, Design guidelines, *Construction and Building Materials*, 20, 403-411, 2006.
- [46] Demirci, E.E., Amil, A.P., Şahin, R., Çelik korniyer ve lamalar yapıştırmak suretiyle betonarme kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi, *Tübav Bilim Dergisi*, 4(2), 103-112, 2011.
- [47] Ren, X., Zhou, B., Design and analysis of a reinforced concrete beam retrofitted by externally bonded H-type steel member, *Procedia Engineering*, 14, 2133-2140, 2011.
- [48] Aykaç, S., Özbek, E., T-kesitli betonarme kirişlerin çelik levhalar ile güçlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 5319-5334, 2011.
- [49] Aykaç, S., Kalkan, İ., Uysal, A., Strengthening of reinforced concrete beams with epoxy-bonded perforated steel plates, *Structural Engineering and Mechanics*, 44(6), 735-751, 2012.
- [50] Su, R., Li, L., Lo, S., Shear transfer in bolted side-plated reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 56, 1372–1383, 2013.
- [51] Aykaç, B., Acar, D., Betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılmış karbon kumaş ve çelik levhalardan oluşan kompozit malzemeyle güçlendirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 29(1), 175-183, 2014.
- [52] Barnes, R., Baglin, P., Mays, G., Subedi, N., External steel systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams, *Engineering Structure*, 23, 1162-1176, 2001.
- [53] Van Gemert, D., Maesschalck, R., Structural repair of a reinforced concrete plate by epoxy bonded external reinforcement, *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concrete*, 5(4), 247-255, 2003.
- [54] Varastehpour, H., Hamelin, P., Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics, *Materials and Structures*, 30, 160-166, 1997.



- [55] Morphy, R., Behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) stirrups as shear reinforcement for concrete structures, Faculty of Graduate Studies of The University of Manitoba, Winnipeg, 1999.
- [56] Kachlakev, D., McCurry, D., Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, *Composites: Part-B*, 31, 445-452, 2000.
- [57] Li, A., Diagana, C., Delmas, Y., CRFP contribution to shear capacity of strengthened RC beams, *Engineering Structures*, 23, 1212–1220, 2001.
- [58] Hadi, M., Retrofitting of shear failed reinforced concrete beams, *Composite Structures*, 62, 1-6, 2003.
- [59] Diagana, C., Li, A., Gedalia, B., Delmas, Y., Shear strengthening effectiveness with CFF strips, *Engineering Structures*, 25, 507–516, 2003.
- [60] Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, Ş.M., Betonarme kirişlerin lifli polimer (FRP) malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3), 291-298, 2004.
- [61] Aprile, A., Benedetti, A., Coupled flexural-shear design of R/C beams strengthened with FRP, *Composites: Part-B*, 35, 1-25, 2004.
- [62] Maalej, M., Leong, K., Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams, *Composites Science and Technology*, 65, 1148-1158, 2005.
- [63] Ali, M., Oehlers, D.J., Seracino, R., Vertical shear interaction model between external FRP transverse plates and internal steel stirrups, *Engineering Structures*, 28, 381–389, 2006.
- [64] Anil, Ö., Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load, *Cement & Concrete Composites*, 28, 638–649, 2006.
- [65] Nehdi, M., Omeman, Z., El-Chabib, H., Optimal efficiency factor in strut-and-tie model for FRP-reinforced concrete short beams with  $(1.5 < a/d < 2.5)$ , *Materials and Structures*, 41, 1713-1727, 2008.

- [66] Omeman, Z., Nehdi, M., El-Chabib, H., Experimental study on shear behavior of carbon-fiber-reinforced polymer reinforced concrete short beams without web reinforcement, *Can. J. Civ. Eng.*, 35, 1-10, 2008.
- [67] Perera, R., Vique, J., Arteaga, A., Diego, A., Shear capacity of reinforced concrete members strengthened in shear with FRP by using strut-and-tie models and genetic algorithms, *Composites: Part-B*, 40, 714–726, 2009.
- [68] Lau, D., Pam, H., Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 32, 3857–3865, 2010.
- [69] Sayın, B., Yıldızlar, B., Özyazgan, C., *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 42-56, 2010.
- [70] Sayın, B., Manisalı, E., Lif takviyeli plastik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 63-75, 2010.
- [71] Şakar, G., Alku, Ö., Etriyesiz betonarme kirişlerin CFRP levhalarla kesmeye karşı güçlendirilmesi, *İTÜ Dergisi/D Mühendislik*, 9(6), 3-12, 2010.
- [72] Anıl, Ö., Altın, S., Kara, M.E., Koprıman, Y., Mertoğlu, Ç., Kesmede yetersiz betonarme kirişlerin CFRP ile dayanım ve sünekliğinin artırılması, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 2011.
- [73] Yavuz, G., Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı, *Journal of New World Sciences Academy*, 6(4), 1001-1015, 2011.
- [74] Obaidat, Y., Heyden, S., Dahlblom, O., Abu-Farsakh O., Abdel-Jawad, Y., Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates, *Construction and Building Materials*, 25, 591–597, 2011.
- [75] Rahal, K.N., Rumaih, H.A., Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars, *Engineering Structures*, 33, 53-62, 2011.
- [76] Kara, İ., Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams without stirrups based on genetic programming, *Advances in Engineering Software*, 42, 295–304, 2011.

- [77] Contamine, R., Si-Larbi, A., Than, A., Hamelin, P., Numerical modeling of reinforced concrete beams under shear stress with and without external textile-reinforced concrete reinforcement, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30(15), 1293–1303, 2011.
- [78] Belarbi, A., Bae, S.W., Brancaccio, A., Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 32, 27–40, 2012.
- [79] Colalillo, M.A., Behaviour of shear-critical reinforced concrete beams retrofitted with externally applied fibre-reinforced polymers, University of Toronto, Toronto, 2012.
- [80] Soliman, A., Osman, M., Efficiency of using discrete fibers on the shear behavior of R.C. beams, *Ain Shams Engineering Journal*, 3, 209–217, 2012.
- [81] Colalillo, M., Sheikh, S., Seismic retrofit of shear-critical reinforced concrete beams using CFRP, *Construction and Building Materials*, 32, 99–109, 2012.
- [82] El-Maaddawy, T., El-Ariss, B., Behavior of concrete beams with short shear span and web opening strengthened in shear with CFRP composites, *Journal of Composites for Construction*, 16(1), 47-59, 2012.
- [83] Mitsui, Y., Murakami, K., Takeda, K., Sakai, H., A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets, *Composite Interfaces*, 5(4), 285-295, 2012.
- [84] Haddad, R.H., Al-Rousan, R.Z., Al-Sedyiri, B.K., Repair of shear-deficient and sulfate-damaged reinforced concrete beams using FRP composites, *Engineering Structures*, 56, 228–238, 2013.
- [85] Ali, N., Abdul Samad, A., Mohamad, N., Jayaprakash, J., Shear Behaviour of Pre-cracked Continuous Beam Repaired using Externally Bonded CFRP Strips, *Procedia Engineering*, 53, 129-144, 2013.
- [86] Hawileh, R., Rasheed, H., Abdalla, J., Al-Tamimi, A., Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems, *Materials and Design*, 53, 972–982, 2014.

- [87] Marí, A., Cladera, A., Oller, E., Bairán, J., Shear design of FRP reinforced concrete beams without transverse reinforcement, *Composites: Part B*, 57, 228–241, 2014.
- [88] Hawileh, R., Nawaz, W., Abdalla, J., Saqan, E., Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams, *Composite Structures*, 122, 468-476, 2015.
- [89] Qapo, M., Dirar, S., Jemaa, Y., Finite element parametric study of reinforced concrete beams shear-strengthened with embedded FRP bars, *Composite Structures*, 149, 93-105, 2016.
- [90] Norris, T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets, *Journal of Structural Engineering*, 903-911, 1997.
- [91] Altın, S., Tankut, T., Demirel, Y., Betonarme kirişlerin kesme için onarım/güçlendirilmesi, Tübitak, İntag 536, Ankara, 1996.
- [92] Altın, S., Demirel, Y., Kesmeye karşı güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışları -  $av/d=3$ , İMO Teknik Dergi, 108, 1471-1489, 1997.
- [93] Adhikary, B., Mutsuyoshi, H., Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques, *Construction and Building Materials*, 20, 366–373, 2006.
- [94] Shamsai, M., Sezen, H., Khaloo, A., Behavior of reinforced concrete beams post-tensioned in the critical shear region, *Engineering Structures*, 29, 1465–1474, 2007.
- [95] Yang, K., Byun, H., Ashour, A., Shear strengthening of continuous reinforced concrete T-beams using wire rope units, *Engineering Structures*, 31, 1154-1165, 2009.
- [96] Yu, T., Ma, Q., Tian, L., Test study on the resisting shear strengthening effect with external pre-stressed wire rope, *Trans Tech Publications*, Switzerland, 243-249, 2011.
- [97] Brown, R.H., Jirsa, J.Q., Reinforced concrete beams under load reversals, *ACI Journal*, May 1971.

- [98] Paulay, T., Binney, J., Diagonally reinforced coupling beams of shear walls, Detroit: Publication SP-42, 1974.
- [99] Bertero, V.V., Popov, E.P., Wang, T.Y., Seismic design implications of hysteretic behaviour of reinforced concrete elements under high shear, proceedings of the review meeting, U.S.-Japan Cooperative Research Program in Earthquake Engineering, 18-20 August 1975.
- [100] Barney, G.B., Shin, K.N., Rabbat, B.G., Fiorato, A.E., Russell, H.G., Corley, W.G., Earthquake resistant structural walls - tests of coupling beams, Portland Cement Association, Research and Development, January 1978.
- [101] Aktan, A.E., Deprem Etkileri altındaki Kirişlerde Çapraz Donatı ve Eğilme Donatısının Taşıma Gücü ve Enerji Tüketimine Katkıları, Ankara, 1979.
- [102] Barney, G., Shiu, K., Rabbat, B., Fiorato, A., Russell, H., Corley, W., Behavior of coupling beams under load reversals, Portland Cement Association, Skokie IL., 1980.
- [103] Galano, L., Vignoli, A., Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts, ACI Structural J., 97(6), 876-885, 2000.
- [104] Adebar, P., Hindi, R., Gonzalez, E., Seismic behavior of a full-scale diagonally reinforced slender coupling beam, Canada, Vancouver, 2001.
- [105] Canbolat, B., Parra-Montesinos, G., Wight, J., Experimental study on seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite coupling beams, ACI Structural Journal, 102(1), 159-166, 2005.
- [106] Fortney, P., Rassati, G., Shahrooz, B., Investigation on effect of transverse reinforcement on performance of diagonally reinforced coupling beams, ACI Str. J., 105(6), 781-788, 2008.
- [107] Anıl, Ö., Altın, S., Özel Bir Kesme Donatısı, Deneysel Çalışma, Ankara.
- [108] Ahmed, A., Fayyadh, M., Naganathan, S., Nasharuddin, K., Reinforced concrete beams with web openings: A state of the art review, Materials and Design, 40, 90-102, 2012.

- [109] Aykac, B., Kalkan, İ., Aykac, S., Egriboz, Y., Flexural behavior of RC beams with regular square or circular web openings, *Engineering Structures*, 56, 2165-2174, 2013.
- [110] Chisari, C., Amadio, C., An experimental, numerical and analytical study of hybrid RC-encased steel joist beams subjected to shear, *Engineering Structures*, 61, 84-98, 2014.
- [111] Bhatt, P., Kader, M., Prediction of shear strength of reinforced concrete beams by nonlinear finite element analysis, *Computers and Structures*, 68, 139-155, 1998.
- [112] Averbuch, D., Buhan, P., Shear design of reinforced concrete deep beams: a numerical approach, *Journal of Structural Engineering*, 125(3), 309-318, 1997.
- [113] Belgin, Ç.M., Şener, Ş., Aşırı donatılı kirişlerde boyut etkisinde kırılma parametrelerinin doğrusal ve doğrusal olmayan analizi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(1), 149-156, 2007.
- [114] Anıl, Ö., Belgin, M.Ç., Monotonik yükleme etkisi altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan analizi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(1), 191-197, 2007.
- [115] Junior, F., Venturini, W., Damage modelling of reinforced concrete beams, *Advances in Engineering Software*, 38, 538-546, 2007.
- [116] Londhe, R., The design of reinforced concrete beams for shear in current practice: A new analytical model, *Structural Engineering and Mechanics*, 31(2) 225-235, 2009.
- [117] Sümer, Y., Aktaş, M., Betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde çözüm ağı sıklığı etkisinin incelenmesi, *Journal of New World Sciences Academy*, 6(1), 216-224, 2011.
- [118] Slobbe, A., Hendriks, M., Rots, J., Sequentially linear analysis of shear critical reinforced concrete beams without shear reinforcement, *Finite Elements in Analysis and Design*, 50, 108-124, 2012.
- [119] Stramandinoli, R., Rovere, H., FE model for nonlinear analysis of reinforced concrete beams considering shear deformation, *Engineering Structures*, 35, 244-253, 2012.

- [120] Słowik M., Nowicki, T., The analysis of diagonal crack propagation in concrete beams, *Computational Materials Science*, 52, 261-267, 2012.
- [121] Barros, J., Baghi, H., Dias, S., Gouveia, A., A FEM-based model to predict the behaviour of RC beams shear strengthened according to the NSM technique, *Engineering Structures*, 56, 1192-1206, 2013.
- [122] Shuraim, A., Behavior and shear design provisions of reinforced concrete D-region beams, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 25, 65-74, 2013.
- [123] Khan, H., Rafique, M., Karam, S., Ahmad, K., Bashir, A., Identification of shear cracks in reinforced beams using finite element method (Ansys), *Pakistan Journal of Science*, 66(1), 2014.
- [124] Yang, C., Liu, Z., Sun, L., Li, J., Finite element analysis of shear behavior of reinforced concrete beam strengthened by high-strength steel wire mesh, *Applied Mechanics and Materials*, 482, 15-19, 2014.
- [125] Fang, L., Shear enhancement in reinforced concrete beams, Imperial College London, London, 2014.
- [126] Obeidah, A., Hawileh, R., Abdalla, J., Finite element analysis of strengthened RC beams in shear with aluminum plates, *Computers and Structures*, 147, 36-46, 2015.
- [127] Yazdanbakhsh, A., Altoubat, S., Rieder, K., Analytical study on shear strength of macro synthetic fiber reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 100, 622–632, 2015.
- [128] Demir, A., Çağlar, N., Öztürk, H., Sümer, Y., Nonlinear finite element study on the improvement of shear capacity in reinforced concrete T-Section beams by an alternative diagonal shear reinforcement, *Engineering Structures*, 120, 158-165, 2016.
- [129] Nistico, N., Ozbolt, J., Polimanti, G., Modeling of reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP: Microplane-based approach, *Composites Part-B*, 90, 351-364, 2016.

- [130] Ferreira, D., Bairán, J., Marí, A., Shear strengthening of reinforced concrete beams by means of vertical prestressed reinforcement, *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(3), 394-410, 2016.
- [131] Chen, G., Chen, J., Teng, J., On the finite element modelling of RC beams shear-strengthened with FRP, *Construction and Building Materials*, 32, 13-26, 2012.
- [132] Sayed, A., Wang, X., Wu, Z., Asce, M., Modeling of shear capacity of RC beams strengthened with FRP sheets based on FE simulation, *Journal Of Composites For Construction*, 2013.
- [133] Çırak, İ., Betonarme binalarda gözlenen hasarlar, nedenleri ve öneriler, *SDU International Technological Science Constructional Technologies*, 2011.
- [134] Ersoy, U., Özcebe, G., Betonarme, İstanbul: Evrim, 2004.
- [135] Ritter, W., Die Bauweise Hennebique, *Schweizerische Bauzeitung*, Zurich, 1899.
- [136] Mörsch, E., *Concrete-Steel Construction*, McGraw Hill Book Company, New York, 1909.
- [137] TS500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [138] Macgregor, J., Bartlett, F., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, 2000.
- [139] Wight, J., Macgregor, J., *Reinforced concrete mechanics and design*, New Jersey: Pearson Education, Inc., 2012.
- [140] Celep, Z., *Betonarme Yapılar, Üçüncü Baskı*, İstanbul: Beta, 2009.
- [141] ACI318, *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2014.
- [142] Özsoy, A., Özgen, K., *Perdelerdeki boşlukların yatay ötelenmeye etkisi*, Kocaeli, 2005.



- [143] Moehle, J., Ghodsi, T., Hooper, J., Fields, D., Gedhada, R., Seismic design of cast-in-place concrete special structural walls and coupling beams, Applied Technology Council ATC, California, 2012.
- [144] TDY2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [145] Schlaich, J., Schafer, K., Jennewein, M., Toward a consistent design of structural concrete, Journal of the Prestressed Concrete Institute, 32(3), 74-150, 1987.
- [146] Collins, P., Mitchell, D., Prestressed Concrete Basics, 1991.
- [147] Özkal, F., Uysal, H., Üç boyutlu konsol kirişlerde topoloji optimizasyonu uygulamaları, Int.J.Eng.Research & Development, 2(1), 54-57, 2010.
- [148] Wight, J., MacGregor, J., Reinforced Concrete, Fifth Edition., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [149] Mises, R., On saint venant's principle, Bulletin of The American Mathematical Society, 51, 555-562, 1945.
- [150] TS/EN12390-1, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri: Deney numunesi kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2013.
- [151] TS/EN12390-2, Beton-Setleşmiş beton deneyler: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabii tutulması, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2010.
- [152] TS-708, Çelik-Betonarme için donatı çeliği, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2010.
- [153] ABAQUS/Standard, Student edition V.6.12, Dassault Systèmes Simulia Corp..
- [154] Zienkiewicz, O., The finite element method in engineering science, London: 3rd edition. Mc.Graw Hill, 1977.
- [155] Arıkan, M., Sahir, A., Sonlu elemanlar metodunun mühendislikte uygulamaları, Ankara, 2010.

- [156] Courant, R., Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration, *Bull. Am. Math. Soc.*, 49, 1-43, 1943.
- [157] Ngo, D., Scordelis, A., Finite element analysis of reinforced concrete beams, *ACI Journal*, 3, 64, 1967.
- [158] Scordelis, A., Ngo, D., Franklin, H., Finite element study of reinforced concrete beams with diagonal tension cracks, *ACI, Publication*, 42, 1974.
- [159] Nilson, A., Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method, *ACI Journal*, 9, 65, 1968.
- [160] Çavdar, S., Finite element analysis of reinforced concrete beams, Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 1981.
- [161] Chen, W., Plasticity in reinforced concrete, New York: McGraw-Hill Book Co., 1982.
- [162] Ramadan, S., Finite element analysis of reinforced concrete members, Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 1987.
- [163] Aydoğan, M., Omurtag, M., Mühendislikte sonlu elemanlar yöntemi ders notları, İstanbul, 2010.
- [164] Frank, L., Applied finite element analysis for engineers, CBS Publ., 1986.
- [165] Reddy, J., An introduction to the finite element method, London: McGraw-Hill, 1993.
- [166] Demir, A., Öztürk H., Dok, G., 3D numerical modeling of rc deep beam behavior by nonlinear finite element analysis, *Disaster Science And Engineering*, 2(1), 13-18, 2016.
- [167] Ellobody, E., Finite element analysis and design of steel and steel-concrete composite bridges, Waltham: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [168] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E., A plastic-damage model for concrete, *Solids and Structures*, 25(3), 299-326, 1989.

- [169] Lee J., Fenves, L., Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), 892-900, 1998.
- [170] CEB-FIB, The fib Model Code for Concrete Structures 2010., Case Postale 88, CH-1015 , Lausanne, Switzerland, 2010.
- [171] Karayannis, C., Torsional behaviour of flanged concrete elements with tension softening, *Computers & Structures*, 54, 97-110, 1995.
- [172] Gopalaratnam, S., , Softening response of plain concrete in direct tension, *ACI Journal*, 82, 310-323, 1985.
- [173] Lale, E., Betonarme elemanların plastisite ve hasar mekaniği esasları kullanılarak doğrusal olmayan analizi, İstanbul: İTÜ, FBE, 2011.
- [174] Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracturemechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6, 773-782, 1976.
- [175] Crisfield, M., Snap-through and snap-back response in concrete structures and the dangers of under-integration, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 22, 751-767, 1986.
- [176] Coronado, A., Lopez, M., Sensitivity analysis of reinforced concrete beams strengthened with FRP laminates, *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 102-114, 2006.
- [177] Hordijk, D., Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete - experiments, modelling and analyses, *Heron*, 37(1), 3-79, 1992.
- [178] CEB-FIP90, Model code 90 for concrete structures, Thomas Telford, London, 1993.
- [179] Chen, W., *Plasticity in Reinforced Concrete*, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [180] Sümer, Y., FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Sakarya: Sakarya Üniversitesi FBE, 2010.

- [181] ABAQUS online documentation 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence.
- [182] Myh, B., Concrete and Concrete Structures: Numerical Modelling and Applications, London: Middlesex Polytechnic Faculty of Engineering, Elsevier Applied Science, 1989.
- [183] Kwak, H., Filippou, F., Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic and cyclic loads, Earthquake Engineering, Tenth world conference , Rotterdam, 1992.
- [184] Hibbitt, H., Karlsson, B., Sorensen, E., ABAQUS user's manual, Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2012.
- [185] Vonk, R., A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression, Heron, 38(3), 3-94, 1993.
- [186] Van Mier, J., Assessment of strain softening curves for concrete, Lecture Notes., TU Delft, 1992.
- [187] Lapidus, L., Pinder, G., Numerical solution of partial differential equations in science and engineering, New York: John Wiley & Sons, 1982.

## ÖZGEÇMİŞ

Hakan Öztürk, 11.02.1981'de Gaziantep'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Gaziantep'de tamamladı. 1998 yılında Cumhuriyet Lisesi'nden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2005 yılında bitirdi. 2005 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı ve 2008 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2005-2007 yılları arasında Tübitak proje asistanı olarak görev yaptı. 2007-2011 yılları arasında özel bir şirkette proje ve şantiye mühendisi olarak çalıştı. 2011 yılında Kilis 7 Aralık Üniversitesi'ne araştırma görevlisi olarak atandı. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2011 yılında başladığı doktora eğitimine Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.