

T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KİRİŞLERDE HELEZONİK BİÇİMLİ ETRİYE  
UYGULAMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE  
İNCELENMESİ

İslam Enes KAHRAMAN

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN  
2019

Her Hakkı Saklıdır.

## Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, İslam Enes KAHRAMAN tarafından hazırlanan bu çalışma 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (... / ...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

İmza:

Üye : Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 11 / 09 / 2019 tarih ve 37 / 14 ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

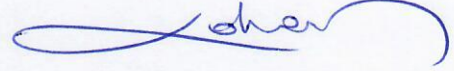
  
**Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Betonaarme Kirişlerde Helezonik Biçimli Etriye Uygulamasının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 21/08/2019



**İslam Enes KAHRAMAN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BETONARME KİRİŞLERDE HELEZONİK BİÇİMLİ ETRİYE UYGULAMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

İslam Enes KAHRAMAN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Betonarme yapı elemanlarının yüksek dayanım gösterebilmesi, beton ve donatı arasındaki etkili bir uyumu gerektirmektedir. Ancak beklenen sünek davranış için de kesme dayanımı üzerinde detaylı bir incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Yeterli kesme donatısı bulunmayan betonarme bir kiriş, artan yük altında, eğilme mukavemetine ulaşmadan, mesnetlere yakın bölgelerde oluşan yatayla yaklaşık 45° eğimli çatlaklarla kırılma durumuna gelecektir. Bu durumda, kesme kırılmasının ani ve gevrek özelliği nedeni ile kesmeye karşı tasarım yapılması daha da önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, etriyesiz tasarımın yanı sıra 30°, 45°, 60° ve 90° helezonik biçimli etriye yerleştirilen betonarme kirişler ele alınmıştır. Bu kirişler dört noktalı yükleme programı uygulanarak kesme davranışları ANSYS yazılımı üzerinden sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

**2019, 85 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme kiriş, Helezonik etriye, Kesme davranışı, Sonlu elemanlar yöntemi.



## ABSTRACT

Master Thesis

### INVESTIGATION OF SPIRAL STIRRUP APPLICATION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY FINITE ELEMENT METHOD

İslam Enes KAHRAMAN

Erzincan Binali Yıldırım University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Achievement of high strength for reinforced concrete structural members, requires an effective collaboration between concrete and reinforcement. However, a detailed investigation on the shear strength is a necessity for the expected ductile behavior. A reinforced concrete beam without adequate shear reinforcement will come up with increasingly inclined cracks at approximately 45 degrees to the horizontal formed near the support regions and present fracture, without reaching the flexural strength. In this case, it is even more important to design against shear with the reason that shear fracture is sudden and brittle. In this study, reinforced concrete beams with 30°, 45°, 60° and 90° helically placed stirrups alongside beams without transverse reinforcement, were considered. These beams were subjected to a four-point loading program and the shear behavior was investigated using finite element method over ANSYS software.

**2019, 85 Pages**

**Keywords:** Reinforced concrete beam, Spiral stirrup, Shear behavior, Finite element method.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin ve çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen Sayın hocam Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan ve hiçbir desteğini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

İslam Enes KAHRAMAN

Eylül; 2019



# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR .....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>5</b>
2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	5
2.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümünde izlenecek adımlar .....	6
2.1.2. Sonlu elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	6
2.2. Betonarme Elemanlarda Eğilme Momenti Ve Kesme Kuvveti Etkisi.....	7
2.2.1. Eğilme momenti .....	7
2.2.2. Kesme kuvveti.....	9
2.2.2.1. Kesme donatısız kirişlerin davranışları.....	11
2.2.2.2. Kesme donatılı kirişlerin davranışları.....	12
2.2.2.3. a/d oranının etkisi.....	17
2.2.2.4. Boyuna donatı oranının kesme kapasitesine etkisi .....	19
2.2.3. Sargısız betonun davranışı .....	21
2.2.3.1. Sargısız beton için Mander modeli .....	21
2.2.4. Sargılı beton davranışı.....	22
2.2.4.1. Sargılı beton için Mander modeli .....	24
2.2.4.2. Sargı donatısının etkileri.....	26
2.2.4.3. Sargı donatısında etkili olan parametreler .....	27
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>29</b>
3.1. Kullanılan Yazılım.....	29
3.2. Numunelerin Tasarımı .....	29
3.2.1. Deney tipi seçimi.....	29
3.2.2. Eleman modeli seçimi.....	31
3.2.3. Modelleme araçları.....	34

3.2.4. Yük tanımlama (Define loads) menüsü .....	40
3.2.5. Malzeme özelliklerinin seçimi .....	41
3.2.5.1. Beton malzeme modeli .....	42
3.2.5.2. Donatı malzeme modeli .....	46
3.3. Analiz .....	49
3.4. Sonuçların okunması .....	50
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>53</b>
4.1. Yük-Sehim Grafiğinin Karşılaştırılması .....	53
4.2. Moment-Eğrilik Grafiğinin Karşılaştırılması .....	57
4.3. Alt Lif Uzama ve Üst Lif Kısalma Grafiğinin Karşılaştırılması .....	60
4.4. Kesme Çatlağı Genişliklerinin Karşılaştırılması .....	64
4.5. Betonda Asal Gerilme ve Birim Şekil Değiştirme Dağılımlarının Karşılaştırılması .....	67
4.6. Boyuna Donatılarda Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması .....	70
4.7. Enine Donatılarda Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması .....	72
4.8. Boyuna Donatılarda Birim Şekil Değiştirmelerin Karşılaştırılması .....	74
4.9. Enine Donatılarda Birim Şekil Değiştirmelerinin Karşılaştırılması .....	77
4.10. Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	79
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>81</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>86</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Sonlu eleman yönteminin matematik model olarak tanımlanması.....	5
Şekil 2.2 Moment-eğrilik ilişkisi .....	8
Şekil 2.3 Eğrilik ve malzeme modelleri .....	9
Şekil 2.4 Asal gerilmelerin yönü.....	10
Şekil 2.5 Çatlak çeşitleri .....	11
Şekil 2.6 Kesme donatısı bulunmayan kirişlerde iç kuvvetler.....	12
Şekil 2.7 Kesme donatısı bulunan kirişlerde iç kuvvetler.....	13
Şekil 2.8 Kirişlere yerleştirilecek olan kesme donatısı için hesap diyagramı.....	14
Şekil 2.9 Kirişlere yerleştirilecek olan kesme donatısı hesap diyagramı.....	15
Şekil 2.10 Sargısız betonarme elemanlarda a/d oranının kesme kuvvetine etkisi .....	19
Şekil 2.11 Sargılı betonarme elemanlarda a/d oranının kesme kuvvetine etkisi.....	19
Şekil 2.12 Sargısız betonarme elemanlarda boyuna donatı oranının kesme kuvvetine etkisi .....	20
Şekil 2.13 Sargılı betonarme elemanlarda boyuna donatı oranının kesme kuvvetine etkisi .....	20
Şekil 2.14 Sargılı ve sargısız beton için Mander modeli .....	22
Şekil 2.15 Betonun üç eksenli gerilme altındaki davranışı .....	23
Şekil 2.16 Cowan-Zia kırılma kriteri .....	23
Şekil 2.17 Farklı miktarlardaki etriyeler ile sarılmış beton için gerilme-şekil değiştirme grafikleri.....	26
Şekil 2.18 Enine donatı düzeninin sargı etkisindeki önemi .....	28
Şekil 3.1 Deney düzeneği.....	30
Şekil 3.2 Ansys Solid 65 elemanı geometrisi .....	31
Şekil 3.3 Ansys Link 180 elemanı geometrisi .....	31
Şekil 3.4 Beton ve donatı elemanları tanımlama .....	32
Şekil 3.5 Eleman sabitlerinin seçilmesi .....	32
Şekil 3.6 Beton özellikleri giriş sayfası.....	33
Şekil 3.7 Donatı özellikleri giriş sayfası .....	33
Şekil 3.8 Modelleme nesnelere .....	34

Şekil 3.9 Keypoint tanımlanması .....	34
Şekil 3.10 Line tanımlanması.....	35
Şekil 3.11 Volume tanımlanması .....	35
Şekil 3.12 Ansys mesh menüsü.....	36
Şekil 3.13 Mesh tipi seçiminin önemi.....	37
Şekil 3.14 Analiz numunelerinin sonlu elamanlara bölünmüş hali.....	38
Şekil 3.15 Muhtelif açılardaki enine donatı yerleşimi .....	39
Şekil 3.16 Analiz numunelerinin kesiti.....	40
Şekil 3.17 Yük atama menüsü.....	41
Şekil 3.18 Mesnet görünümleri.....	41
Şekil 3.19 Betonu lineer izotropik olarak modelleme menüsü .....	42
Şekil 3.20 Betonun elastisite modülü ve Poisson oranının tanımlanması.....	44
Şekil 3.21 Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin tanımlanması .....	45
Şekil 3.22 Betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi .....	45
Şekil 3.23 Beton malzeme özellikleri .....	46
Şekil 3.24 Donatının elastisite modülü ve Poisson oranının tanımlanması .....	47
Şekil 3.25 Donatının akma ve pekleşme dayanımlarının tanımlanması .....	48
Şekil 3.26 Donatının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi .....	48
Şekil 3.27 Değiştirilmiş Newton Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi .....	49
Şekil 3.28 Analiz sonuçlarında yükleme adımının seçilmesi.....	50
Şekil 3.29 Çatlak görüntüleme menüsü .....	51
Şekil 3.30 Taşıma kapasitesine ulaşan kirişte meydana gelen çatlaklar .....	51
Şekil 3.31 Ezilme çatlakları .....	52
Şekil 4.1 K00 kirişine ait yük-sehim grafiği .....	53
Şekil 4.2 K30 kirişine ait yük-sehim grafiği .....	53
Şekil 4.3 K45 kirişine ait yük-sehim grafiği .....	54
Şekil 4.4 K60 kirişine ait yük-sehim grafiği .....	54
Şekil 4.5 K90 kirişine ait yük-sehim grafiği .....	54
Şekil 4.6 Kirişlerin maksimum taşıdıkları yükler .....	55
Şekil 4.7 K00 kirişine ait moment-eğrilik grafiği .....	57
Şekil 4.8 K30 kirişine ait moment-eğrilik grafiği .....	57
Şekil 4.9 K45 kirişine ait moment-eğrilik grafiği .....	58



Şekil 4.10 K60 kirişine ait moment-eğrilik grafiği .....	58
Şekil 4.11 K90 kirişine ait moment-eğrilik grafiği .....	59
Şekil 4.12 K00 kirişine ait alt lif uzama ve üst lif kısalma grafiği.....	60
Şekil 4.13 K30 kirişine ait alt lif uzama ve üst lif kısalma grafiği.....	61
Şekil 4.14 K45 kirişine ait alt lif uzama ve üst lif kısalma grafiği.....	61
Şekil 4.15 K60 kirişine ait alt lif uzama ve üst lif kısalma grafiği.....	61
Şekil 4.16 K90 kirişine ait alt lif uzama ve üst lif kısalma grafiği.....	62
Şekil 4.17 K00 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	63
Şekil 4.18 K30 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	63
Şekil 4.19 K45 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	63
Şekil 4.20 K60 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	63
Şekil 4.21 K90 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	63
Şekil 4.22 K00 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği .....	64
Şekil 4.23 K30 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği .....	64
Şekil 4.24 K45 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği .....	65
Şekil 4.25 K60 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği .....	65
Şekil 4.26 K90 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği .....	66
Şekil 4.27 Taşıma kapasitesine ulaşan K00 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 4.28 Taşıma kapasitesine ulaşan K30 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 4.29 Taşıma kapasitesine ulaşan K45 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 4.30 Taşıma kapasitesine ulaşan K60 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 4.31 Taşıma kapasitesine ulaşan K90 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri .....	68
Şekil 4.32 K00 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları .....	69
Şekil 4.33 K30 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları .....	69
Şekil 4.34 K45 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları .....	69
Şekil 4.35 K60 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları .....	69
Şekil 4.36 K90 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları .....	69
Şekil 4.37 K00 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı.....	70
Şekil 4.38 K30 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı.....	70
Şekil 4.39 K45 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı.....	71
Şekil 4.40 K60 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı.....	71
Şekil 4.41 K90 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı.....	71

Şekil 4.42 K30 kirişinin enine donatılarında gerilme .....	72
Şekil 4.43 K45 kirişinin enine donatılarında gerilme .....	73
Şekil 4.44 K60 kirişinin enine donatılarında gerilme .....	73
Şekil 4.45 K90 kirişinin enine donatılarında gerilme .....	73
Şekil 4.46 K00 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	74
Şekil 4.47 K30 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	75
Şekil 4.48 K45 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	75
Şekil 4.49 K60 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	75
Şekil 4.50 K90 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	76
Şekil 4.51 K30 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	77
Şekil 4.52 K45 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	77
Şekil 4.53 K60 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	78
Şekil 4.54 K90 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları.....	78

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 3.1. Analiz numunelerinin malzeme özellikleri.....	38
Tablo 3.2. Analiz numunelerinde enine donatı uygulama biçimleri.....	39
Tablo 4.1. Kirişlerin taşıdıkları maksimum yük değerleri .....	55
Tablo 4.2. Kirişlerde meydana gelen maksimum sehım değerleri.....	56
Tablo 4.3. Kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri .....	56
Tablo 4.4. Kirişlerde meydana gelen maksimum moment değerleri .....	59
Tablo 4.5. Maksimum moment anında meydana gelen eğrilik değerleri.....	60
Tablo 4.6. Kirişlerin alt lif uzama ve üst lif kısalma değerleri .....	62
Tablo 4.7. Kirişlerin kesme çatlağındaki genişlik değerleri .....	66
Tablo 4.8. Boyuna donatılarda maksimum gerilme değerleri ve akma durumları.....	72
Tablo 4.9. Enine donatılarda maksimum gerilme değerleri.....	74
Tablo 4.10. Boyuna donatılarda birim şekil değiştirme değerleri.....	76
Tablo 4.11. Enine donatılarda birim şekil değiştirme değerleri.....	79
Tablo 4.12. 400 kN yük altında kiriş değerleri .....	79
Tablo 4.13. 400 kN yükte beton ve donatıların gerilme ve asal birim uzama değerleri .	80

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

$a$	Kiriş kesme açıklığı
$A_{shx}$	x doğrultusunda uzanan toplam enine donatı kesit alanı
$A_{shy}$	y doğrultusunda uzanan toplam enine donatı kesit alanı
$a_i$	Kırılma çizgisi ile yakındaki mesnet arasındaki ortalama mesafe
$b$	Enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonun x'e paralel boyut
$b_i$	Kırılma kesitinin ortalama genişliği
$d$	Kesitin etkili derinliği
$E_{sec}$	Beton kesitin sekant modülünü
$El$	Kesitin eğilme rijitliği
$F_{sw}$	Eğik çatlakın kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamı
$f_c$	Tek eksenli maksimum basınç mukavemeti
$f_{cc}$	Sargılı betonun basınç dayanımını
$f_{co}$	Sargısız betonun basınç dayanımını
$f_{ck}$	Betonun karakteristik basınç dayanımı
$f_e$	Ortalama etkili sargı basıncı
$f_{ex}$	x doğrultusundaki etkili sargı basıncı
$f_{ey}$	y doğrultusundaki etkili sargı basıncı
$f_t$	Tek eksenli maksimum çekme mukavemeti
$f_y$	Donatının akma dayanımı
$f_{yw}$	Enine donatıdaki gerilme artışı
$f_{ywd}$	Enine donatının tasarım akma dayanımı
$h$	Enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonun y'ye paralel boyut
$h_i^2$	Kırılma kesitinin ortalama yüksekliği
$k_e$	Sargılamanın etkinliği ile ilgili katsayısı
$L$	Yükleme tablası mesnetleri arasındaki açıklık
$M_u$	Donatının kopma momenti
$M_y$	Donatının akma momenti
$n$	Boyuna donatı sayısı
$P$	Deney presinde kırılma anındaki en büyük yük
$s$	Enine donatı aralıkları
$s'$	Enine donatı net aralığı
$V_{cc}$	Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından karşılanan kesme

$V_{cd}$	Çekme donatısının taşıdığı kesme kuvveti
$V_{ci}$	Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvveti
$V_d$	Tüm yük birleşimleri için belirlenen tasarım kesme kuvvetlerinden en büyüğü
$V_e^d$	Kiriş sarılma bölgesi için mesnet yüzünden faydalı yükseklik kadar mesafedeki kesme kuvveti
$V_e^{2hk}$	Orta bölge için mesnet yüzünden kiriş yüksekliğinin iki katı kadar mesafedeki kesme kuvveti
$V_E^{Ra=2}$	Ra=2 alınarak deprem hesabından elde edilen kesme kuvveti
$V_W^E$	Deprem yükü birleşimi için enine donatı hesabında kullanılacak olan kesme kuvveti
$V_g$	Kalıcı yüklerden hesaplanan kesme kuvveti
$V_q$	Hareketli yüklerden hesaplanan kesme kuvveti
$V_W^v$	Düşey yük birleşimleri için enine donatı hesabında kullanılacak olan kesme kuvveti
$V_W^{vd}$	Düşey yük birleşimlerine göre mesnet yüzünden faydalı yükseklik
$V_W^{v2hk}$	Düşey yük birleşimlerine göre mesnet yüzünden kiriş yüksekliğinin iki katı kadar mesafedeki kesme kuvveti
$w_i$	Kesit çerçevesindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı
$\phi_u$	Kopma anındaki eğrilik değeri
$\phi_y$	Akma anındaki eğrilik değeri
$\epsilon_{cc}$	Sargılı betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme
$\epsilon_{cu}$	Beton ezilme birim kısalması
$\epsilon_{cru}$	Sargısız betonda kabuk betonun dökülmesi sonrasında nihai birim
$\epsilon_{su}$	Enine donatının nihai çekme birim şekil değiştirme değeri
$\lambda_c$	Sargılı beton dayanımının sargısız beton dayanımına oranı
$\rho$	Kesitteki donatı oranı
$\rho_b$	Kirişin kesme kapasitesine eğilmeden önce ulaşabilmesi için boyuna donatının oranı
$\rho_w$	Etriye oranı
$\rho_{cc}$	Toplam boyuna donatının beton çekirdek alanına oranı
$\sigma$	Normal gerilme
$\sigma_2$	Yanal basınç gerilmesi
$\tau$	Kayma gerilmesi
$\delta_E$	Eğilmede çekme dayanımı
$\mu$	Eğilme rijitliği
$\rho$	Eğrilik yarıçapı

## Kısaltmalar

ABS	American Bureau of Shipping (Amerikan Denizcilik Bürosu)
ASCE-ACI	American Society of Civil Engineers–American Concrete Institute (Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği)-(Amerikan Beton Enstitüsü)
BISO	Bilinear Isotropic Hardening (Bilineer İzotropik Pekleşme)
BKIN	Bilinear Kinematic Hardening (Bilineer Kinematik Pekleşme)
FEARCM	Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members (Betonarme Elemanların Sonlu Elemanlar Analizi)
FINEARCS	Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures ( Betonarme Yapıların Sonlu Elemanlar Analizi)
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
MISO	Multilinear Isotropic Hardening (Multilineer İzotropik Pekleşme)
MKIN	Multilinear Kinematic Hardening (Multilineer Kinematik Pekleşme)
TS	Türk Standartı



## 1. GİRİŞ

Deneyleerin yapılması için uygun koşulların sağlanmasında ve malzeme temininde yaşanan sıkıntılar sebebiyle çalışmaların sınırlı kalmasından dolayı, problemlerin analitik hesap ve bilgisayar ortamında model oluşturularak çözümlenmesi alternatif bir yöntem olarak tercih edilmektedir.

Tasarlanan tüm modeller, sınırsız bir şekilde, bilgisayar ortamında analiz yapılarak bilgisayarın kapasitesinin mümkün kıldığı hızda sonuçları görmemize olanak sağlamaktadır. Modelleme esnasında kullanılan malzemelerin özellikleri ve sınır şartları doğru ve eksiksiz tanımlanmalıdır. Betonarmeyi meydana getiren beton ve çeliğin şekil değiştirme özelliklerini belirlemek için yapılan deneysel ve analitik çözümlerlerden elde edilen sonuçların uyum içinde olması gerekmektedir. Şekil değiştirmelerin zamana ve yük geçmişine bağlı olması sebebiyle betonarmede gerilmeleri kesin olarak hesaplamak olanaksızdır. Bu yüzden modelin parametreleri doğru girilmeli, şekil değiştirme sınır değerleri iyi kavranmalı ve değerlendirilmelidir. Şekil değiştirme özelliklerine paralel olarak betonarme elemanların çeşitli koşullar altında nasıl güç tüketmesi durumuna ulaştığı da çok iyi bilinmelidir.

Sonlu elemanlar yöntemi pek çok mühendislik uygulamasında kullanılan, karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla çözümünü sağlayan, yaygın ve kullanışlı bir çözüm metodudur. İlk olarak 1950'lerde Boeing'in uçak kanatlarında bu yöntem kullanılmaya başlanıp, takip eden yıllarda da diğer mühendislik dallarınca benimsenmiştir. ANSYS paket programı ilk kez 1971 yılında geliştirildikten sonra bu yöntem ile analizler yapılmasına yaklaşık 50 yıldır devam edilmektedir. Bu çalışma için, sonlu elemanlar yöntemini temel alan ANSYS programı seçilmiştir. Yükleme esnasında beton, doğrusal davranış göstermeyen bir malzeme olduğundan, ANSYS programında, bu davranışı gösterecek şekilde modellenmiştir.

Kesme etkilerinden kaynaklanan asal çekme gerilmelerini karşılamak için etriyelerin bu gerilmelere dik bir biçimde konumlandırılması en yüksek tesiri gösterecektir ancak özellikle depreme bağlı olarak gelişen tersinir yükleme durumlarında betonarme eleman içerisindeki asal gerilmelerin yönü de değişeceğinden, etriyeler genel olarak eleman

eksenine dik bir biçimde yerleştirilirler (Özkal, 2017). Bu sebeple etriyelerin farklı konumlandırılması durumunda davranışlarını tespit etmenin önemi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmamızda etriyeleri farklı açılarda konumlandırırken helezonik olmaları halinde kirişte meydana gelen kesme davranışını ve kapalı etriye olması durumunda ortaya çıkan farkları da görebilmek için numunelerin dördü helezonik biri ise kapalı etriye şeklinde tasarlandı.

Helezonik etriye uygulaması ve yük altındaki kirişte meydana gelen asal gerilmelere yaklaşık dik açı ile etriye denk getirilmesi halinde betonarme elemanın sünekliğinde ve performansında meydana gelen değişimleri tespit etmek amacıyla yapılan bu çalışmada kirişin analitik modeli oluşturularak numuneler analiz edilecektir.

Farklı açıdaki helezonik, enine donatılı betonarme kiriş elemanlarında yükleme sırasında oluşan, çatlama ve nonlinear davranışları gözlemlemek amacıyla tasarlanan modeller, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ANSYS programında APDL modülü üzerinden analize tabii tutulmuştur. Analizi amaçlanan betonarme kiriş modellerinin nonlinear analiz adımları anlatılmış ve modelleme esnasında karşımıza gelecek parametreler üzerinde kısaca durulmuştur. Ardından analitik modelden elde edilen veriler karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Modellerin davranışının test adımları arttırılarak gerçekçi sonuçlar alınabilmesi için özen gösterilmiştir. Bu kapsamda kesitte meydana gelen betonun çatlama, donatının akması, betonun ezilmesi gibi kritik durumlar değerler ve grafikler üzerinden belirtilmiştir. Buradan yola çıkarak, farklı açıdaki modellerin davranışları karşılaştırılmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin betonarmeye ilk uygulaması Ngo ve Scordelis tarafından 1967'de gerçekleştirilmiştir (Wasti, 1990). Bu çalışmada betonarme kirişler üç boyutlu sonlu elemanlarla lineer elastik olarak modellenerek incelenmiştir. Çalışmada betonla donatı arasındaki aderans modellenip, bununla birlikte çatlakların oluşması ile ilgili varsayımlardan bahsedilmiştir. Doğrusal bağıntılarla betonun davranışı ifade edilemeyeceğinden bilgisayar programına ihtiyaç duyulmuştur. Çalışmada FEARCM ve FINEARCS adlı programlardan bahsedilmiştir.

Hamil vd. (2000) çalışmasında SBETA adlı programda betonarme kolon-kiriş birleşim bölgeleri için analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ile 16 adet deney sonucu karşılaştırma

yapılarak analizin doğruluğundan bahsedilmiştir. Çalışmada modeller, beton dayanımı ve düğüm noktalarında çekme donatısı bulunup bulunmaması parametrelerine göre incelenmiştir.

Ashour (2000) tarafından beton basınç dayanımının ve çekme donatısı oranının yüksek mukavemetli betondan üretilen betonarme kirişler üzerindeki etkisi, dokuz kiriş üzerinde yapılan deneysel çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmada çatlakları oluşturan moment değerleri üzerinde de değerlendirme yapılmış ve aynı boyuna donatı için beton mukavemeti arttıkça çekme çatlaklarının oluştuğu momentte artış gözlenmiştir. Bununla beraber, beton mukavemeti ile eğilme rijitliğinin doğru orantılı olduğu ve beton mukavemetiyle tarafsız eksen derinliğinin ters orantılı olduğu belirtilmiştir.

Ko vd. (2001) tarafından kuşatılmış (sargılı) otuz altı kiriş üzerinde deneysel çalışma yapılarak yüksek mukavemetli betondan üretilmiş betonarme kirişlerin elastik ötesi dönme kapasitesi, kesitlerin akma eğrilikleri ve son limit durumdaki betonun üst basınç lifindeki maksimum şekil değişimi incelenerek lifteki şekil değişimi tanımlanmıştır.

Kaplan ve Şenel (2002) yaptıkları çalışmada farklı donatı oranlarına sahip derin kirişlerin deprem yükü altındaki davranışlarını hem kuramsal hem de deneysel olarak incelemiştir.

Lundgren vd. (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada beton ve donatı arasındaki aderansı modelleyebilmek için nonlinear sonlu eleman yöntemi ile üç boyutlu model oluşturulup betonun göçmesine göre hesaplanan üst sınır gerilme dikkate alınarak analiz edilmiştir. Beton ve donatı solid elemanlarla modellenmiştir. Bu çalışmada DIANA programı kullanılmıştır. Programda beton ve donatı arasındaki aderansı tanımlayabilecek imkânlar mevcuttur. Çalışma sonucunda elde edilen aderans modelinin hem boyuna donatı hem de etriye için geçerli olduğundan bahsedilmiştir.

Ho vd.(2003) tarafından normal ve yüksek mukavemetli betonlarla yapılan deneylerde eğilmeye maruz kirişlerin sınır durumdaki davranışlarının teorik çözümlmelerini tanımlanmıştır. Çekme donatısının dengeli donatıya oranı ile değişimi ve eğrilik duktilitesinin beton mukavemetini dikkate alan bir bağıntı önerilmiştir.

Arslan'ın (2004) çalışmasında sonlu elemanların boyutunun etkisi araştırılmıştır.

Tasarlanan betonarme kirişte yalnızca iki sıra çekme donatısı bulunmaktadır. Üç noktalı eğilme deneyinde tekil yükle yüklenmiş kirişte beton için iki farklı kırılma kriteri seçilip analitik çözümler buna göre yapılmıştır. Analizler LUSAS programı kullanılarak yapılmış, veriler deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Özmen vd. (2007) farklı sargı aralığı ve beton sınıflarının eleman ve sistem sünekliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlardan, eleman bazında belirgin olan moment-eğrilik farklılıklarının sistem bazında etkisini yitirdiği gözlenmiştir.

Cihanlı ve Arslan (2009) analitik çözümlerle beton dayanımı, çekme donatısı oranı ve çelik donatı akma dayanımı değişiminin kesit eğrilik sünekliğini nasıl etkilediğini incelemiştir.

Kıracı ve Erdem (2010) betonarme bir elemanın eğrilik sünekliğini etkileyen faktörleri araştırmak için beton basınç dayanımı, çekme donatısı akma dayanımı, çekme donatısı oranı, basınç donatısı oranı, etriye oranı ve sıklığı, etriye donatısı akma dayanımını parametre olarak belirlemiştir. Bu parametreleri esas alarak 51 tane kiriş numunesini modelleyip moment-eğrilik grafiklerini SEMAP programı yardımıyla elde etmişler ve elde edilen sonuçlar ile sünekliğe etkisi hakkında sonuca ulaşmışlardır.

Garip (2011) çekme donatısı oranı değişken, kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2,5 olan kirişlerin deneysel çatlama ve göçme kesme mukavemetleri üzerine çalışma yürütmüş, elde edilen sonuçları kabul görmüş çatlama ve göçme kesme mukavemetini veren denklemlerle karşılaştırmıştır. Ayrıca deney çıktılarından alınan kiriş verileri kullanılarak önerilmiş kesme mukavemeti denklemlerinin deney sonuçlarla ne ölçüde tutarlı olduğu karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Ali (2017) içi boş kesitli betonarme kirişlerin monolitik yükleme altında analizi için 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini uygulamada, ANSYS paket programı kullanılmıştır. Birçok delikli betonarme eleman tipi analiz edilmiş ve sonlu elemanlar çözümleri deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çeşitli parametrik çalışmalar gerçekleştirilip ağ yoğunluğu ve ağ boyutunun sonlu elemanlar model sonuçlarının doğruluğu üzerine etkisi incelenmiştir.

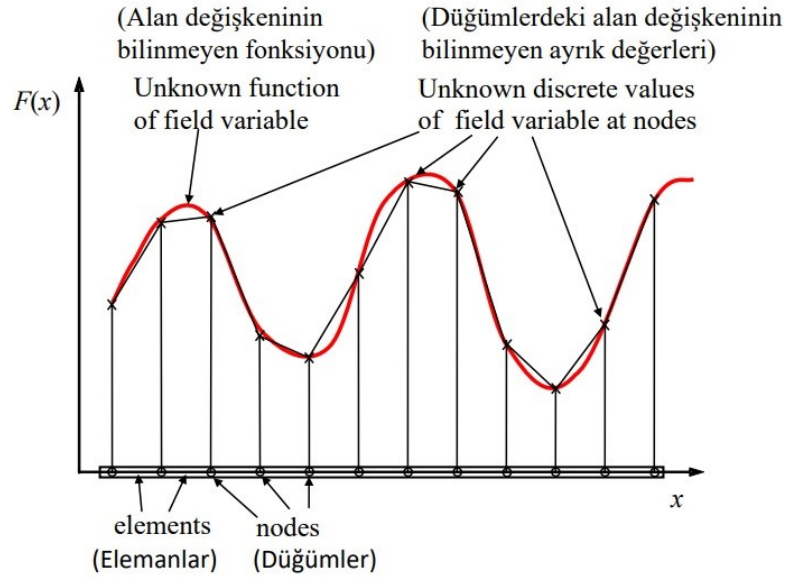
## 2. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde analiz için kullanılan sonlu eleman yönteminden, yöntemin çözümünde izlenilecek adımlardan, avantaj ve dezavantajlarından, betonarmede eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisinden kısaca bahsedilecektir.

### 2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilebilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir.

Yöntemin amacı, çözüm aranan cismi veya bölgeyi veya yapıyı istenen sayıda küçük sonlu elemanlara bölmektir. Bu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler ve birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmaktadır (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1** Sonlu eleman yönteminin matematik model olarak tanımlanması (Demir, 2001)

Analitik çözümler yalnızca fizik problemlerinin bazı basitleştirilmiş ve sadeleştirilmiş matematik modelleri için elde edilebilir. Uygulamada karşılaşılan pek çok mühendislik

problemi için kapalı çözüm bulmak mümkün değildir. Örneğin düzgün olmayan geometri, karışık sınır koşulları, üniform olmayan yüklemeler, lineer olmayan malzeme davranışı gibi nedenlerle bu gibi kapalı çözümlerin elde edilmesi çok güçleşmekte veya olanaksız hale gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması halinde bu gibi durumlara ait yaklaşık çözümler kolaylıkla elde edilebilmektedir (Demirer, 2011).

Araştırılan kısımda belirli bir sayıda düğüm noktasının seçilmesine “ayrıklaştırma” denir. Ayrıklaştırmanın yolu ise araştırılmak istenen kısmı yeterince sonlu elemana bölmektir. Bu kısımların toplamı araştırılan asıl cisim veya yapıyı temsil eder. Bu yöntem sayesinde cisim veya yapının tümünü çözmektense, kısımlarda meydana gelen çözümler toplanır. Çözüm ne kadar hassasiyet ile isteniyor ise asıl yapı o kadar küçük parçalara bölünmelidir. Elbette ki her araştırmada maksimum hassasiyetli veriler alınmak istenir ancak bu verilerin analizinin yapılabilmesi için donanımı güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır.

### **2.1.1 Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümünde izlenecek adımlar**

Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümünde yapılacak işlem sırası;

- Modelin sonlu elemanlara bölünmesi,
- Eleman rijitlik matrislerinin oluşturulması,
- Yerel eleman rijitlik matrislerinin birleştirilerek sistem rijitlik matrislerinin elde edilmesi,
- Yük matrisinin oluşturulması,
- Sınır-Mesnet şartlarının tanımlanması,
- Sistemin çözümlenmesi,
- Mesnet tepkileri ve iç kuvvetlerin hesaplanması şeklinde sıralanabilir (Hacısalıhoğlu, 2010).

### **2.1.2 Sonlu elemanlar yönteminin avantaj ve dezavantajları**

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları genel olarak;

- Modeller tasarım geliştirmede kullanılır.



- Prototip gerektirmez.
- Uygulamada verimlidir.
- Sonuçların hassaslığı kontrol edilebilir ve ihtiyaca göre hassasiyet değiştirilebilir.
- Sonlu elemanlar yöntemi belirli şartlar için kullanılabilen bir yöntem değildir. Ortam geometrisinin düzensiz ve heterojen oluşu bu yöntem için bir engel değildir ve çeşitli tipteki sınır şartlarının probleme dahil edilmesine imkan verir (Güler ve Şen, 2015).

Sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları ise;

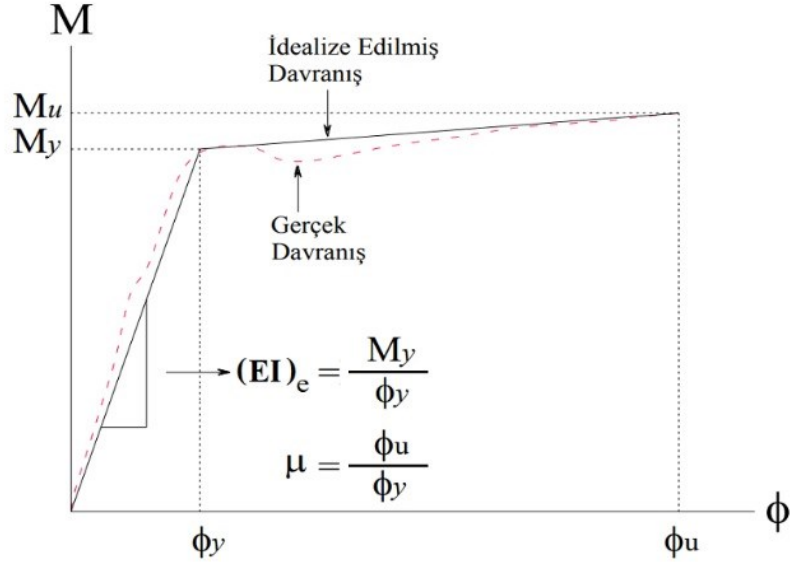
- Modelleme kabulleri,
- Komponent etkileşimlerinin tahmin zorluğu,
- Modelin bağlantı tasarımlarının zorluğu,
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılan esas teori kadar doğrudur. Malzemenin fiziksel verilerinin ve eleman verilerinin temininde ve bilgisayara yüklenmesinde yapılan hatalar sonuca olumsuz yönde etki edecektir.
- Daha kesin sonuçlar, daha küçük eleman boyutları ile elde edilecektir. Eleman boyutlarının küçülmesi ise daha büyük bilgisayar hafızası gerektirir. Buna göre bilgisayar hafızasının sınırlı oluşu çözümün hassasiyetine bir sınırlama getirecektir (Güler ve Şen, 2015).

## 2.2 Betonarme Elemanlarda Eğilme Momenti Ve Kesme Kuvveti Etkisi

### 2.2.1 Eğilme momenti

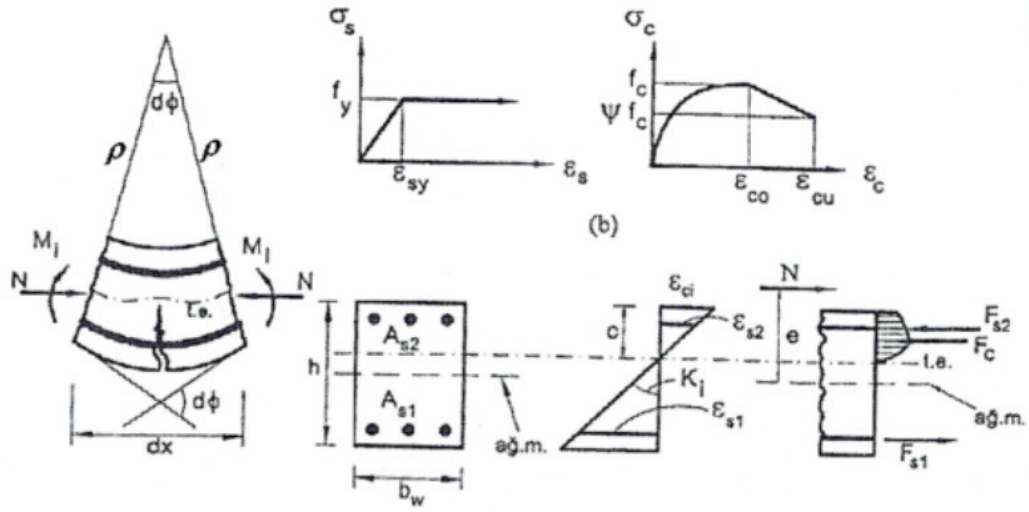
Eğilme momentinin küçük değerlerinde betonda basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelir. Donatı henüz elastik durumdadır ve henüz kesit davranışına etkisi azdır. Betonun eğilme rijitliğinde atalet momenti ve elastisite modülü etkili olur. Momentin artmasıyla çekme bölgesindeki beton çatlaklar, çatlak tarafsız eksene doğru ilerler ve eğilme rijitliğinde azalma görülür. Çekme gerilmelerinin büyük çoğunluğu çekme donatısı tarafından karşılanır. Betonun çatlaması ile moment-eğrilik grafiğinde (Şekil 2.2) doğrusal davranıştan ayrılma gözükür. Gerilmelerin artmasıyla doğrusal davranıştan uzaklaşılır. Betonun basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olmayan bir değişimle oluşurken, donatı da akma gerilmesine ulaşır. Bu değer  $M_y$  akma momenti olarak

adlandırılır. Gerilmelerin artmasıyla beton doğrusal olmayan grafiği çok daha belirgin duruma gelirken donatı da plastik uzama yapar. Donatının uzama kapasitesi büyük olduğundan, güç tükenmesi betonun en büyük kısıalma kapasitesine erişmesiyle oluşur.



**Şekil 2.2** Moment-eğrilik ilişkisi (İnşaport, 2019)

Bir kesitte moment eğrilik ( $M - \phi$ ) grafiğinde yataya yakın kolun uzun olması (güç tükenmesinin sünek olması) çekme donatısının miktarına bağlıdır. Kesitte çekme donatısı, dengeli donatıdan daha büyük olduğunda donatı akmaya ulaşmadan beton en büyük kısılmasına ( $\epsilon_{cu}$ ) ve kesit de güç tükenmesine erişir. Bu durumda  $M - \phi$  belirgin yatay kol ortaya çıkmaz ve güç tükenmesi gevrek olarak meydana gelir. Çalışmamızda da gevrek kırılma amaçlandığı için çekme bölgesindeki donatılar dengeli donatıdan daha büyük tasarlanmıştır.



**Şekil 2.3** Eğrilik ve malzeme modelleri (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Betonarme bir elemanda eğrilik Şekil 2.3'teki model ve bu model üzerinden Eş. 2.1 ve Eş. 2.2 ile hesaplanır.

$$K = \frac{d\phi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \quad (2.1)$$

$$K = \frac{\epsilon_x}{y} = \frac{\epsilon_{ci}}{c} \quad (2.2)$$

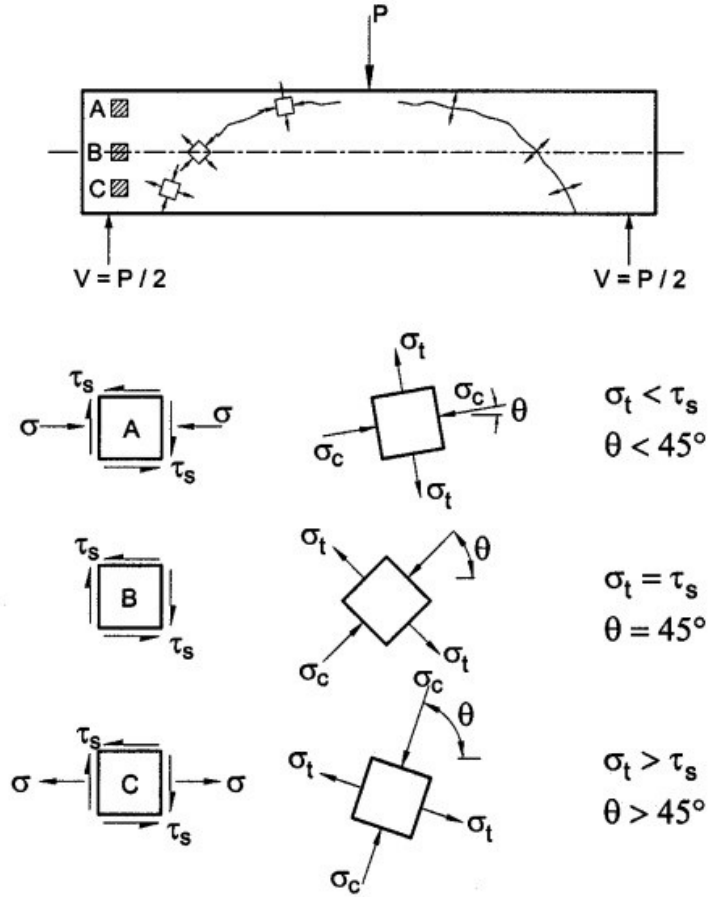
Betonarme elemanların eğilme rijitliği, moment eğrilik eğrisinin eğimi olarak tanımlanabilir. Kesitin eğilme rijitliği Eş. 2.3 ile hesaplanır.

$$EI = \frac{M}{\phi} \quad (2.3)$$

### 2.2.2 Kesme kuvveti

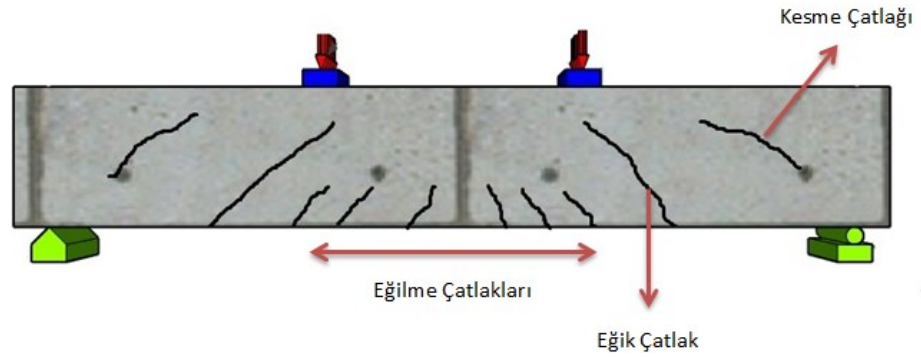
Eksenel kuvvet ve eğilme momenti normal gerilme ( $\sigma$ ) oluştururken, kesme kuvveti ve burulma momenti kayma gerilmesi ( $\tau$ ) oluşturmaktadır. Kiriş uzunluğu boyunca kesme kuvvetinin değeri, yüklemeye bağlı olarak değişmektedir. Kesme etkisindeki bir kirişin kırılma biçimi; yüklemeye, yükün mesnede olan uzaklığına, çekme ve kesme donatılarının oran ve düzenine, beton basınç dayanımına, kiriş derinliğine bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi tarafsız eksen düzeyinde normal gerilmeler sıfır olduğundan, çatlama kiriş eksenine  $45^\circ$ 'lik bir açıda oluşmaktadır. Normal gerilmelerin varlığı, hem asal çekme gerilmelerinin büyüklüğünü hem de eğimini etkilemektedir. Çatlama, asal çekme gerilmelerine dik yönde oluştuğundan, kirişin alt yüzünden üst yüzüne doğru uzayan eğik çatlağın eğimi azalmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2001).



Şekil 2.4 Asal gerilmelerin yönü (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Dört noktalı eğilme deneyinde mesnetlerden yüklere kadar olan kısımlarda (kesme açıklığı) kesme kuvveti ve eğilme momenti, yükler arasında ise sadece eğilme momenti oluşmaktadır. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi kesme çatlağı tarafsız eksen bölgesinde belirlemekte ve alt ve üst yüzeylere ulaşmamaktadır. Alt yüzeye ulaşan çatlaklar ise eğik çatlaklardır. Eğik çatlak olarak nitelendirebilmek için çekme donatısında ani gerilme artışına neden olması ve çatlağın kiriş derinliği boyunca eğik olması gerekmektedir. Eğik çekme çatlağı, kesme ve eğilmenin ortak etkisinden oluşmaktadır.



**Şekil 2.5** Çatlak çeşitleri

Eğilme çatlakları kirişin alt yüzeyinde, açıklığın orta kısmında meydana gelir. Kesmenin büyük olmadığı yerlerde eğilme çatlakları eksene diktir ve çatlak genişliği çekme bölgesinden basınç bölgesine doğru azalır.

Çekme bölgesindeki eğilme çatlaklarını betonun dişleri, basınç bölgesini de beton tarağın omurgası gibi gördüğünü ifade eden Kani (1964), bu durumu tarak görüntüsüyle benzeştirmiştir.

### 2.2.2.1 Kesme donatısız kirişlerin davranışları

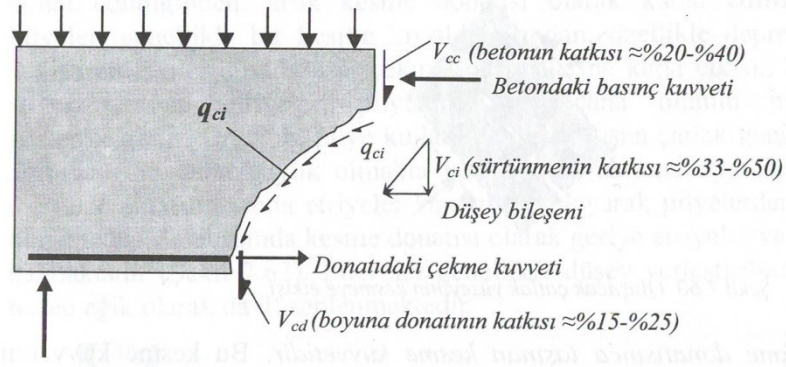
Kesme donatısı olmayan kirişlerde kesme kuvveti, üç iç kuvvetin (betondaki basınç dayanımı, sürtünme ve boyuna donatının çekme kuvveti ) bileşkesiyle karşılanmaktadır.

Beton basınç dayanımının katkısı: Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından karşılanır. Yük artmaya başladıkça basınç etkisindeki alan da artarak daha fazla kesme kuvveti karşılar. Ancak yükün aşırı artmasıyla da bu durum tersine döner.

Sürtünme katkısı: Çatlak yüzündeki sürtünme ile karşılanır.

Boyuna donatı katkısı: Çatlak oluştuktan sonra çatlağın iki yanındaki kiriş parçasının yer değiştirmesini engellemeye çalışır.

Kesme donatısı bulunmayan ve eğik çatlağın olduğu bir kirişteki kesme etkisi Şekil 2.6'da gösterildiği gibi üç iç kuvvet ( $V_{cc}$ ,  $V_{ci}$  ve  $V_{cd}$ ) tarafından karşılanmaktadır (Doğangün, 2010).



**Şekil 2.6** Kesme donatısı bulunmayan kirişlerde iç kuvvetler (Doğangün, 2010)

Şekil 2.6'ya göre denge denklemi,

$$V = V_{cc} + V_{ci} + V_{cd} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılır. Burada,

$V_{cc}$ : Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından karşılanan kesme kuvveti

$V_{ci}$ : Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvveti

$V_{cd}$ : Çekme donatısının taşıdığı kesme kuvveti

şeklinde tanımlanır.

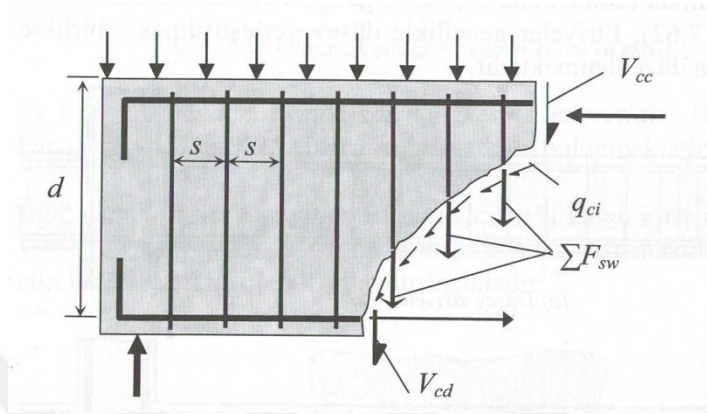
### 2.2.2.2 Kesme donatılı kirişlerin davranışları

Kesme kuvvetini karşılayan diğer elemanlar ise etriyeler, pilyeler ve hasır donatılardır. Ancak deprem gibi yön değiştiren etkiler altında asal çekme gerilmelerinde etkisiz kaldıklarından, yönetmeliklerde kesme donatısı olarak kabul edilmezler. Etriyeler, pilyelere göre daha başarılı davranış göstererek, çatlak genişliğini daha az miktarda tutar. Mesnete yakın yüklerin de mesnede aktarılmasında kiriş içinde meydana gelen kemeri sararak kesme kuvvetine karşı daha etkili görev üstlenmektedir.

TS500 ve Deprem Yönetmeliğinde gevrek kırılmayı önlemek adına kiriş boyunca etriye donatısının hesaplanan aralıklarla yerleştirilmesi zorunludur. Etriyelerin eğilme çatlaklarını engellemediği, sadece dağılımını ve genişliğini etkilediği gibi eğik çatlakların oluşmasını da engellemez, kılcal düzeyde kalmasını sağlar.



Doğangün (2010)' ün belirttiği üzere “Kesme donatılı kirişlerde kesme kuvvetini dört iç kuvvetin ( $V_{cc}$ ,  $V_{ci}$ ,  $V_{cd}$  ve  $\sum F_{sw}$ ) bileşkesi karşılamaktadır (Şekil 2.7). Bunlardan üçü donatısız kirişlerde bahsettiğimiz iç kuvvetleridir. Dördüncü iç kuvvet ise eğik çatlakların kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamıdır.”



Şekil 2.7 Kesme donatılı bulunan kirişlerde iç kuvvetler (Doğangün, 2010)

Şekil 2.7'ye göre denge denklemi,

$$V = V_{cc} + V_{ci} + V_{cd} + \sum F_{sw} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılır. Burada,

$V_{cc}$ : Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından karşılanan kesme kuvveti

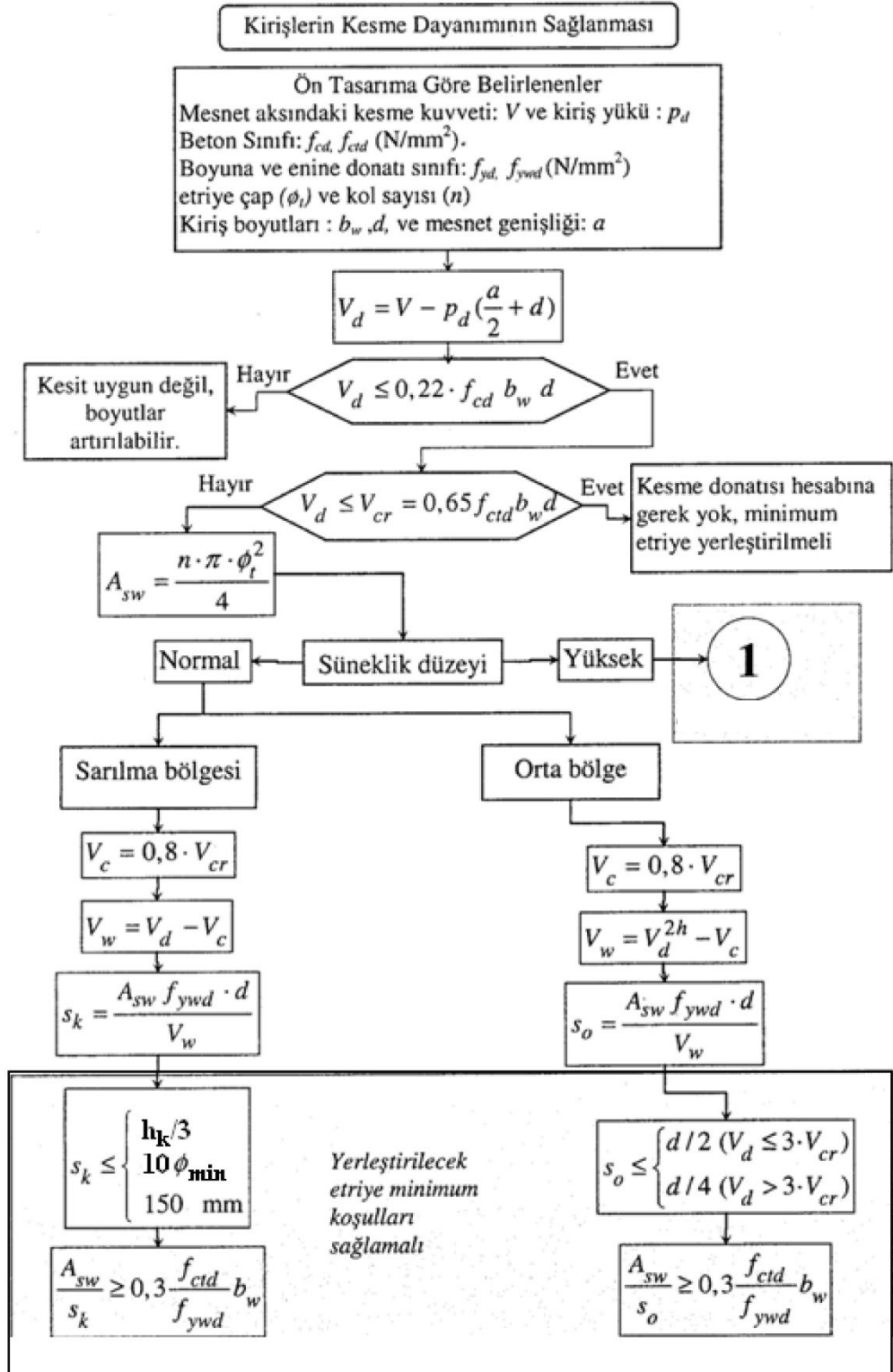
$V_{ci}$ : Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvveti

$V_{cd}$ : Çekme donatısının taşıdığı kesme kuvveti

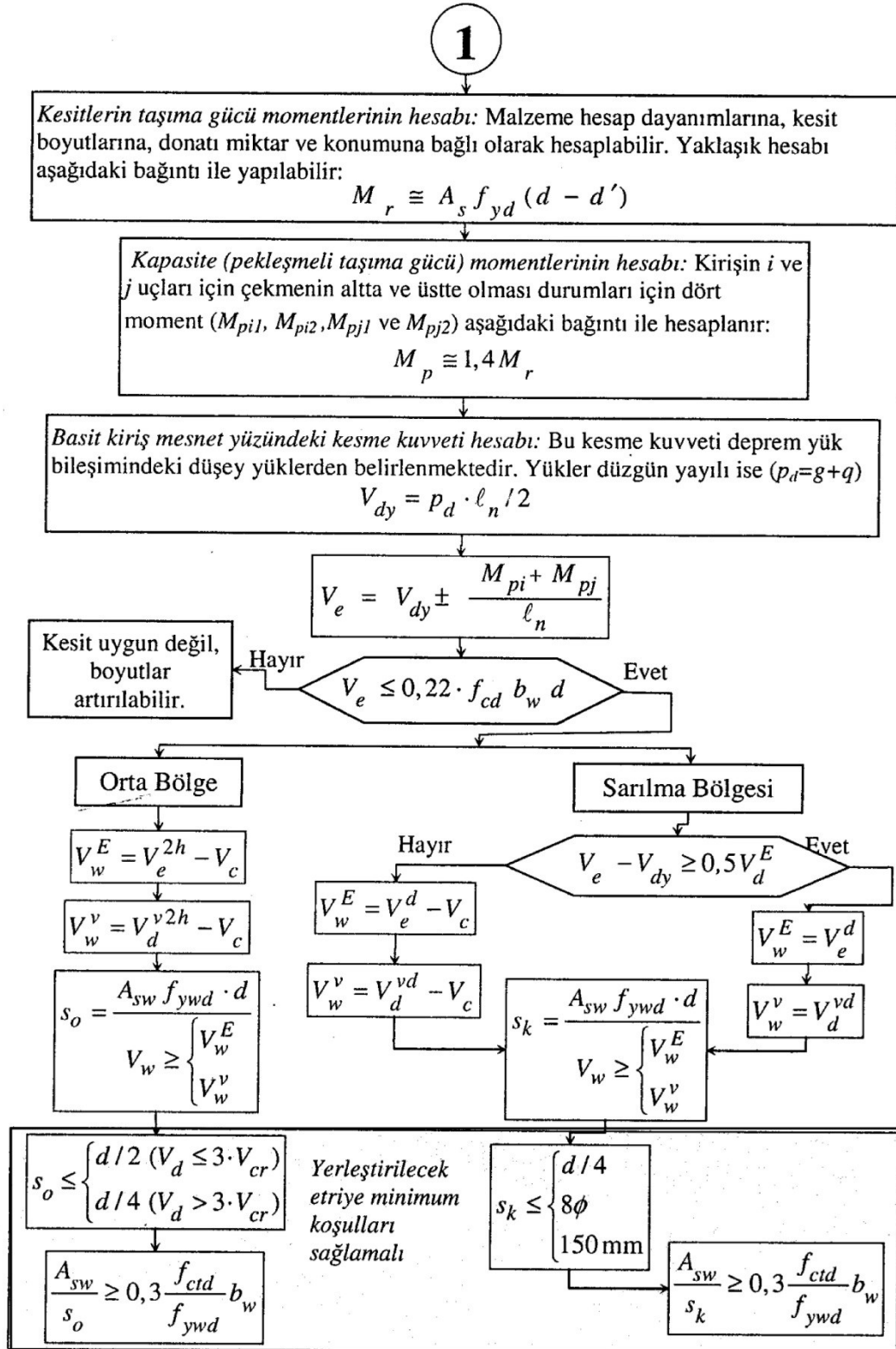
$\sum F_{sw}$ : Eğik çatlakların kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamı şeklinde tanımlanır.

Çok donatılı kesitte ( $\rho=0.02$ ) yüksek mukavemete karşılık akma anından itibaren ani moment düşüşüyle birlikte eğrilikte fazla artış olmadan ani (gevrek) kırılma meydana gelmektedir. Bunu önlemek için kesitte kuşatma (sargı) donatısı kullanılmaktadır. Kuşatma donatısının kullanılması kesitin daha sünek davranmasını sağlamaktadır (Cihanlı, 2009).

Kirişlere yerleştirilecek olan kesme donatısının belirlenmesi Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da verilen akış şemasında özetlenmektedir.



Şekil 2.8 Kirişlere yerleştirilecek olan kesme donatısı için hesap diyagramı (Doğangün, 2010)



**Şekil 2.9** Kirişlere yerleştirilecek olan kesme donatısı hesap diyagramı (Doğangün, 2010)

Burada,

$V_d$ : Tüm yük birleşimleri için belirlenen tasarım kesme kuvvetlerinden en büyüğü

$V_e^d$ : Kiriş sarılma bölgesi için mesnet yüzünden faydalı yükseklik kadar mesafedeki kesme kuvveti

$V_e^{2hk}$ : Orta bölge için mesnet yüzünden kiriş yüksekliğinin iki katı kadar mesafedeki kesme kuvveti

$V_E^{Ra=2}$ :  $Ra=2$  alınarak deprem hesabından elde edilen kesme kuvveti

$V_w^E$ : Deprem yükü birleşimi için enine donatı hesabında kullanılacak olan kesme kuvveti

$V_g$  ve  $V_q$ : Kalıcı hareketli yüklerden hesaplanan kesme kuvveti

$V_w^v$ : Düşey yük birleşimleri için enine donatı hesabında kullanılacak olan kesme kuvveti

$V_w^{vd}$ : Düşey yük birleşimlerine göre mesnet yüzünden faydalı yükseklik kadar mesafedeki kesme kuvveti

$V_w^{v2hk}$ : Düşey yük birleşimlerine göre mesnet yüzünden kiriş yüksekliğinin iki katı kadar mesafedeki kesme kuvveti

şeklinde tanımlanır.

Kesme kuvvetinin aktarımı, yapı elemanları için benzer şekilde olsa da, göçme ve çatlama durumları her elemanın kendine özgüdür. Betonun kesme dayanımı çekme dayanımına nazaran daha büyük olduğundan betonarmede doğrudan bir kesme kırılmasına genellikle maruz kalmaz. Basit kesme durumunda yapısal davranışı belirleyen etken, eğik çekme gerilmeleri olarak da isimlendirilen asal çekme gerilmeleridir (Özkal, 2017).

Kesme kırılmasının kirişlerde çok farklı tipleri vardır. Eğik çatlağın üzerinde basınç kenarının kayması ya da ezilmesi ile oluşan ve çekme donatısı boyunca ayrılımların meydana gelmesi ile beliren göçme biçimi en çok meydana gelen tiptir (ASCE-ACI 426, 1973).

Kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki bir elemanda iki eksenli gerilme durumu ortaya çıkar. Yeterli kesme donatısı bulunmayan bir kiriş, artan yük altında eğilme mukavemetine ulaşmadan, mesnetlere yakın bölgelerde oluşan, yatayla yaklaşık  $45^\circ$  eğimli çatlaklarla güç tükenmesi durumuna gelebilir (Arslan, 2005).

### 2.2.2.3 a/d oranının etkisi

Sadece hesaplama sonucunda belirlenen yeteri miktardaki donatı yerleştirilmesine ilaveten, bütün yükleme durumları altında tatmin edici bir davranış için donatının uygun bir şekilde detaylandırılması da büyük önem taşımaktadır. Betonarmede bileşik eğilme etkisindeki elemanlar için önce eğilme etkilerini karşılamak üzere boyuna donatı hesabı, ardından kesme etkilerini karşılamak üzere enine donatı hesabı gerçekleştirilmektedir. Bu hesaplar Türk ve yabancı ülkelerin standartlarında, esasen elemanların maruz kaldığı etkilerin değerleri üzerinden yapılırken bazı boyut etkileri göz ardı edilmektedir. Zira betonarme kirişlerde a/d oranı olarak tanımlanan kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı yapısal davranışta önemli farklar doğurmaktadır. Bu oran doğrultusunda kiriş davranışı ile kemer davranışı arasında bir geçiş ortaya çıkmaktadır (Özkal, 2017).

Kesme açıklığı-faydalı yükseklik oranının düşük olduğu kirişlerde, genel davranışın dışında, kesme bölgesi yerine orta bölgeye enine donatı konumlandırıldığında daha yüksek kesme kapasitesi ve sünekliğe ulaşıldığını gösteren çalışmalar (Kotsovos, 1984) mevcuttur. Bunun sebebi ise enine donatıların orta açıklıkta bulunması durumunda eğik çatlağın basınç kuşağına doğru ilerlemesini önlemesidir.

#### **Kirişlerde a/d Oranına Bağlı Olarak Güç Tükenmesi Oluşumları**

$(a/d) > 7$  ise; düşey yükler etkisiyle eğilme göçmesi oluşur. Eğilme etkisiyle oluşan çatlaklarının büyümesi ve çekme donatısının akmasıyla çekme kırılması meydana gelir. Kırılma üzerinde, kesme kuvvetinin etkisi sınırlıdır ve eğik çatlaklar önemli büyüklüklere ulaşmazlar (Orbay, 2005).

$2,5 < (a/d) < 7$  ise; 7'ye yakınsa kesme-çekme kırılması oluşur. Burada çatlak hızla ilerleyip gelişerek kırılmaya yol açar. Burada meydana gelen kırılma ani, gevrekli. 2,5 değerine yakınsa, kırılma, mesnet üzerinde aderansın kaybolmasıyla oluşur. Yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri çatlağın ilerleyişini engeller. Bu sebeple, mesnet bölgesinde meydana gelen aderans çatlakları, ilerlemesiyle kırılma gerçekleşir. Bu kırılma, gerçek eğik çekme kırılması olarak tanımlanır. Kesit eğilme dayanımına erişmeden geçer (Orbay, 2005). Yük ile birlikte Kirişte öncelikle eğilme çatlakları ortaya çıkar. Yük artmaya devam ettikçe de, eğik çekme gerilmeleri artar ve gövdede

çatlaklar meydana gelir. bu çatlakların bazıları eğikleşerek yüke doğru ilerler.

$1.0 < (a/d) < 2,5$  ise; etrafındaki basınç gerilmeleri, çatlağın ilerlemesini önler. Kırılma, mesnette donatı sıyrılması veya yük altındaki betonun ezilmesiyle oluşur. "a/d" oranının küçülmesi ile eğik çatlaklar daha dik hal alır. Bu da, asal beton basınç gerilmelerinin dikleşmesine ve kemerleşme etkisinin ortaya çıkmasına yol açar. Yük, mesnede yakın olmasından dolayı, eğilme ile aktarılmasının yanı sıra kemerleme etkisi olarak ortaya çıkan eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç çubukları ile de aktarılır. üst bölgedeki yüksek gerilmelerin etkisiyle beton ezilme ve kırılma meydana gelir (Orbay, 2005).

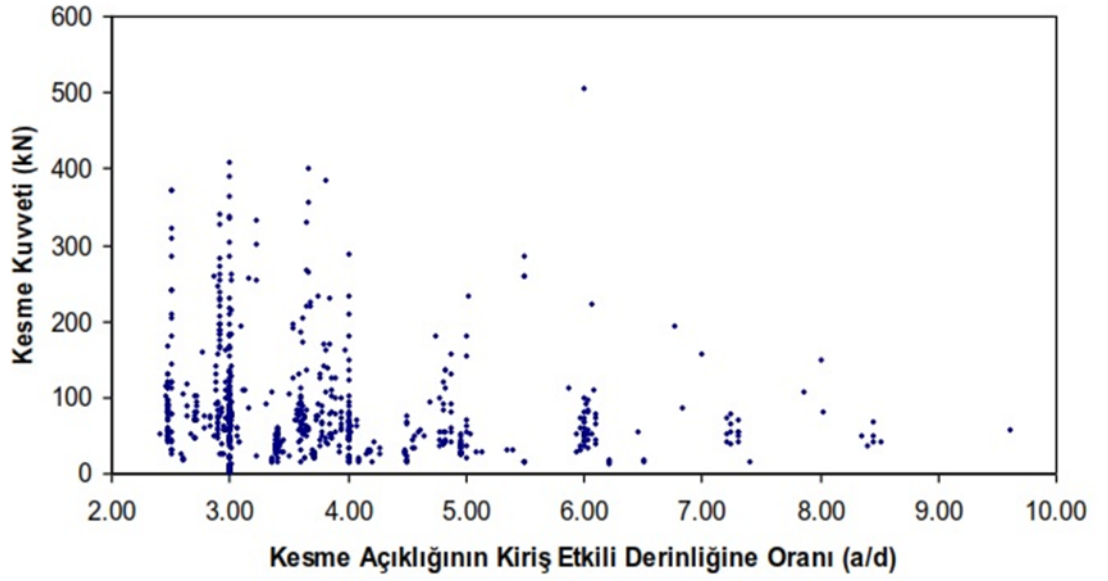
$(a/d) < 1,0$  ise; çatlak, yükleme noktasından mesnete doğru aktarılan basınç kuvvetinin etkisiyle oluşur. Çatlak, ilk olarak yükleme noktasına doğru ve ardından da mesnete doğru ilerler. Bu durumda kiriş davranışı etkisini tamamen yitirmekte ve sadece gergili kemer etkisinde bir davranış görülmektedir.

Özetle; a/d oranı arttıkça kirişlerde beklenen güç tükenmesinin kesme kırılmasından eğilme kırılmasına geçmesidir. Çalışmamızda bu yüzden a/d oranı 2 olarak belirlenip, kesme kırılması hedeflenmiştir.

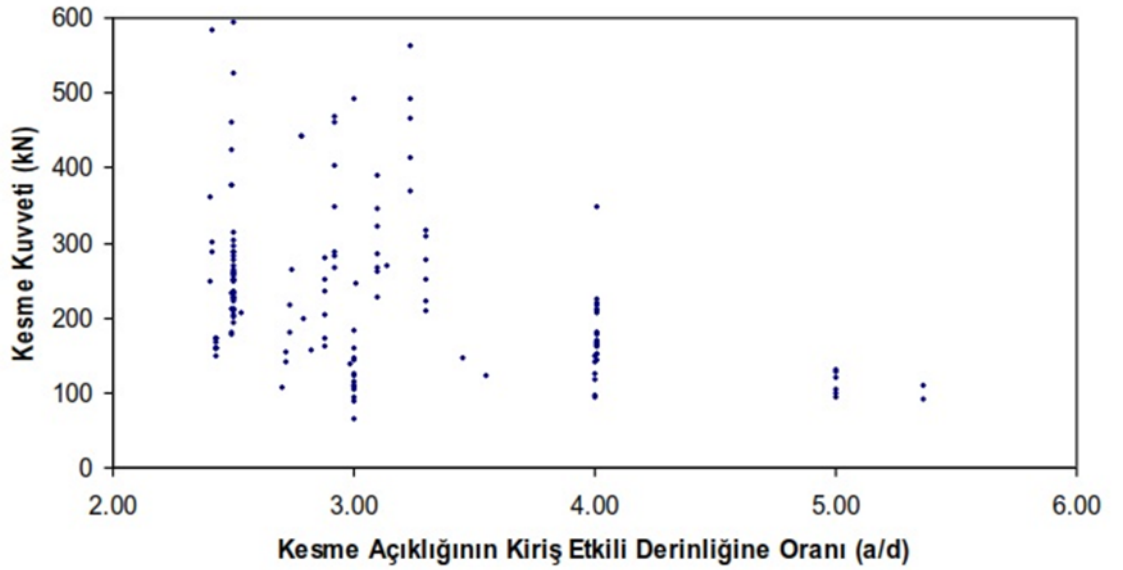
### **(a/d) oranının kesme kapasitesine etkisi**

Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de esas deneylerde kiriş kesme kapasitesine, kesme açıklığının kiriş etkili derinliğine oranının (a/d) etkisi gösterilmiştir.

a/d oranının 2 ila 4 arasında olması kesme kuvveti kapasitesini arttırdığı, bu oranın daha artmasının ise kesme dayanımını düşürdüğü grafiklerde görülmektedir. Yani kesme açıklığı arttıkça kesit eğilmeden taşıma kapasitesine daha küçük yüklerde ulaşır. Mesnete yakın olan kesme kuvvetinin kesit tarafından daha kolay taşınabildiğini göstermektedir.



**Şekil 2.10** Sargısız betonarme elemanlarda a/d oranının kesme kuvvetine etkisi (Sertkaya, 2017)



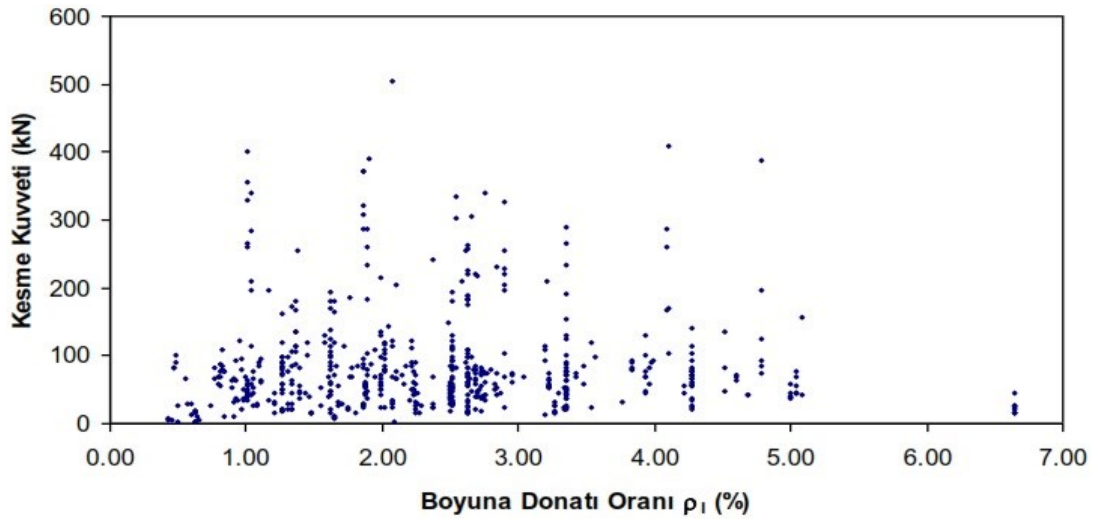
**Şekil 2.11** Sargılı betonarme elemanlarda a/d oranının kesme kuvvetine etkisi (Sertkaya, 2017)

#### 2.2.2.4 Boyuna donatı oranının kesme kapasitesine etkisi

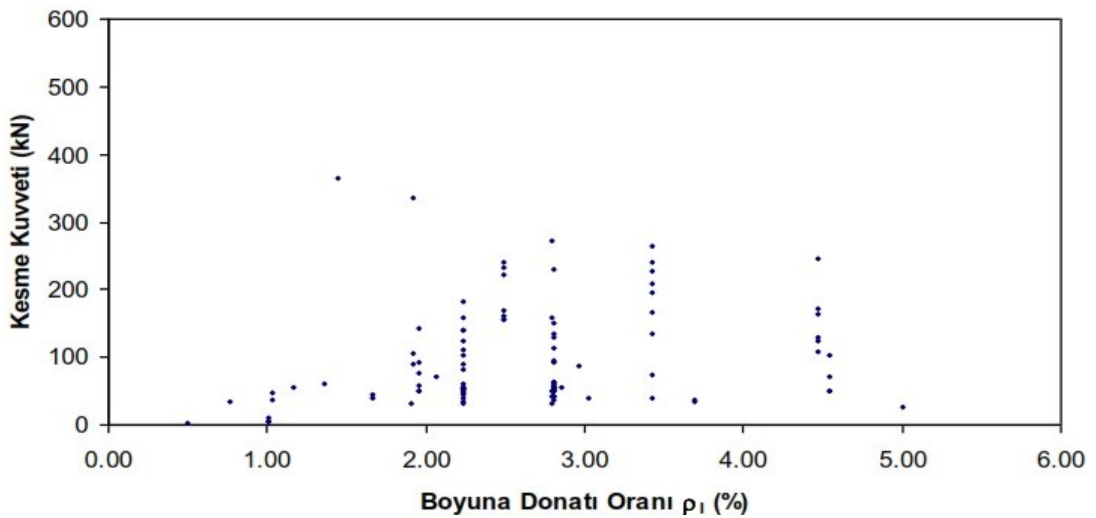
Yönetmeliklere göre kapasite tasarımı gereğince kirişin kesme kapasitesine eğilmeden önce ulaşabilmesi için boyuna donatının bir sınır değeri ( $\rho_b$ ) vardır. Bu oran Türk Deprem Yönetmeliği (TDY-2007) ve TS 500-2000’de 0,02 oranı belirtilmektedir.

Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'e esas deneylerde boyuna donatı oranlarının, yönetmelikte kullanılan  $\rho_b$  oranının üstünde olması kiriş davranışına boyuna donatının etkisinin araştırılması içindir. Şekillerde de gözüktüğü gibi boyuna donatılar kiriş kapasitesini direkt olarak etkilememektedir.

Çalışmamızda da boyuna donatı oranını yüksek tutmamızın nedeni eğilme etkisinden ziyade kesme etkisiyle göçmeyi amaçladığımızdandır. Bu göçme sayesinde, göçmeye karşı koyan enine donatılarımızın kiriş kapasitesine etkisini görülecektir.



Şekil 2.12 Sargısız betonarme elemanlarda boyuna donatı oranının kesme kuvvetine etkisi (Sertkaya, 2017)



Şekil 2.13 Sargılı betonarme elemanlarda boyuna donatı oranının kesme kuvvetine etkisi (Sertkaya, 2017)



## 2.2.3 Sargısız betonun davranışı

### 2.2.3.1 Sargısız beton için Mander modeli

Mander vd. (1988) tarafından sargılı beton için geliştirilen teorik gerilme şekil değiştirme modelinde, sargı etkisinin ihmal edilmesi durumunda mevcut model sargısız beton için de geçerli olmaktadır. Sargılı beton için Mander modeli Bölüm 2.2.4.1'de incelenmiştir. Sargısız beton için, sargılı beton modelindeki betonda etkin sargılama basıncı  $f_e = 0$  alınır. Ve eşitlik 2.15'ten  $\lambda_c=1$  olur.  $\lambda_c=1$  olduğunda eşitlik 2.16 ve eşitlik 2.18'den  $f_{cc} = f_{co}$  ve  $\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co}$  değerleri elde edilir. Eğriye ait eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad \varepsilon_c \leq 2\varepsilon_{co} \quad (2.6)$$

$$\sigma_c = f_{co} \left( \frac{2r}{r-1+2r} \right) \left( 1 - \frac{\varepsilon_c - 2\varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - 2\varepsilon_{co}} \right) \quad 2\varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c'u} \quad (2.7)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \quad (2.8)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.9)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{E_{cc}} \quad (2.10)$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \quad (MPa) \quad (2.11)$$

Burada;

$\varepsilon_{cc}$  ; sargılı betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değerini,

$\varepsilon_{cu}$  ; sargısız betonda kabuk betonun dökülmesi sonrasında nihai birim şekil değiştirmesini,

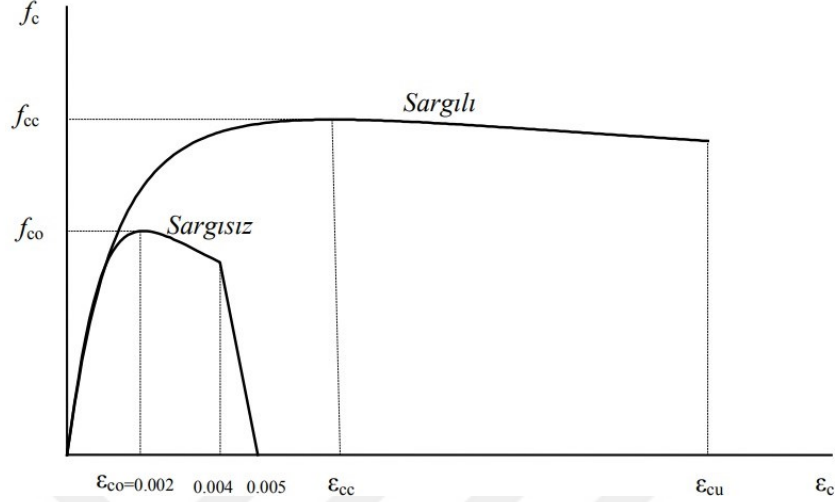
$f_{cc}$  ; sargılı betonun basınç dayanımını,

$f_{co}$  ; sargısız betonun basınç dayanımını,

$E_{sec}$  ; beton kesitin sekant modülünü,

ifade etmektedir.

Mander beton modelinin hem sargısız beton hem de sargılı beton için kullanımı Şekil 2.14'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

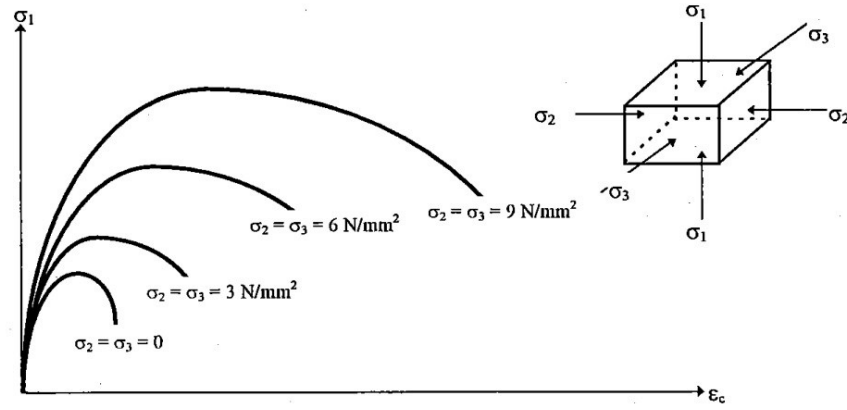


Şekil 2.14 Sargılı ve sargısız beton için Mander modeli (DBYBHY, 2007)

Şekil 2.14'te verilen, DBYBHY tarafından değiştirilmiş Mander gerilme-şekil değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Doğrusal elastik olmayan yöntemler ile performans değerlendirmesinde başka bir model seçilmediği takdirde DBYBHY, *değiştirilmiş* Mander gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının kullanılmasını önermektedir.

#### 2.2.4 Sargılı beton davranışı

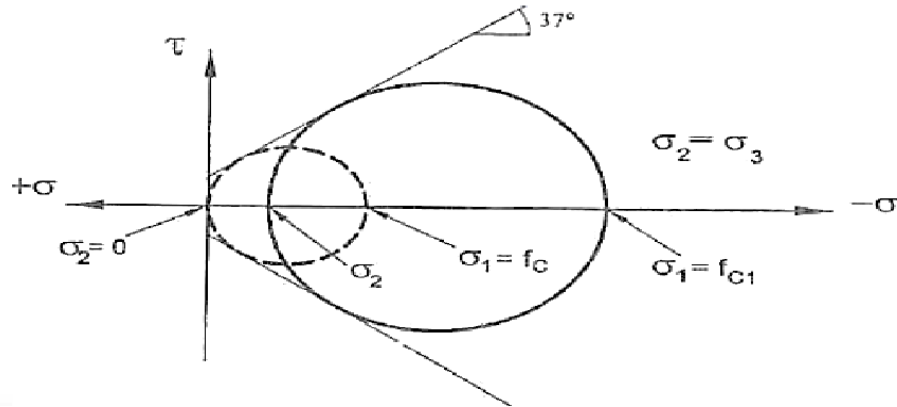
Betonarme elemanlarda beton genellikle üç yönden gerilmeye maruz kalır. Richart Brandzaeg ve Brown tarafından 1928'de bu gerilmelerle ilgili çalışma yapılmıştır. Şekil 2.15'te görüldüğü üzere  $\sigma_2$  ve  $\sigma_3$  arttığında, betonarme elemanın dayanımı ve sünekliği de artar (Ersoy ve Özcebe, 2001).



Şekil 2.15 Betonun üç eksenli gerilme altındaki davranışı (Ersoy ve Özcebe, 2017)

Eğilme çatlakları, betonun elastik olmayan davranışında harç ve agregalar arasında başlar. Eğilme çatlakları,  $\sigma_c - \varepsilon_c$  eğrisinde azalma meydana getirir. Betonarme elemanlarda sargı donatısı ile malzemenin sarılması, içsel çatlakların aniden ortaya çıkmasına ve bu elemanın hacminin artmasına neden olmaktadır. Bu da sargı donatısının  $\sigma_c - \varepsilon_c$  eğrisinin başlangıcında belirgin bir farka neden olmadığını gösterir. Sargı donatısı oranı ve kullanım aralığı, taşıma gücüne katkıda bulunmaktadır.

Cowan ve Zia (1998) tarafından önerilen, üç yönlü gerilme maruz kalan betonun dayanımı ile ilgili zarf eğrisi Şekil 2.16'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.16 Cowan-Zia kırılma kriteri (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Beton basınç dayanımı bu kritere göre Eş. 2.12'deki gibi yazılır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

$$f_{cc} = f_{c1} = f_c + 4\sigma_2 \quad (2.12)$$

Burada;

$f_{cc}$  aksenal basınç dayanımını;

$\sigma_2$  yanal basınç gerilmesini;

ifade etmektedir.

#### 2.2.4.1 Sargılı beton için Mander modeli

Mander vd. (1988) tarafından önerilen, sargısız ve sargılı beton için kullanılabilen beton modeli daha önce Şekil 2.14'te gösterilmişti. Sargısız beton modeli ile bulunan basınç dayanımının etkin sargı basıncının bir fonksiyonu olan  $\lambda_c$  katsayısıyla çarpılmasıyla sargılı beton modeli elde edilir. Sargılı beton için kullanılan formüller aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (2.13)$$

$$\sigma_c = 0 \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \quad (2.14)$$

$$\lambda_c = \left[ 2.254 + \sqrt{\frac{7.94 f_e}{f_{co}} - \frac{2 f_e}{f_{co}} - 1.254} \right] \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \quad (2.15)$$

$$f_{cc} = f_{co} \lambda_c \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{cu} \quad (2.16)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad (2.18)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.19)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{E_{cc}} \quad (2.20)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_c} \quad (MPa) \quad (2.21)$$

$$f_e = \frac{f_{ex} + f_{ey}}{2} \quad (2.22)$$

$$f_{ex} = k_e \frac{A_{shx}}{s b} f_{yw} \quad (MPa) \quad (2.23)$$

$$f_{ey} = k_e \frac{A_{shy}}{s b} f_{yw} \quad (MPa) \quad (2.24)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{w_i^2}{6bh}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b}\right) \left(1 - \frac{s'}{2h}\right)}{1 - \rho_{cc}} \quad (2.25)$$

Burada;

$\epsilon_{su}$  , enine donatı nihai çekme birim şekil değiştirme değerini;

$\lambda_c$  , sargılı beton dayanımının sargısız beton dayanımına oranını;

$A_{shx}$  , x doğrultusunda uzanan toplam enine donatı kesit alanını;

$A_{shy}$  , y doğrultusunda uzanan toplam enine donatı kesit alanını;

b, enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonun x'e paralel boyutu;

$f_e$  , ortalama etkili sargı basıncı;

$f_{ex}$  , x doğrultusundaki etkili sargı basıncı;

$f_{ey}$  , y doğrultusundaki etkili sargı basıncı;

h, enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonun y'ye paralel boyutu;

$k_e$  , sargılamanın etkinliği ile ilgili katsayısını;

$\rho_{cc}$  , toplam boyuna donatının beton çekirdek alanına oranını;

n, boyuna donatı sayısını;

$s'$  , enine donatı net aralığı;

$w_i$  , kesit çerçevesindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı

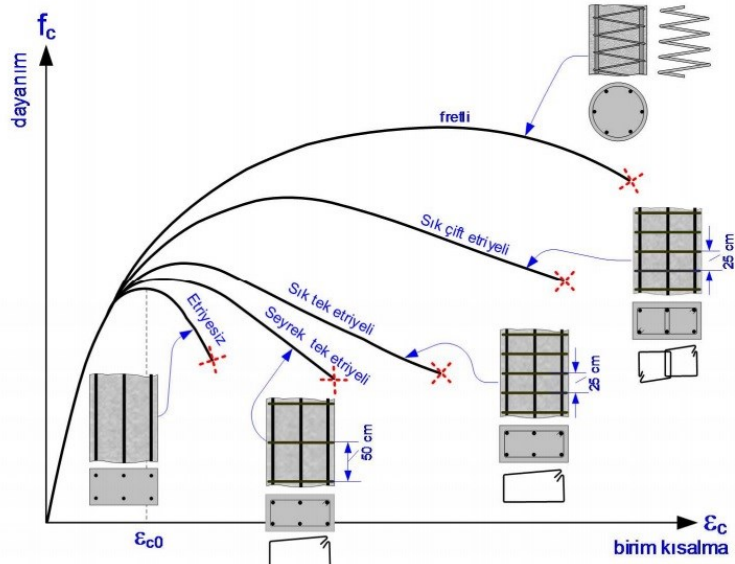
ifade etmektedir.

DBYBHY'de kullanılan sargılı beton modeli ile Mander modeli ile arasındaki tek fark, sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesini DBYBHY, aşağıdaki gibi vermektedir.

$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4 \rho_s f_{yw} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.26)$$

#### 2.2.4.2 Sargı donatısının etkileri

- Sünekliği artırır.
- Betonun dayanımını artırır.
- Sargı etkisi arttıkça, donatılı betonlarda  $\varepsilon_{c0}$  değeri büyümektedir.
- Rötne nedeniyle oluşacak çatlakları önler.
- Birden çok etriye hem sünekliği hem de dayanımı çok artırır. Bunun nedeni etriye kolu serbest açıklığının ve bombelenmenin azalması sonucu yanal basıncın artmasıdır.
- Fretli elemanlar etriyeli elemanlara göre hem süneklik hem de dayanım açısından daha etkindir.
- $\sigma_c - \varepsilon_c$  ilişkisinde eğimin daha fazla azalmasını önler.
- Eğilme tasarımında maksimum kullanılabilir şekil değiştirme  $\varepsilon_{cu}$  değerini % 40 kadar daha artırır.



**Şekil 2.17** Farklı miktarlardaki etriyeler ile sarılmış beton için gerilme-şekil değiştirme grafikleri (Topçu, 2008)

### 2.2.4.3 Sargı donatısında etkili olan parametreler

Sargı donatısında etkili olan temel parametreler başlıca şunlardır (Özkul, 2009);

Enine Donatı Şekli; Etriye çeşitliliği ile betondaki sarılmamış bölgesi azaltılarak, dayanım ve süneklik artırılır.

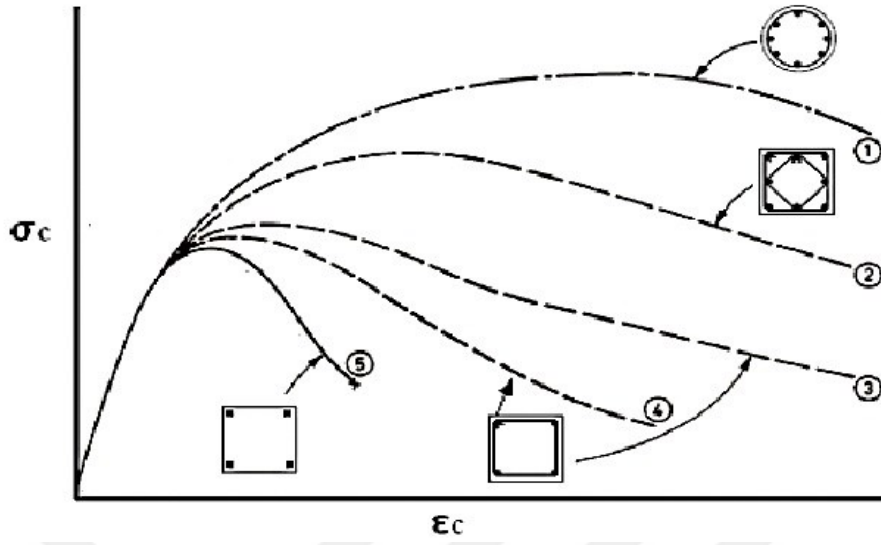
Enine Donatı Aralıkları ( $s$ ); Bu aralığın azalması, ( $\rho_w$ ) oranının artması anlamına gelmektedir. Bu da betonarme elemanın sünekliğini arttıracaktır. Ve boyuna donatıların, örtü betonu atılmadan önce erkenden burkulmasını önleyecektir.

Etriye Oranı ( $\rho_w$ ); betonarme elemandaki etriyelerinin hacminin, sarılmış kesitin çekirdeğinin hacmine oranıdır.  $\rho_w$ 'nun artmasıyla betonarme elemanın dayanımı ve sünekliği artar.

Enine Donatının Tasarım Akma Dayanımı ( $f_{ywd}$ ); Donatının dayanımı ne kadar büyükse sarılmış bölgenin basıncı da o kadar büyür. Sarılma hesabında enine donatıdaki gerilme artışı ( $f_{yw}$ ) dikkate alınmaz.

Betonun Karakteristik Basınç Dayanımı ( $f_{ck}$ ); Yüksek basınç dayanımlı beton, düşük basınç dayanımlı betona göre daha az sünektir. Düşük basınç dayanımlı betonda yatay genişleme (Poisson etkisi), aynı aksenal yükleme miktarı için daha fazladır.

Enine Donatı Düzeni; Şekil 2.18'deki deneysel bir çalışmada sargılama düzenine göre gerilme birim şekil değiştirme eğrileri karşılaştırılmıştır. 1 numaralı eğride dairesel etriye kullanılmış, en yüksek düzeyde dayanım ve süneklik elde edilmiştir. 2 numaralı eğride çift, dörtgen ve çapraz, etriye kullanılmış, fakat yine de dairesel etriye düzenine göre düşük dayanım ve süneklik elde edilmiştir. 3 ve 4 numaralı eğrinin ikisinde de dörtgen etriye kullanılmış. Eğrinin farklı olması sebebi 4 numaralı etriye düzeninde, etriye aralığının daha çok olmasıdır. 5 numaralı eğride de yönetmeliklerde müsaade edilmemesine rağmen araştırma amaçlı olarak etriye kullanılmamıştır.



Şekil 2.18 Enine donatı düzeninin sargı etkisindeki önemi (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Boyuna Donatı Düzeni; Sargılama üzerinde etkisi çok büyük değildir yine de düzeninin simetrik olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Beton çekirdeğini sarmaya katkı sağlaması ve daha etkili etkili donatı düzeni oluşturulması açısından büyük çaplı az adetli boyuna donatı yerine küçük çaplı fazla adetli boyuna donatı kullanılması tercih edilmelidir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde analizde kullanılan yazılımdan, numunelerin tasarım aşamalarından, deney tipi seçiminde dikkat edilen hususlardan ve analizde kullanılan iterasyon yönteminden kısaca bahsedilecektir.

#### 3.1 Kullanılan Yazılım

ANSYS sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir yazılımdır. Mukavemet, mekanik, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimini modelleyerek numunelerin tasarımını geliştirmeye yardımcı olur. Tasarlanan numunelerin prototipleri üretilmeden önce, sanal ortamda test imkânı sağlar.

Tez çalışması kapsamında, sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması için ANSYS yazılımının 14.5 sürümü kullanılmıştır. ANSYS yazılımında sonlu elemanlar çözümlemesi için 3 ana adımda ilerlenmiştir. Öncelikle “*Preprocessor*” menüsünden, numunenin geometrik modelinin tanımlanması, numunelere malzeme modellerinin atanması, sonlu elemanlara bölme işleminin yapılması, yükleme ve mesnet şartlarının tanımlanması, sonrasında “*Solution*” menüsü ile çözüm şekli belirlenerek çözümlemesi, son olarak da “*General ve Time-History Postprocessor*” menüsünden sonuçları ve analiz sonu resimleri alınmıştır.

#### 3.2 Numunelerin Tasarımı

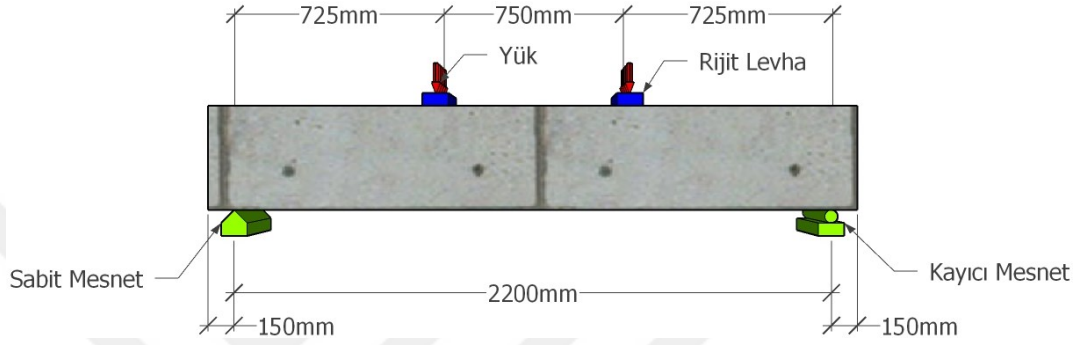
##### 3.2.1 Deney tipi seçimi

Betonun eğilme dayanımı için iki deney yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar;

- Üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş,
- Orta noktasından yüklenmiş basit kiriş yöntemidir.

Özkul (2009)’a göre “Bunlardan birincisi daha gerçekçi sonuç verir.” Çalışmamızda biz de dört noktalı eğme deneyini kullandık. Çünkü, üç noktalı eğmede yükleme noktasında maksimum moment oluşmasına ve o noktada kesme kuvveti değer değiştirmesine

rağmen dört noktalı eğmede maksimum moment belirli bir aralıkta değer alır ve bu aralıkta kesme kuvveti sıfırdır. Bir başka deyişle, üç noktalı eğilme deneyinde saf bir eğilme durumundan söz edilemez ancak dört noktalı eğilme deneyinde salt eğilme hali söz konusudur. Dolayısıyla bizim çalışmamız için bu yöntem daha sağlıklı sonuçlar vermektedir. Sayısal olarak aynı numunelerin eğilme dayanımları, bu yöntemde üç noktalı eğmeye göre daha düşük çıkar.



Şekil 3.1 Deney düzeneği

Üçte bir noktalarından yüklenmiş Şekil 3.1'deki basit kiriş yönteminde, kırılma orta üçte birlik kısım içinde meydana gelmişse çekme dayanımı Eş. 3.1 ile;

$$\delta_E = \frac{P * L}{b_i * h_i^2} \quad (3.1)$$

kırılma orta üçte birlik kısmının dışında meydana gelmişse Eş. 3.2 ile;

$$\delta_E = \frac{3PL * a_i}{b_i * h_i^2} \quad (3.2)$$

hesaplanır. Burada;

$\delta_E$  : Eğilmede çekme dayanımı (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P$  : Deney presinde kırılma anındaki en büyük yük (kgf)

$L$  : Yükleme tablası mesnetleri arasındaki açıklık (cm)

$h_i^2$  : Kırılma kesitinin ortalama yüksekliği (cm)

$b_i$  : Kırılma kesitinin ortalama genişliği (cm)

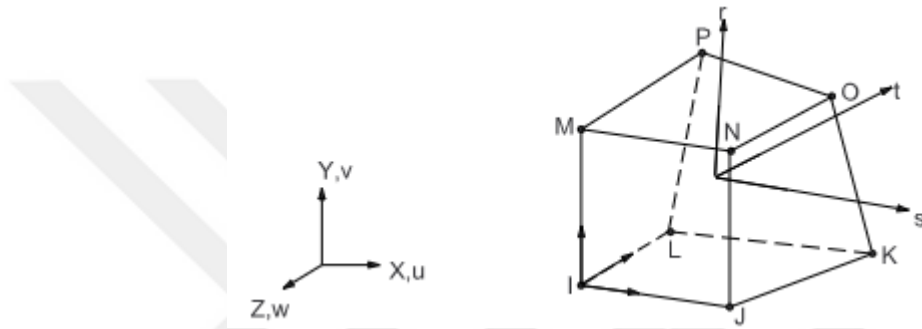
$a_i$  : Kırılma çizgisi ile yakındaki mesnet arasındaki ortalama mesafe (cm)

olarak ifade edilmektedir.

### 3.2.2 Eleman modeli seçimi

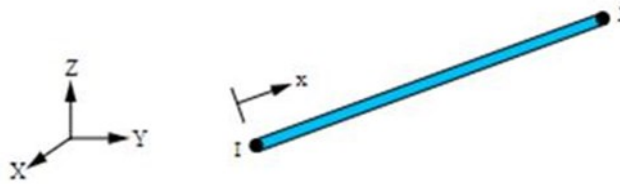
Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken uygun elemanları seçmek, betonarme kirişin bileşenlerini modellemek açısından çok önemlidir. Modellemede beton için *Solid65* elemanı kullanılmıştır.

*Solid65* elemanı x,y ve z doğrultularında üç ötelenme serbestliği ve 8 düğüm noktasına sahiptir (Şekil 3.2). Bunlara ek olarak eleman; üç yönde çekme, plastik şekil değiştirme ve ezilme kapasitelerine sahiptir.



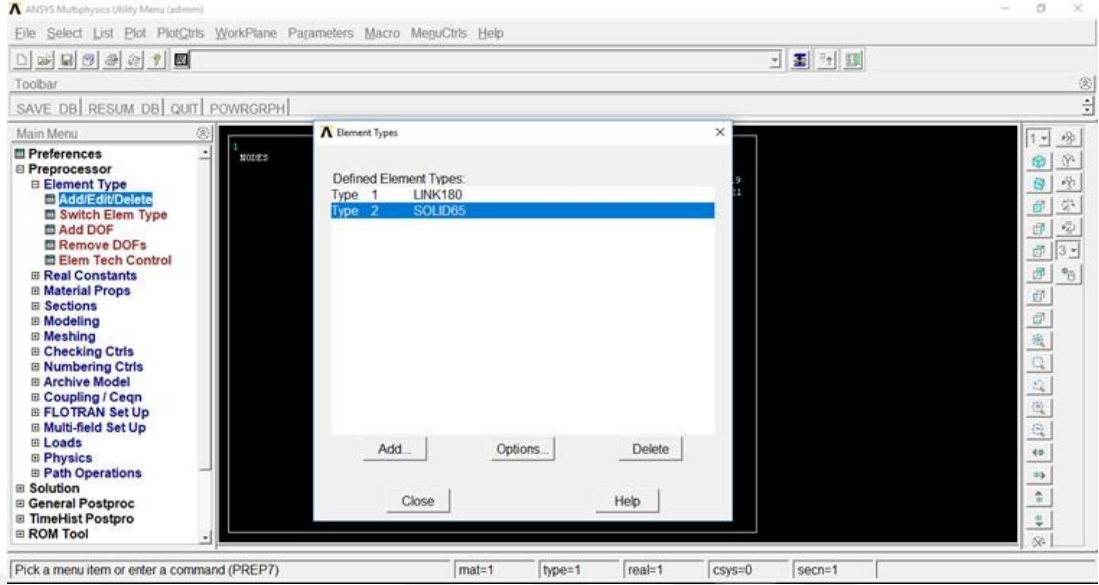
Şekil 3.2 Ansys Solid 65 elemanı geometrisi (ANSYS 5.6 user's manual, 1999)

Numunemizin donatı modellemesi için ise *Link180* elemanı kullanılmıştır. *Link180* elemanı, tek eksenli çekme ve gerilme işlemleri için kullanılmaktadır. Eleman, x,y ve z doğrultularında üç ötelenme serbestlik derecesi, iki düğüm noktası vardır (Şekil 3.3). Bunlara ek olarak, plastik şekil değiştirme kapasitesine de sahiptir.



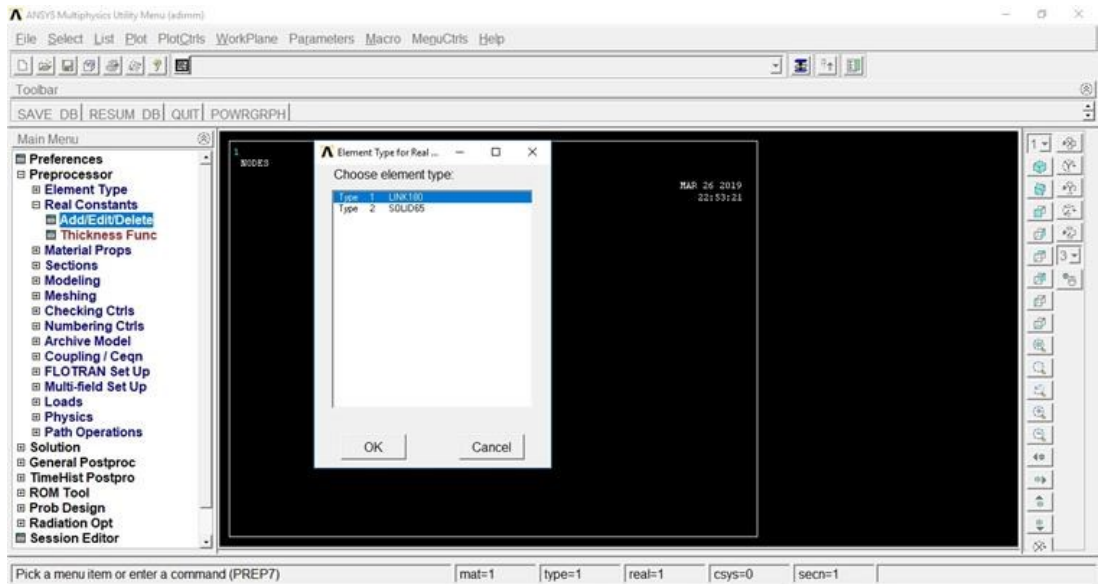
Şekil 3.3 Ansys Link 180 elemanı geometrisi (ANSYS 5.6 user's manual, 1999)

Modeli oluşturacak beton ve donatı, elemanları Şekil 3.3'te görüldüğü gibi ekranın solundaki açılır menüden *Preprocessor - Element Type - Add Edit Delete* seçenekleri tıklanarak (Şekil 3.4) tanımlanır.



Şekil 3.4 Beton ve donatı elemanları tanımlama

Eleman tiplerinin kendilerine özgü sabitleri tanımlıdır. Eleman sabitleri, eleman tiplerini baz alan özelliklerdir. Tanımladığımız eleman tiplerine bu menü sayesinde atalet momenti, en kesit alanı, kesit yüksekliği vb. kesit değişkenleri *Preprocessor - Real Constants - Add Edit Delete* (Şekil 3.5) seçenekleri tıklanarak ardından da beton için *Solid65* (Şekil 3.6), donatı değerleri için *Link180* (Şekil 3.7) seçilerek istenen değişkenler tanımlanır.



Şekil 3.5 Eleman sabitlerinin seçilmesi

Element Type Reference No. 2		
Real Constant Set No.		5
Real constants for rebar 1		
Material number	MAT1	0
Volume ratio	VR1	0
Orientation angle	THETA1	0
Orientation angle	PHI1	0
Real constants for rebar 2		
Material number	MAT2	0
Volume ratio	VR2	0
Orientation angle	THETA2	0
Orientation angle	PHI2	0
Real constants for rebar 3		
Material number	MAT3	0
Volume ratio	VR3	0
Orientation angle	THETA3	0
Orientation angle	PHI3	0
Crushed stiffness factor	CSTIF	0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>		

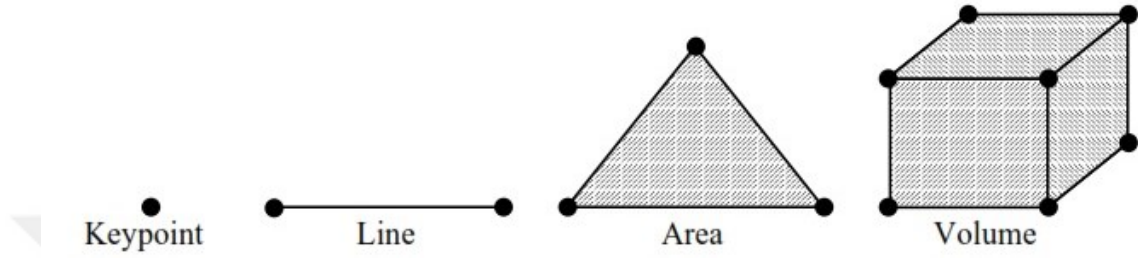
Şekil 3.6 Beton özellikleri giriş sayfası

Real Constant Set Number 1, for LINK180		×
Element Type Reference No. 1		
Real Constant Set No.		1
Cross-sectional area	AREA	201
Added Mass (Mass/Length)	ADDMAS	
Tension and compression	TENSKEY	Both
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>		

Şekil 3.7 Donatı özellikleri giriş sayfası

### 3.2.3 Modelleme araçları

Modellerin oluşturulabilmesi için iki ana eleman bulunmaktadır (Şekil 3.8). Bunlar; düğüm noktaları ve çizgilerdir. Düğüm noktaları (*keypoints*) belirlenen model, çizgilerle (*lines*) birleştirilerek prizma oluşturulur. Çizgilerin arası alan olarak tanımlanabildiği gibi istenirse de tüm noktalar seçilerek hacim komutu ile 3 boyutlu hale getirilebilir.



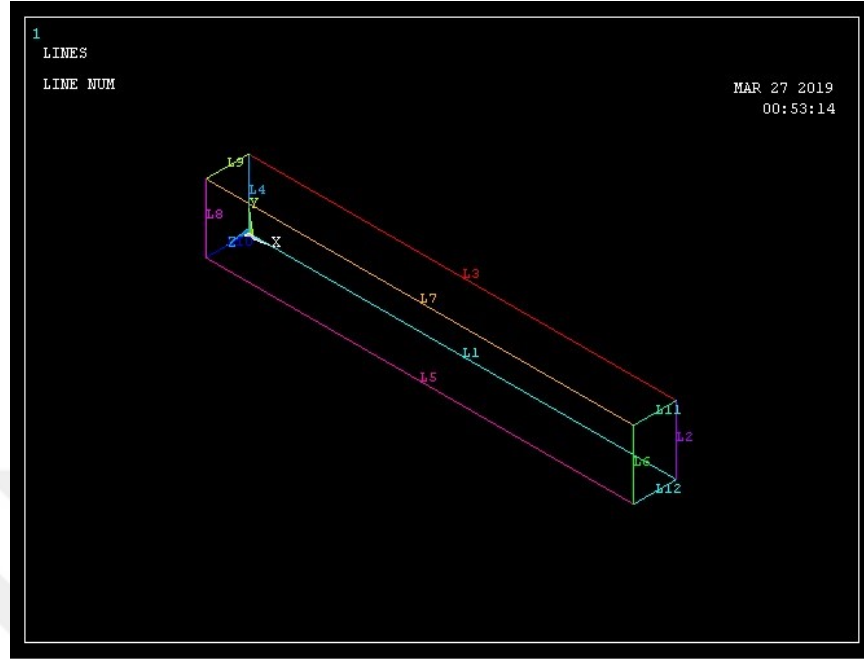
Şekil 3.8 Modelleme nesneleri

*Keypoints* komutları sayesinde betonun 8 köşesindeki noktalar tanımlanır (Şekil 3.9).



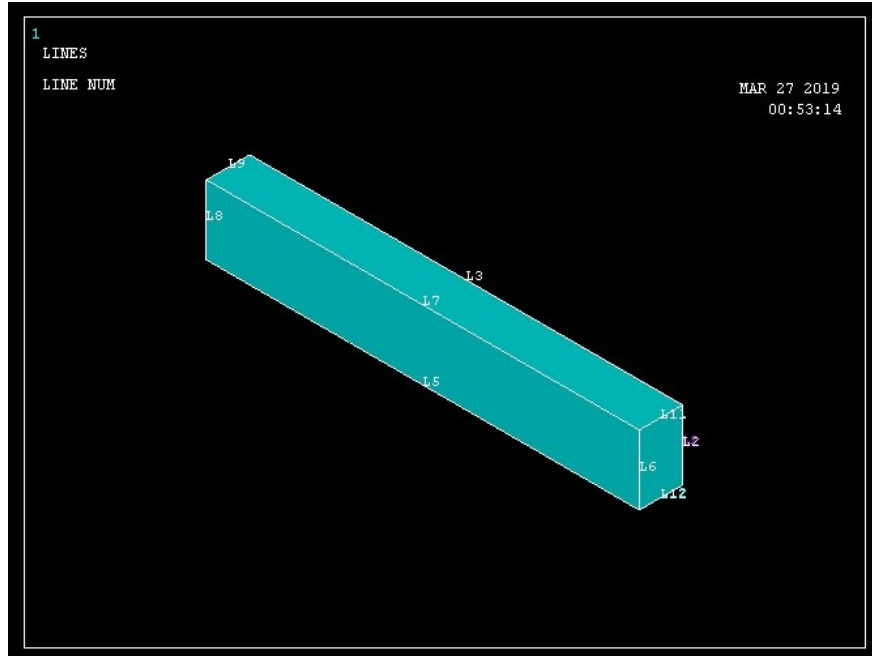
Şekil 3.9 Keypoint tanımlanması

Ardından noktaların arası *line* komutu ile birleştirilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Line tanımlanması

*Volume* komutu ile prizmaya hacim kazandırılır (Şekil 3.11).



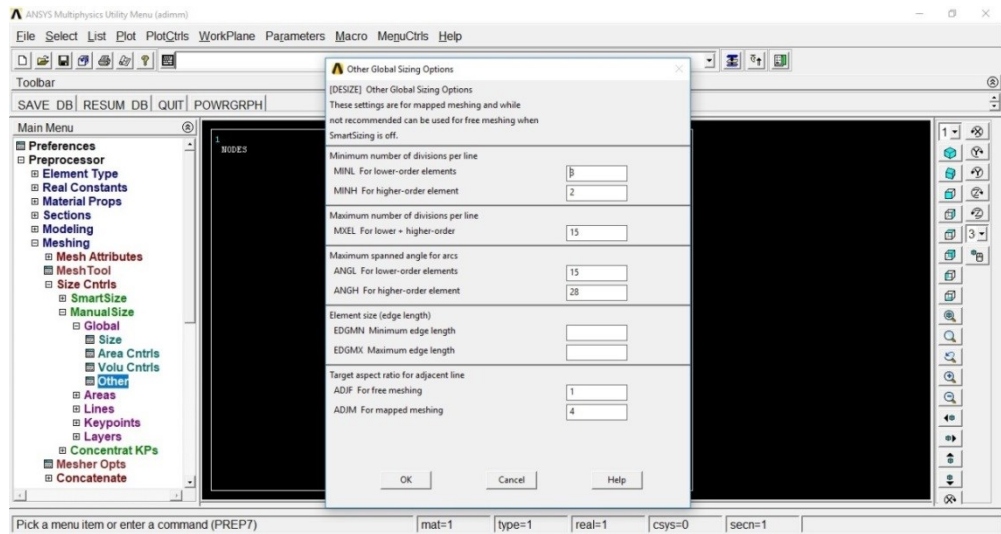
Şekil 3.11 Volume tanımlanması

Yine *line* komutu ile boyuna donatılar ve enine helezonik donatılar tanımlanır ve model tamamlanmış olur. Yüklemenin giriş üzerinde dengeli dağılabilmesi için rijit levhalar tanımlanmıştır. Mesnetlerden biri sabit iken diğeri kayıcı olarak tanımlanmıştır.

Enine donatının yerleştirilme açısı ve kenetlenme özellikleri, davranışta gözle görülür farklar yaratırken özellikle kesme etkisinin hâkim olduğu betonarme elemanlarda ilave hassasiyet gerektirmektedir (Özkal, 2017). Bu nedenle bu çalışma kapsamında 2500 mm. uzunlukta ve 250 mm. x 400 mm. kesite sahip 5 adet betonarme giriş, muhtelif açılarda yerleşim özelliklerine sahip etriyelerle donatılarak dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Mesnetlerden 725 mm. içeride belirlenen simetrik noktalara tek yönlü çizgisel yükler uygulanmıştır.

Donatı ve beton arasındaki aderans, Kazaz (2012, s. 160)' ın belirttiği üzere “ANSYS eleman kütüphanesinde bulunan *COMBIN39* yay elemanı iki düğüm noktasıyla ve lineer olmayan genel bir yük-deplasman eğrisiyle tanımlanabilir.” Ancak çalışmamızda işlem hacmi ve süresi yönünden daha avantajlı olması bakımından *tam aderans* kabulü ile sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlara bölme işlemi program tarafından otomatik olarak ya da manuel olarak yapılabilmektedir. Manuel olarak yapmak için soldaki açılır menüden (Şekil 3.12) *Preprocessor – Meshing - Size Controls* tıklanarak model istenilen hassasiyette sonlu elemanlara bölünebilir.



Şekil 3.12 Ansys mesh menüsü



Genel kabulde, model ne kadar çok sonlu elemana bölünürse o kadar hassas sonuç elde edilir. Ancak gereğinden fazla elemana bölünmesi halinde analizin işlem hacminde ve zamanında artış meydana gelir. Bu da gereksiz işlem ve zaman kaybına sebebiyet verir.

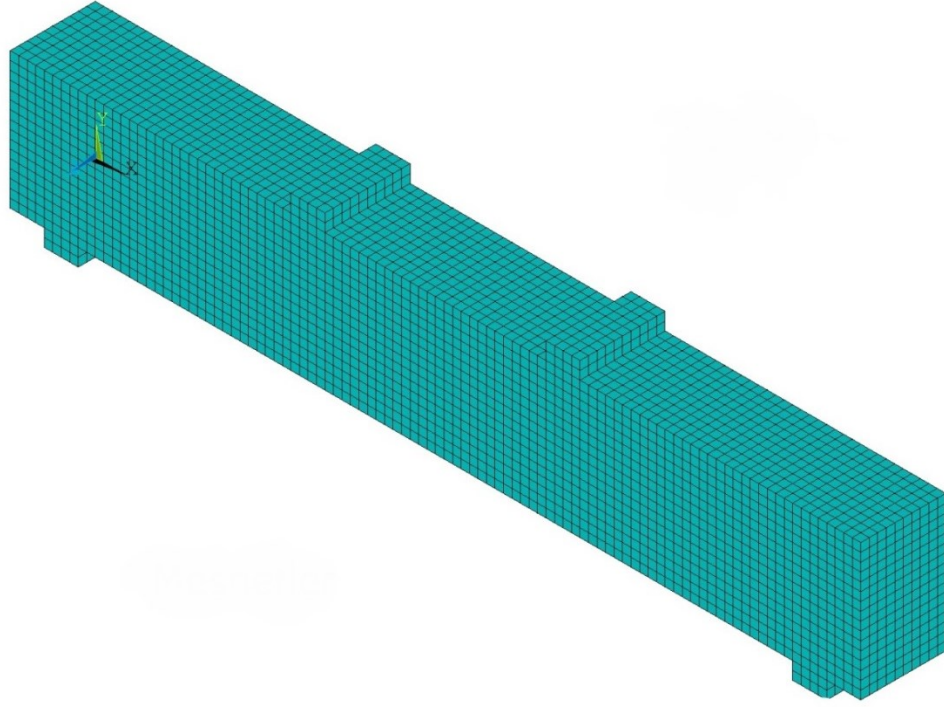
Sonlu eleman sayısına karar vermeden önce uygun olacağı düşünülen eleman sayısında analizi yapıp sonucu kaydedilir. Ardından eleman sayısı artırılarak tekrar analiz yapıp sonucu bir önceki ile karşılaştırılır. Analizlere devam edildiğinde bir müddet sonra eleman sayısı artsa da sonuçta kayda değer değişiklik görülmediği ve sadece analizin bitme süresinin uzadığı görülür. Eleman sayısının yeterli olduğu buradan anlaşılabilir. Eleman boyutuna karar verilmesinde dikkat edilmesi gereken diğer husus, düğüm noktaları ile enine donatıların boyuna donatılara bağlanma noktalarının kesişmesidir. Eğer kesişme sağlanamazsa noktadaki veri doğru şekilde alınamaz.

Şekil 3.13'te görünen deliğin meshlenmesi doğrusal elemanlar ile yapılırsa soldaki, eğrisel elemanlar ile yapılırsa sağdaki sonuç ortaya çıkar. Dolayısı ile eğri yapı veya kısımların modellenmesinde eğrisel mesh tipi kullanımın daha gerçekçi sonuçlar vereceği aşıkardır. Ancak modelimizde (dikdörtgen prizma) böyle bir ihtiyacın olmamasından ve hesap kolaylığı bakımından dolayı kübik mesh tipi tercih edilmiştir.



**Şekil 3.13** Mesh tipi seçiminin önemi (Taşdemir, 2016)

Çalışmamızda bu üç husus değerlendirilip, numunenin 25 milimetrelik küp sonlu elemanlara bölünmesine karar verilmiştir. 2500 mm. boyunda, 250 mm. eninde ve 400 mm. yükseklikte boyuta sahip olan kiriş toplam 16000 adet 25x25x25 milimetrelik altı yüzlü prizmatik küpler şeklinde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Şekil 3.14'te yük aktarımının sağlıklı yapılabilmesi için yükleme ve mesnet noktalarında yüksek rijitliğe sahip levhalar da sonlu elemanlarına kirişle aynı boyutta bölünerek, düğüm noktalarının birbirine denk gelmesi sağlanmıştır.



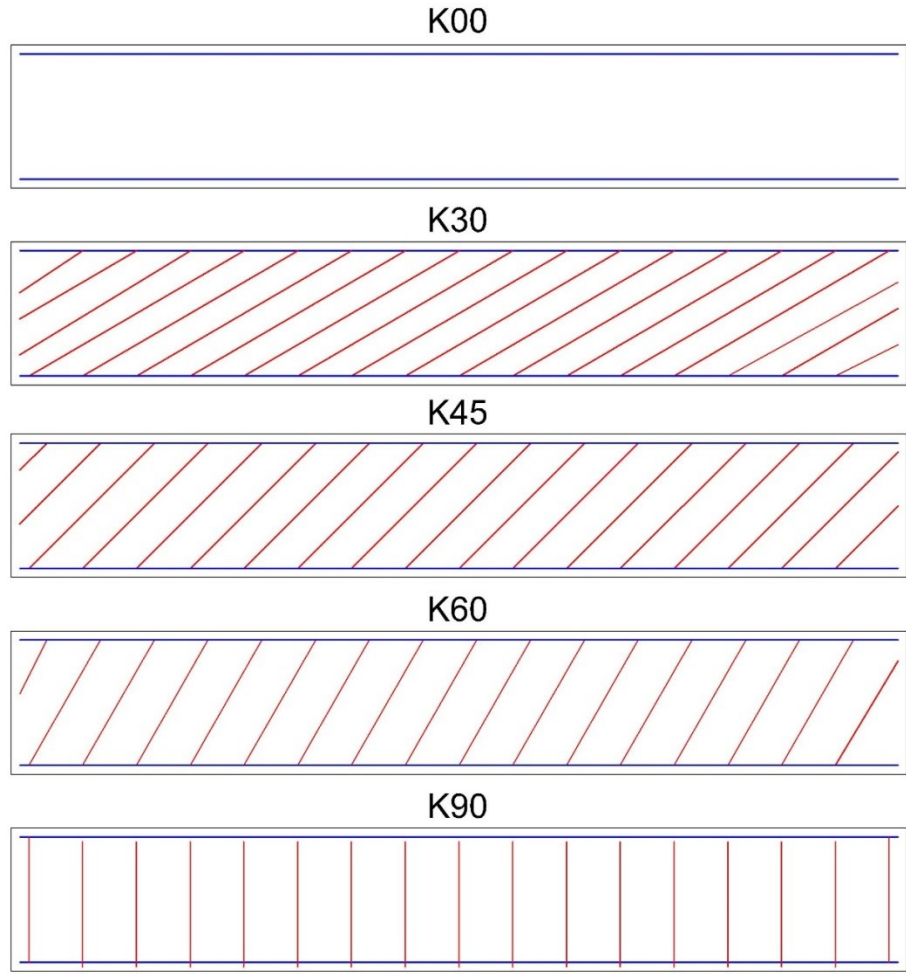
**Şekil 3.14** Analiz numunelerinin sonlu elamanlara bölünmüş hali

Analiz numunelerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

**Tablo 3.1** Analiz numunelerinin malzeme özellikleri

Beton				Çelik		
$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctk}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$\epsilon_{cu}$	$f_{yk}$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$\epsilon_{su}$
30	1,8	$30 \times 10^3$	0,003	500	$200 \times 10^3$	0,1

Muhtelif açılardaki enine donatı yerleşimi de Şekil 3.15’te görüldüğü gibidir. Şekildeki mavi çizgiler boyuna donatıları, kırmızı çizgiler enine donatıları belirtmektedir.



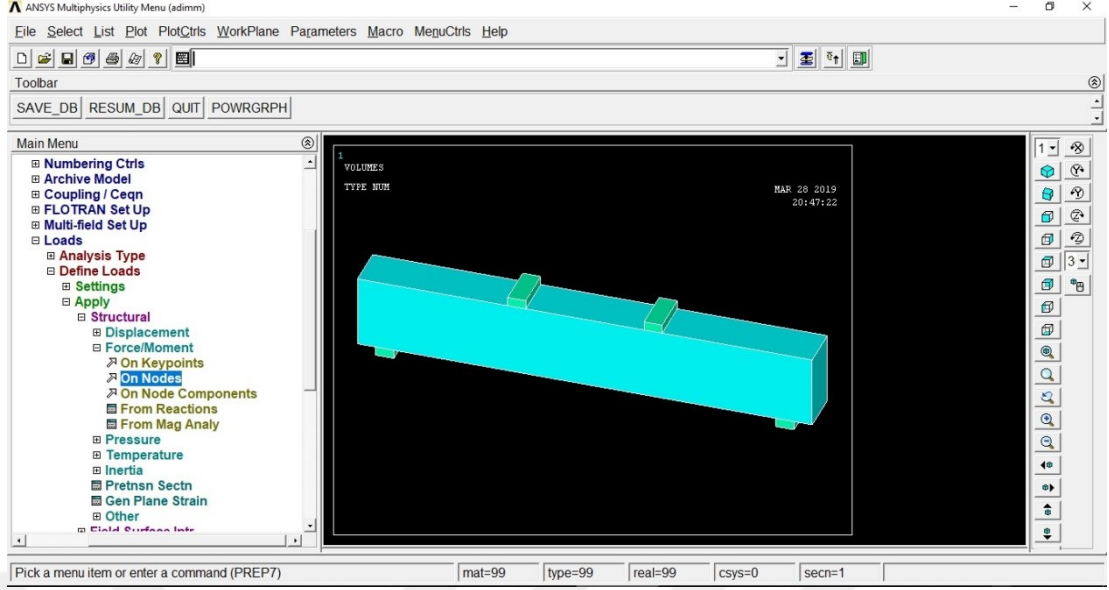
**Şekil 3.15** Muhtelif açılardaki enine donatı yerleşimi

Analiz numunelerinin değişik açılardaki enine donatı yerleşiminin uygulama biçimleri Tablo 3.2’de görüldüğü gibidir.

**Tablo 3.2** Analiz numunelerinde enine donatı uygulama biçimleri

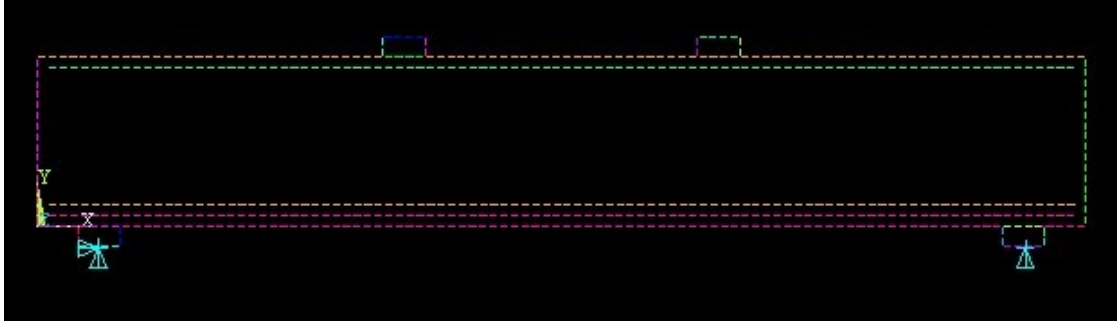
Numune Adı	Enine Donatıların Yatayla Açısı	Enine Donatıların Uygulama Şekli
K00	Yok	Yok
K30	30°	Helezonik
K45	45°	Helezonik
K60	60°	Helezonik
K90	90°	Kapalı Dörtgen





Şekil 3.17 Yük atama menüsü

Yine aynı menüden mesnetler tanımlanabilir. Çalışmamızda sol mesnetimiz sabit, sağ mesnetimiz hareketli mesnet olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Mesnet görünümleri

### 3.2.5 Malzeme özelliklerinin seçimi

Analiz edilecek yapı, cisim veya parçanın ihtiva ettiği her malzeme türü için bir malzeme modeli oluşturulur. Her farklı malzeme için malzeme modeline bir numara verilir. ANSYS'te her bir eleman tipi için çeşitli malzeme modeli mevcuttur. Lineer- elastik bir malzeme için izotropik, ortotropik veya anizotropik; nonlinear bir malzeme için ise, elastik, inelastik veya viskoelastik davranış seçenekleri mevcuttur. Plastik davranışın tanımlanması için;

- BISO (Bilinear Isotropic Hardening)
- BKIN (Bilinear Kinematic Hardening)

(Bilinear modellerde gerilme ile birim deformasyon arasındaki ilişki iki doğru ile ifade edilir.)

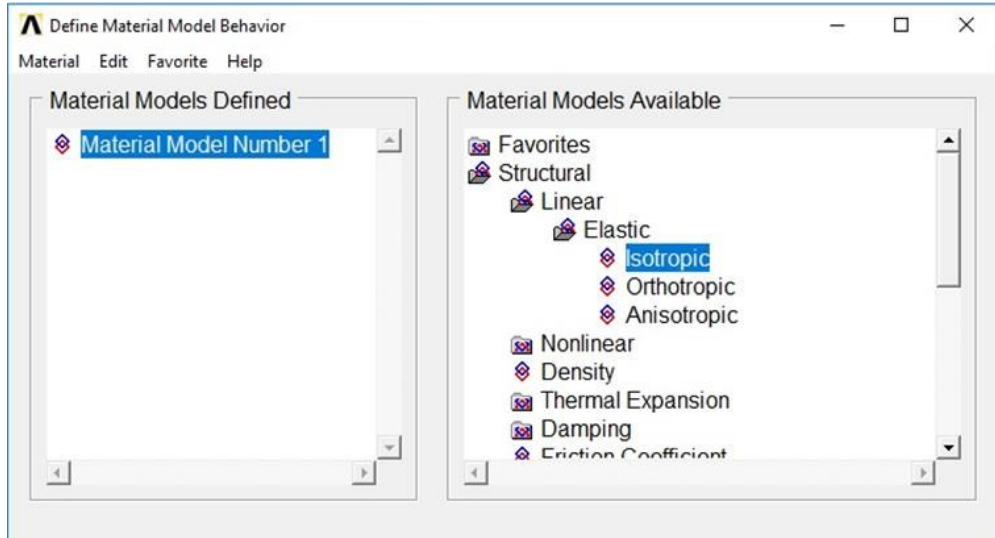
- MISO (Multilinear Isotropic Hardening)
- MKIN (Multilinear Kinematic Hardening)

(Multilinear modellerde ise ikiden fazla doğru ile idealize edilmektedir.)

seçenekleri kullanılabilir.

### 3.2.5.1 Beton malzeme modeli

Modelde kullanılacak malzemelerin davranışlarının belirlemek için *Preprocessor - Material Props - Material Model* (Şekil 3.19) seçilerek her malzeme için özellikler tanımlanır.



Şekil 3.19 Betonu lineer izotropik olarak modelleme menüsü

Beton, zaman ve yükleme hızına göre farklı davranış gösteren, anizotrop ve elastik olmayan heterojen bir malzemedir. Fakat modelleme tekniklerinde beton izotropik malzeme olarak ele alınıp çatlama vb. durumlarda gösterdiği davranışı ile de gerçek

davranışa yaklaşıldığı görülmektedir. Çalışmamızda beton, Willam – Warnke göçme kriterine göre modellenmiştir. Betonun sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmesi, homojen bir malzeme olmaması ve ayrı doğrultularda farklı fiziksel özelliklere sahip olması sebebiyle çok zordur. Sonlu elemanlar modelinin doğruya en yakın sonuçları verebilmesi için başta elastisite modülü ve Poisson oranı olmak üzere gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi, tek eksenli basınç ve çekme mukavemeti parametreleri dikkatlice tanımlanmalıdır.

Poisson oranı; boyuna doğrultuda yük etkisinde kalan bir elemanda enine şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmesine denir. TS 500’de beton için Poisson oranı 0,2 olarak öngörülmektedir. Bu oran tüm betonlar sınıfları için 0,2 alınsa da aslınsada gerilme yüzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Çalışmamızda Poisson oranını yönetmeliğe uygun olarak 0,2 alınmıştır (Şekil 3.20).

Elastisite modülü; malzemeye uygulanan gerilmenin, uygulanan gerilmeden dolayı meydana gelen birim şekil değişimine oranıyla (Eş. 3.3) elde edilir. Bir malzemenin elastisite modülü ne kadar yüksek ise plastik yani kalıcı şekil değişimine uğramadan dayanabileceği kuvvet o kadar yüksek veya elastik uzama oranı o kadar düşüktür.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

TS 500’e göre normal ağırlıklı betonlar için elastisite modülü, karakteristik basınç dağılımına bağlı olarak,

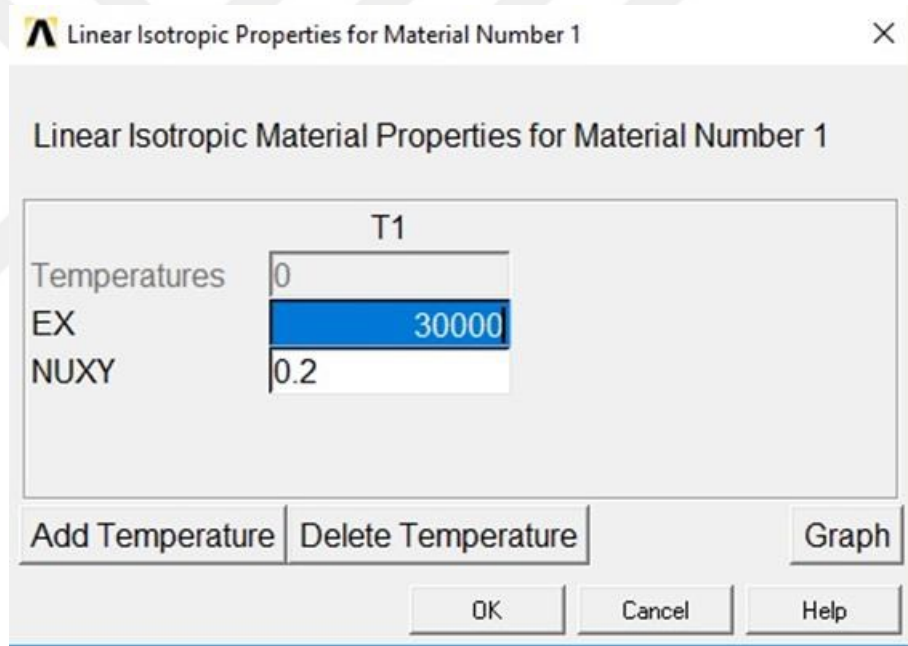
$$E = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad MPa \quad (3.4)$$

bağıntısıyla tanımlanmıştır. Bu değer ani yüklemeler için hesaplanmıştır. Kalıcı yük durumunda hesaplananın üçte biri yeterli olabilecekken çok ani yüklemeler için de %10 arttırılması gerekmektedir. Elastisite modülü; malzemedan malzemeye değişiklik göstereceği gibi malzemelerin kimyasal yapısı, ortam sıcaklığı vb. dış etkenlerden dolayı da farklılık gösterebilir. Örneğin; sıcaklık arttıkça daha az kuvvetle daha fazla şekil değişimi meydana geleceğinden dolayı azalır. Elastisite modülü; malzemenin rijitliğini de gösteren bir değerdir. Değer ne kadar büyükse malzeme o kadar rijittir ve elastik birim şekil değiştirmesi de o kadar küçüktür. Çalışmamızda yükleme kontrollü

şekilde yapıldığından dolayı C30 betonu için elastisite modülünün 30000 MPa alınması uygun görülmüştür.

ANSYS'te beton modelleme, dilenen parametreler değiştirilerek 3 adımda yapılabilir. Bu modeller;

- elastisite modülü ve poisson oranının girildiği lineer izotropik modeli,
- beton gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin tanımlandığı çok doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme modeli,
- programın kendi bünyesinde bulunan maksimum basınç ve çekme dayanımlarıyla, kesme kuvveti transfer katsayılarının girildiği beton malzeme modelidir.

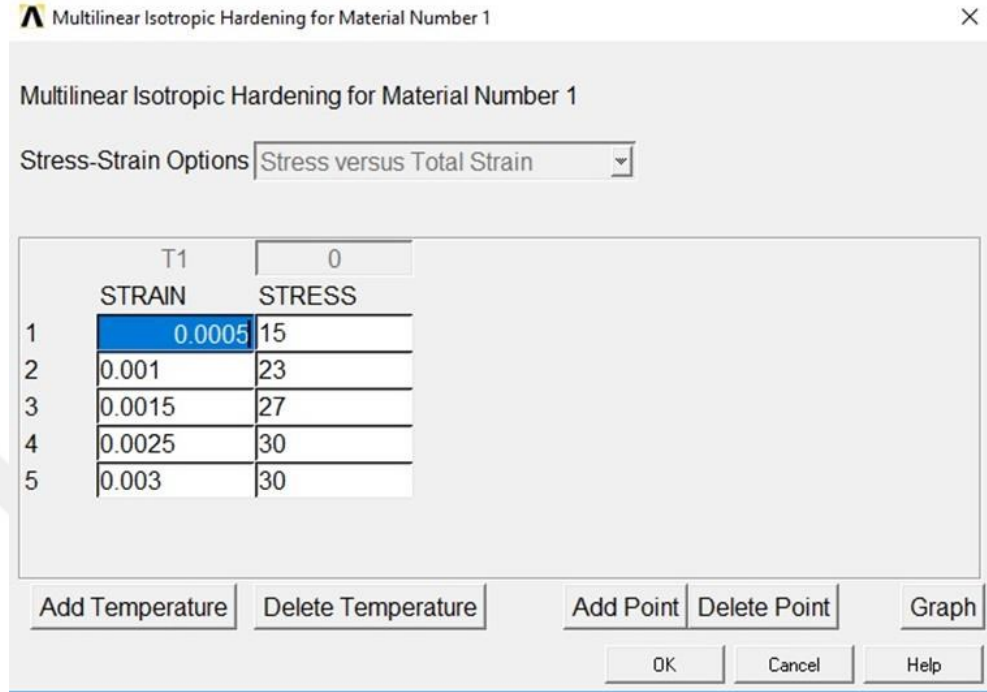


Şekil 3.20 Betonun elastisite modülü ve Poisson oranının tanımlanması

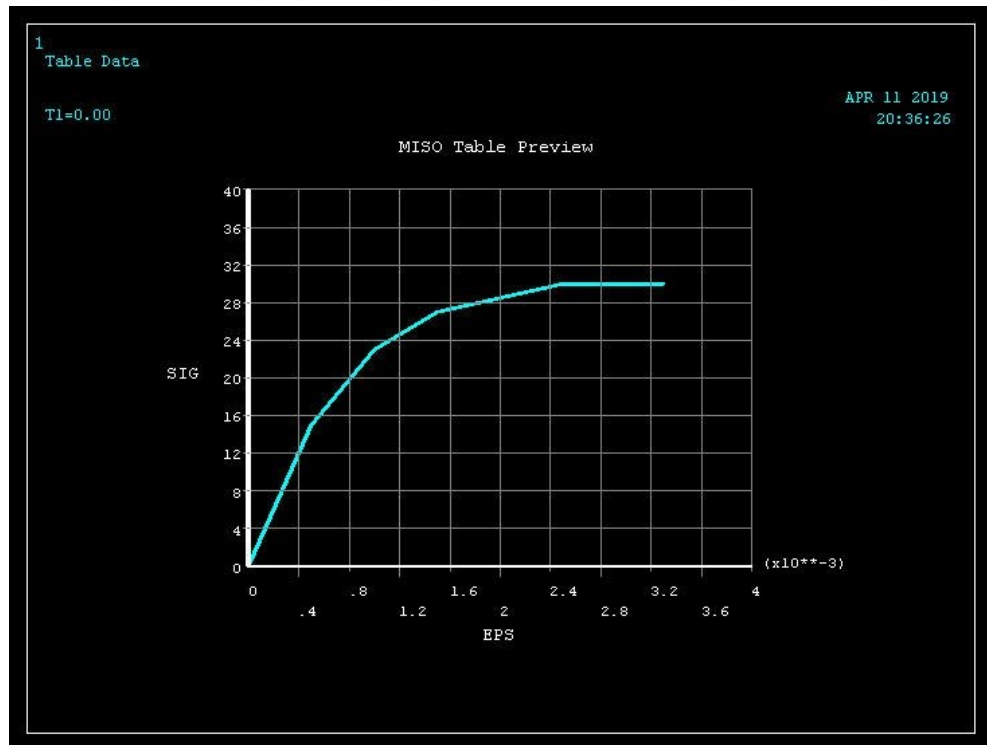
Beton için girilecek diğer bir özellik ise gerilme şekil değiştirme diyagramıdır. Tüm beton sınıfları için geçerli bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisini analitik olarak tanımlamak mümkün değildir. Yük altındaki betonun davranışı için optimize edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri tanımlanır. ANSYS'te bu grafiği manuel olarak elde etmek mümkündür. Grafiğin tanımlanabilmesi için *Material Model Number 1 - Structural - Nonlinear - Elastic - Multilinear Elastic* adımları takip edilerek ilgili menü açılıp grafik üzerinde 5 farklı nokta tanımlanmıştır (Şekil 3.21). Tasarlanan betonun



belirlenen gerilmesine karşı istenilen birim şekil değıştirme değeri girilerek grafik elde edilir (Şekil 3.22).



Şekil 3.21 Gerilme-birim şekil değıştirme eğrisinin tanımlanması



Şekil 3.22 Betonun gerilme-birim şekil değıştirme eğrisi

	T1
Temperature	0
Open Shear Transfer Coef	0.1
Closed Shear Transfer Coef	0.9
Uniaxial Cracking Stress	3.4
Uniaxial Crushing Stress	35
Biaxial Crushing Stress	0
Hydrostatic Pressure	0
Hydro Biax Crush Stress	0
Hydro Uniax Crush Stress	0
Tensile Crack Factor	0

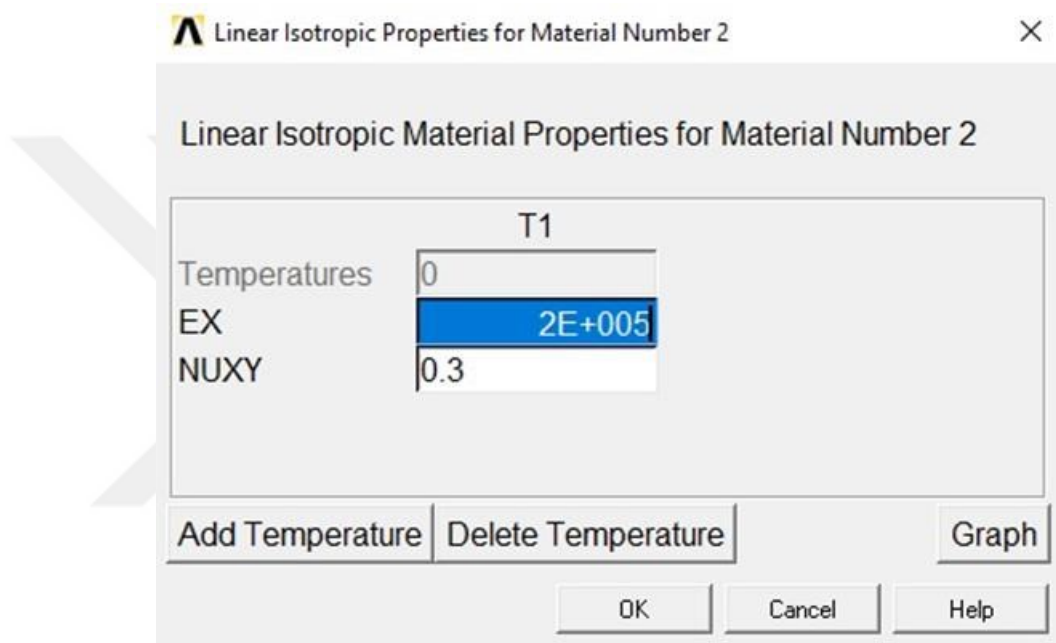
Şekil 3.23 Beton malzeme özellikleri

Şekil 3.23'te tanımlanan değerler sırayla; sabit betonun açık çatlak kesme transfer katsayısını, kapalı çatlak kesme transfer katsayısını, tek eksenli maksimum çekme mukavemetini ( $f_t$ ), tek eksenli maksimum basınç mukavemetini ( $f_c$ ) temsil etmektedir. Kesme transferi değeri, kesme transferinin kaybolmadığını temsil eden "1" ile kesme transferinin tamamen kaybolduğunu temsil eden "0" aralığında değerler alınabilir. Tezimizde açık çatlak transfer katsayısı için 0,1 kapalı çatlak transfer katsayısı için de 0,9 değerleri tanımlanmıştır.

### 3.2.5.2 Donatı malzeme modeli

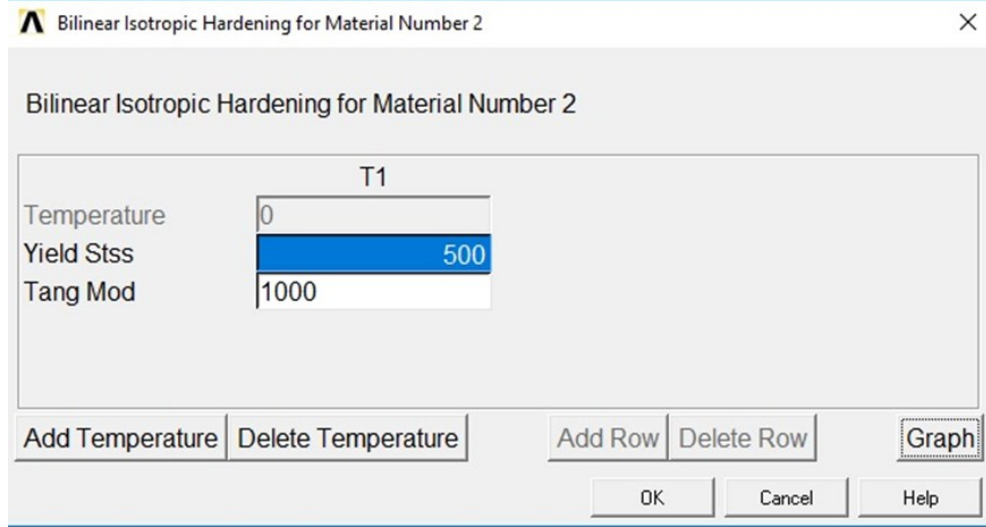
Bu modeli tanımlamak, donatının izotropik ve homojen yapıda olmasından dolayı beton modeli tanımlamaya göre nispeten daha kolaydır. TS 500'de tüm donatı sınıfları için elastisite modülü  $2 \cdot 10^5$  MPa olarak belirlenmiştir. Çalışmamızda elastisite modülü  $E =$

$2.10^5$  MPa, akma dayanımı  $f_y= 500$  MPa, Poisson oranı 0,3 olarak belirlenmiştir. Donatının pekleşme etkisini yani akmadan sonra da gerilme artışlarını hesaba katabilmek için tanjant modülü tanımlanmıştır. Normal ve yüksek mukavemetli çelik için 1000 MPa'lık tanjant modülü kabul edilebilir (ABS, 2006). Bu yönetmeliğe dayanarak çalışmamızda ikinci kol için tanjant modülü 1000 MPa varsayılmıştır. Şekil 3.24'teki menüden linear izotropik malzeme modelini tanımlamak için elastisite modülü ve Poisson oranı girilmiştir.

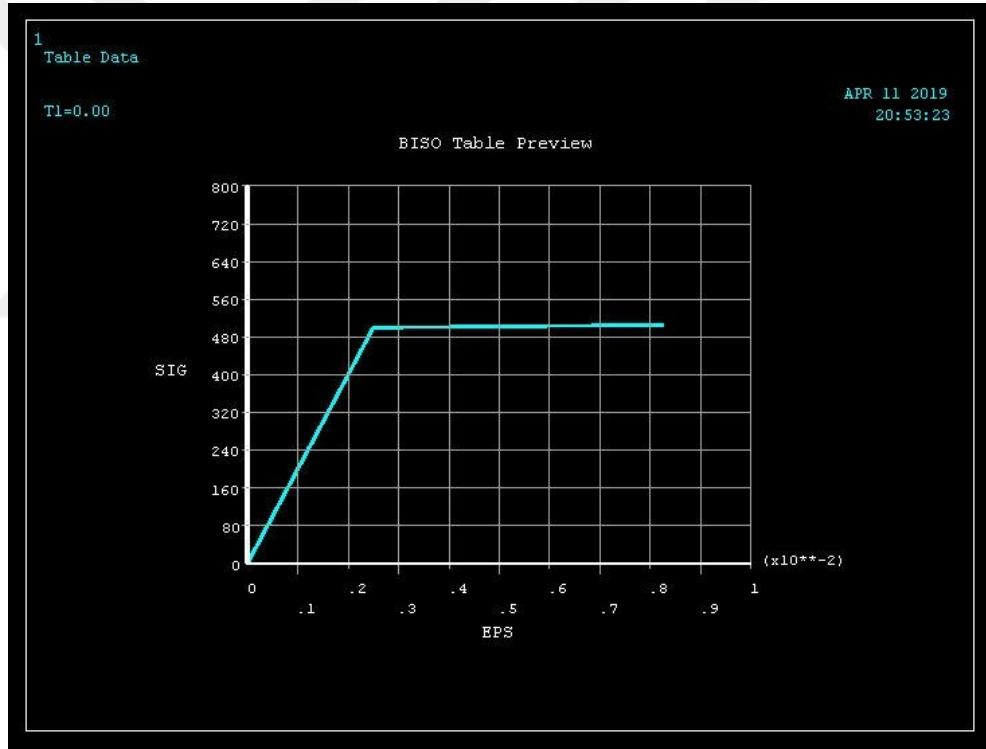


Şekil 3.24 Donatının elastisite modülü ve Poisson oranının tanımlanması

Tek doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme modeli tanımlamak için de akma ve pekleşme dayanımlarını tanımlamak yeterli olacaktır (Şekil 3.25). Bu değerlerin tanımlanmasıyla Şekil 3.26'daki donatı gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlanmış olacaktır.



Şekil 3.25 Donatının akma ve pekleşme dayanımlarının tanımlanması

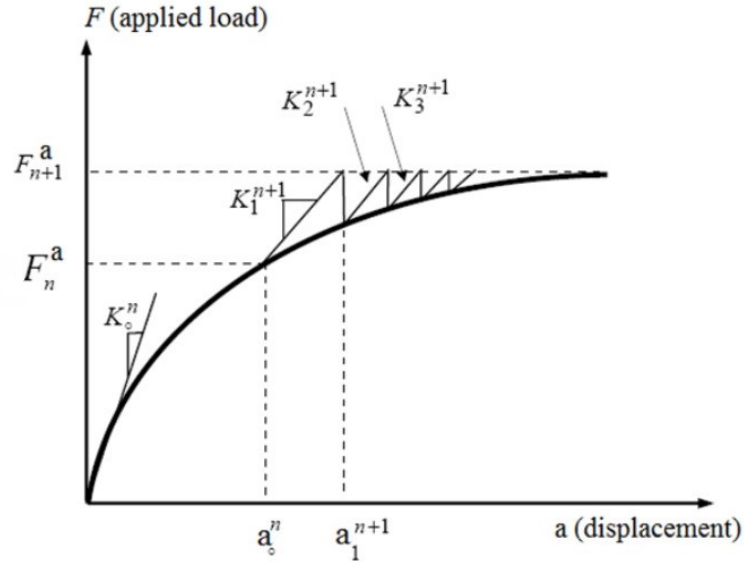


Şekil 3.26 Donatının gerilme-birim şekil değıştirme eğrisi

Grafiğin başlangıç eğimi elastisite modülünü, akma gerilmesinden sonraki eğimi ise tanjant modülünü vermektedir. Şekil 3.26'da da görüldüğü üzere donatıda 500 MPa değerinde akma meydana geliyor ve devamında pekleşme başlıyor.

### 3.3 Analiz

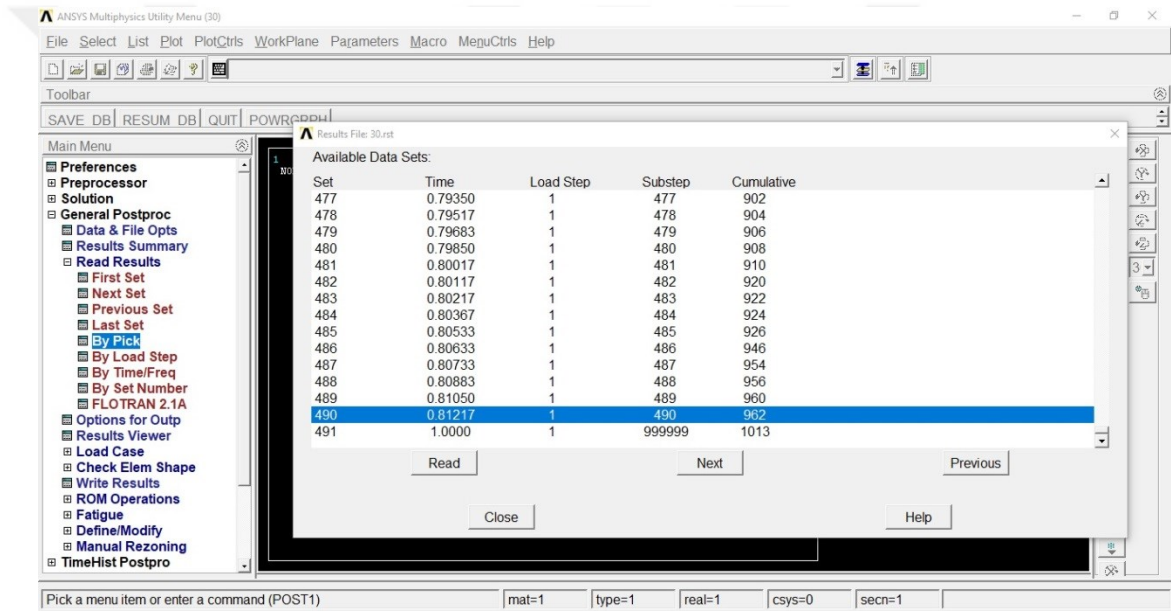
ANSYS, doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde çeşitli iterasyon prosedürleri kullanır. Herhangi bir seçim yapılmadığı takdirde program otomatik olarak Newton-Raphson yöntemini kullanır. Değişken rijitlik prosedürü olarak da bilinen bu yöntem, yük etkisinde deplasman yapan sistemin düğüm noktalarında oluşacak kuvvet farkını baz alır. Yapının deforme olmamış konumunda hesaplanan rijitlik matrisinden ilk deplasmanlar bulunur. Her yükleme adımında yapının deforme olmuş halinden teğet rijitlik matrisi hesaplanır. Newton-Raphson yöntemi dengelenmemiş yük vektörünü kullanarak doğrusal çözüm yapar. Sonuca yakınsama olup olmamasına göre her seferinde dengelenmemiş yük vektörü yeniden hesaplanır. Yakınsama sağlanıncaya kadar çözüm devam eder. Yakınsama sağlanamazsa daha küçük yük artışları kullanılır. Çalışmamızda 83 kN'a kadar birer kN'luk artış varken 83 kN'dan sonra yük artış adımları 83,6 kN, 84,2 kN, 85,1 kN, 86,1 kN şeklinde devam etmiştir. Newton Raphson yönteminde bir boyutlu bir sistem için çözümün ilerleme aşamaları Şekil 3.27'de görülmektedir. ANSYS programında Newton Raphson yönteminden farklı bir yöntem seçebilmek için NROPT komutu kullanılır.



Şekil 3.27 Değiştirilmiş Newton Raphson yönteminde çözümün ilerleyişi (Mohsen vd., 2016)

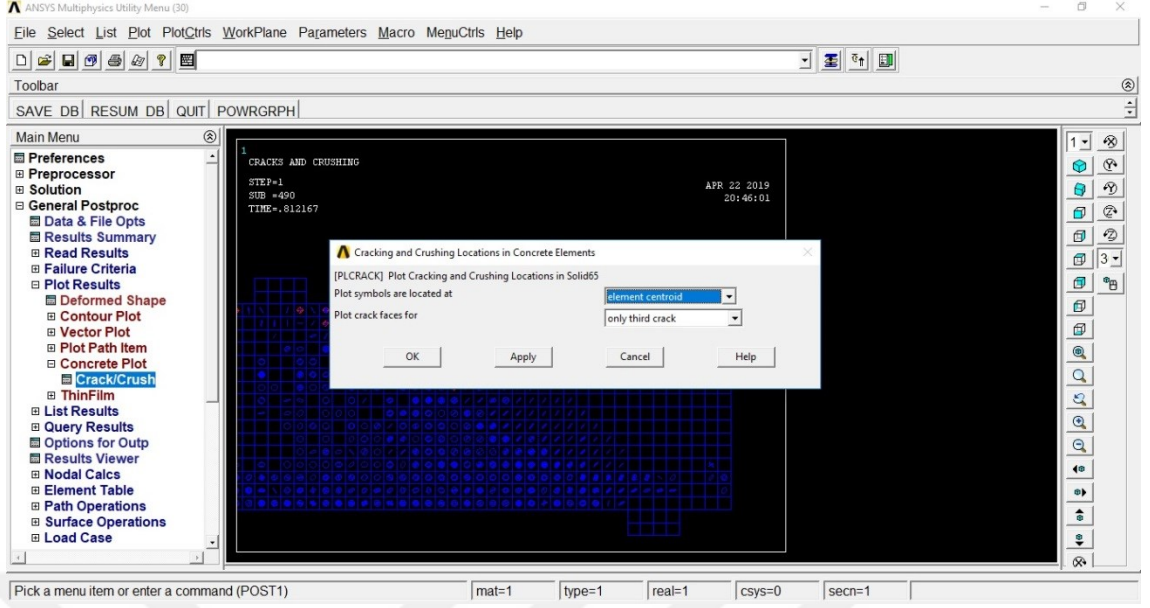
### 3.4 Sonuçların okunması

Analizin tamamlanmasının ardından, istenirse kırılmaya sebep olan son yükleme adımından (Şekil 3.28 490 nolu adım) istenirse de daha önceki herhangi bir yükleme adımından değerler okutulabilir. Hangi yükleme adımında değer okutulmak istenirse, *General Postproc - Read results - By pick* tıklanarak açılan pencereden Şekil 3.28'deki istenilen değer seçilir. Kapasite değerlerinin okutulabilmesi için son adımın seçilmesi gerekir ancak aynı yük değerinde (400 kN) farklı kirişlerin davranışlarını karşılaştırdığımız Bölüm 4.10'daki gibi bir tablo oluşturabilmek için nihai dayanım öncesi bir yük değeri seçmek gerekebilir.



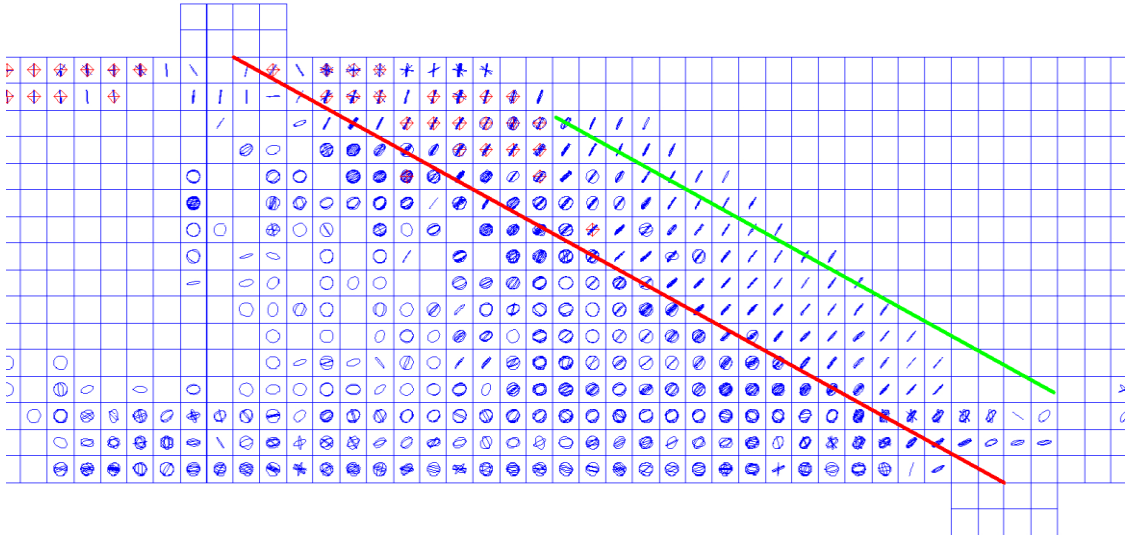
Şekil 3.28 Analiz sonuçlarında yükleme adımının seçilmesi

İstenen yük adımında kirişlerde beliren çatlak durumlarını görmek için *General Postproc - Plot results - Concrete Plot - Crack/Crush* tıklanır ardından *element centroid - only third crack* seçilir. Buradaki seçenekte (Şekil 3.29) bir ve ikinci çatlaklar da seçilebilir ancak bu iki seçenekten elde edilecek çatlaklar mikro seviyede olduğundan, çalışmamızda sadece üçüncü seviye çatlak görüntüleri kullanılmıştır.



**Şekil 3.29** Çatlak görüntüleme menüsü

Yukarıdaki menü vasıtası ile çatlak görünümü elde edilir. Sağdaki görüntüleme menüsünden yaklaşıp-uzaklaştırılma, izometrik görüntü alma vb. işlemler yapılabilir. Şekil 3.30'da çatlak detaylarını gösterebilmek için kirişin sadece bir kısmının yakın görüntü alınmıştır.



**Şekil 3.30** Taşıma kapasitesine ulaşan kirişte meydana gelen çatlaklar

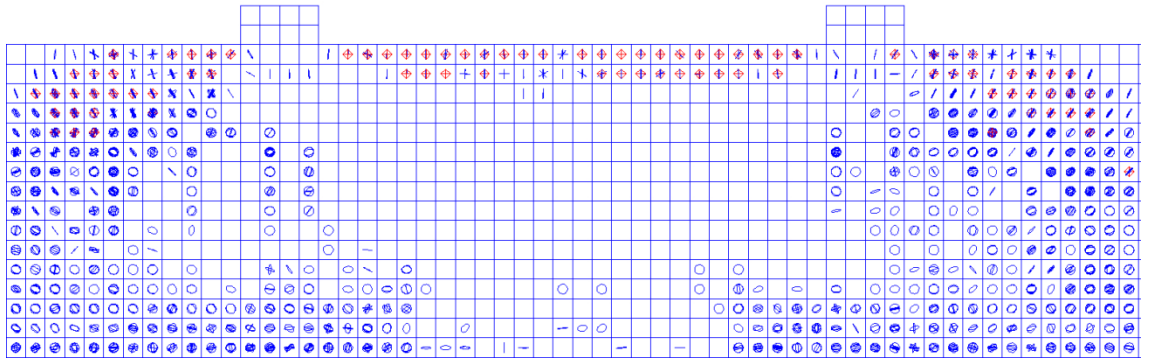


ANSYS'te çatlaklar daire olarak gösterilir. Dairenin yönlendiği doğrultu çatlak doğrultusunu gösterir. Sonlu eleman içinde meydana gelen her daire, o elemanda meydana gelen hasarı artırır. Şekil 3.30'da görünen tek daireler ve çizgiler birinci çatlakları, yoğun mavi daireler üçüncü çatlakları, kırmızı işaretli ise ezilme çatlaklarını gösterir.

Birinci seviye çatlaklar, betonarme eleman çatlamağa başladığında görülen çatlaklarla aynı yöndedir. Üçüncü çatlaklar türediğinde artık elemanda çok aşırı hasarlar oluşmaya başlamıştır ve çatlak yönü artık önemli değildir.

Yeşil çizgi ile belirtilen bölge ise tek yönlü çatlakların bulunduğu bölgedir. Kırmızı çizgi ile belirtilen bölge çok yönlü çatlakları ihtiva eden bölgedir. Bu bölgede bulunan basınç çubuğu hem asal gerilmelere bağlı çekme çatlakları hem de basınç gerilmelerine bağlı ezilmeler dolayısıyla hasar görür. Hasar iyice ilerlediğinde ise göçme yaşanır.

Kirişlerimiz kesme kırılmasıyla göçtüğünden, göçmeye sebep olan çatlaklar gerçekte mesnet ve yük arasında 45°'lik çatlaklardır. Burada önemli olan çatlakların mesnet ve yük arasında yoğunlaşmış olması ve bu haliyle kesme kırılmasını ispatlamasıdır.



**Şekil 3.31** Ezilme çatlakları

Kiriş üst kısmında yüklerin arasında meydana gelen kırmızı dörtgen şekiller, ezilme çatlaklarını ifade eder (Şekil 3.31). Burada, meydana gelen göçme modunda ezilmenin de payı olduğu görülmektedir. Esasında göçmeye kesmeye bağlı eğik çatlaklar sebep olurken, beraberinde ezilmenin de gerçekleşmiş olduğu anlaşılmaktadır.

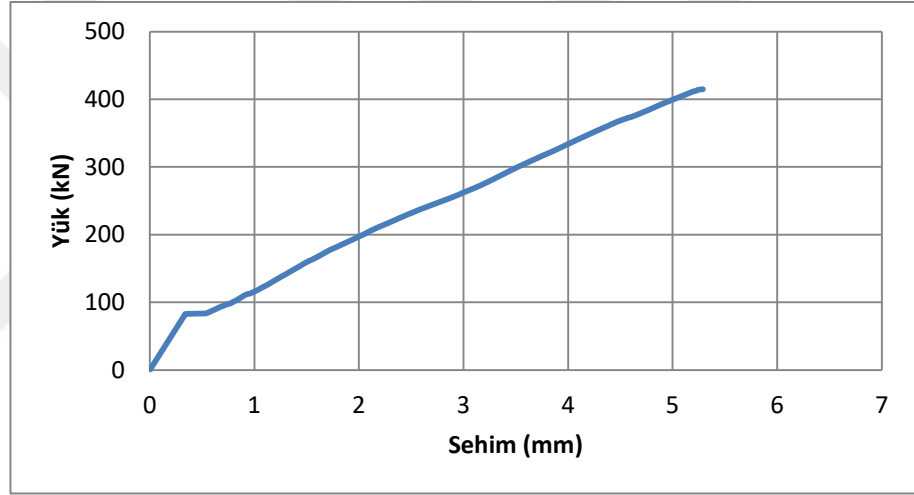


#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

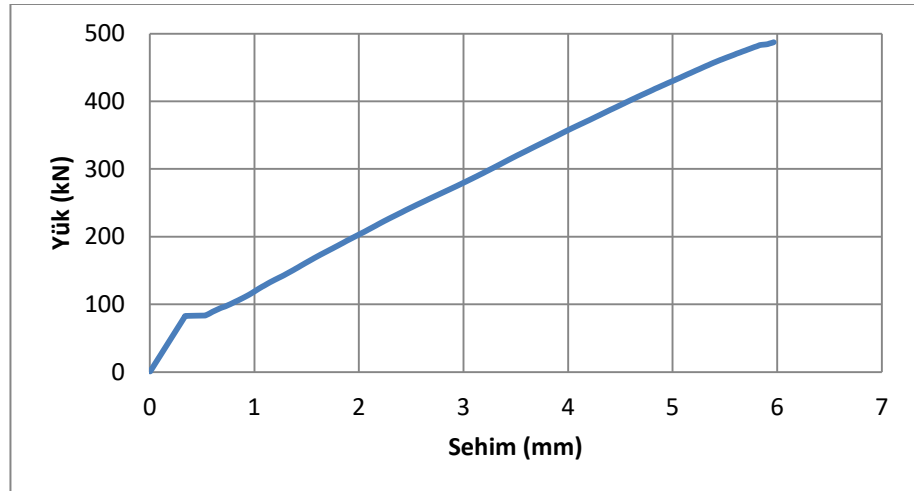
Bu bölümde numunelerin analizlerinden elde edilen sonuçların grafiklerini karşılaştırmalarından bahsedilecektir.

##### 4.1 Yük-Sehim Grafiğinin Karşılaştırılması

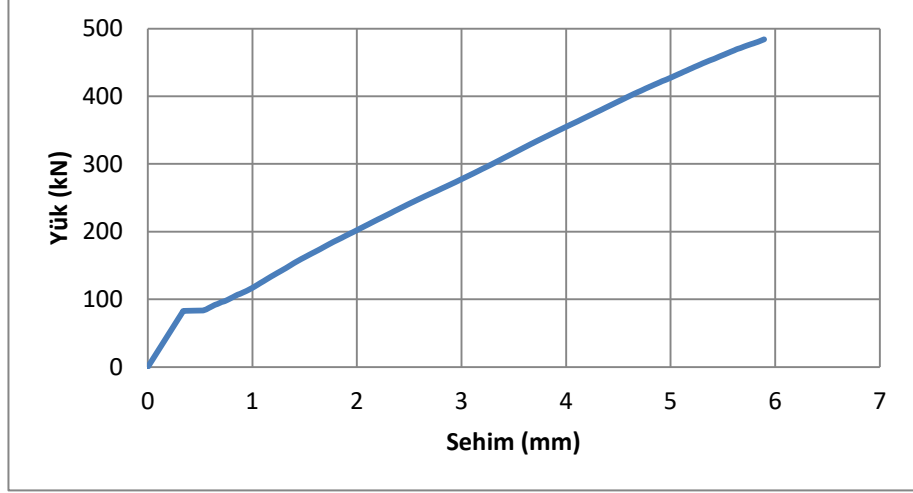
Analizi yapılan kirişlerin yük-sehim grafikleri aşağıda görülmektedir. TS 500'e göre basit mesnetli kirişlerde kiriş yüksekliği  $h$ , serbest açıklığın %10'undan fazla ise sehim hesabı gerektirmez ancak yine de çalışmamızda numunelerin davranışlarının karşılaştırılabilmesi için değerler Tablo 4.1'de belirtilmiştir.



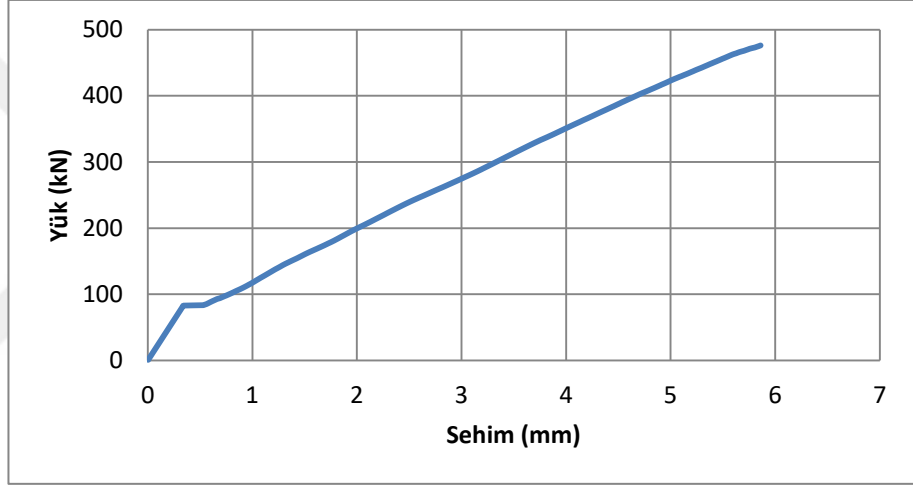
Şekil 4.1 K00 kirişine ait yük-sehim grafiği



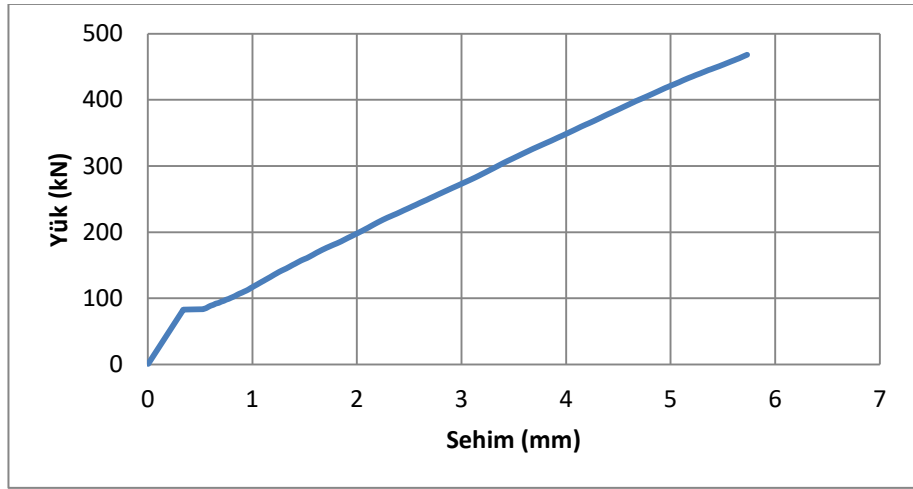
Şekil 4.2 K30 kirişine ait yük-sehim grafiği



Şekil 4.3 K45 kirişine ait yük-sehim grafiği



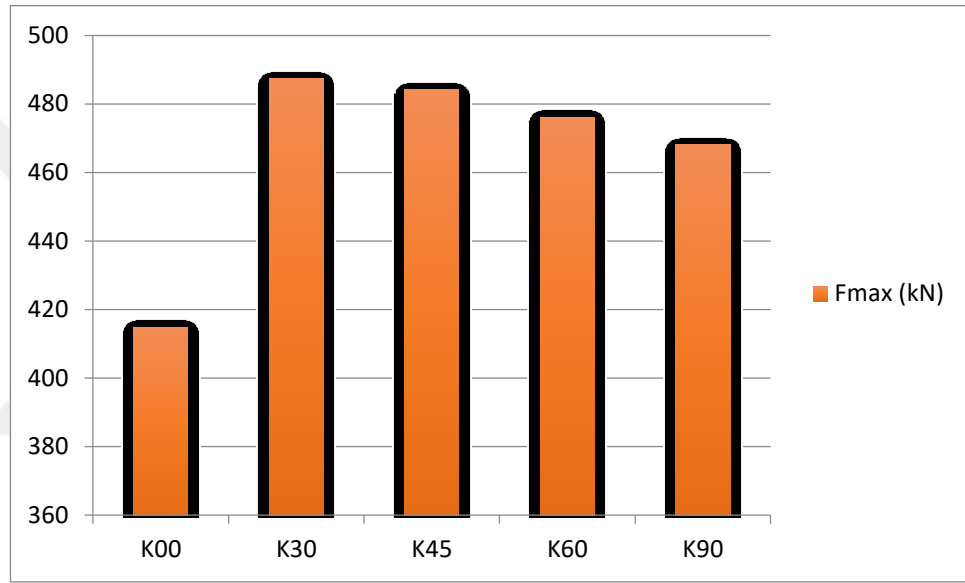
Şekil 4.4 K60 kirişine ait yük-sehim grafiği



Şekil 4.5 K90 kirişine ait yük-sehim grafiği

**Tablo 4.1** Kirişlerin taşıdıkları maksimum yük değerleri

Kiriş No	Fmax (kN)	K00'a göre artış/azalış
K00	414,8	-
K30	487,3	17,5%
K45	484,1	16,7%
K60	476,1	14,8%
K90	468,1	12,8%



**Şekil 4.6** Kirişlerin maksimum taşıdıkları yükler

Numuneler arasında maksimum yük K30 kirişi tarafından taşınmıştır. K30 kirişi taşıma kapasitesine ulaştığı anda meydana gelen sehim miktarı yaklaşık 6 mm.'dir. Tüm kirişlerde çekme sebebiyle oluşan ilk çatlaklar yaklaşık aynı yükte (78-83 kN) meydana gelmiştir. Çekme çatlakları oluşuktan sonra kirişlerin altında konumlandırılan boyuna donatılar daha etkin çalışmaya başlayıp, çekme gerilmelerine karşı dayanım sergilenmiştir.

**Tablo 4.2** Kirişlerde meydana gelen maksimum sehim değerleri

<b>Kiriş No</b>	<b>Sehim (mm)</b>	<b>K00'a göre artış/azalış</b>
K00	5,29	-
K30	5,97	12,8%
K45	5,89	11,4%
K60	5,86	10,8%
K90	5,73	8,4%

K00 kirişinin yük-sehim grafiği, 73 kN değerinde iken yataylaşmakta ve ilk çatlak burada oluşmaktadır. Yönetmeliklere uygun tasarlanan sünek bir kirişte yataylaşma taşıma kapasitesine yakın yerlerde meydana gelir. Ancak çalışmamızda bu yataylaşmanın erken olma sebebi, etriyelerin katkısını görmek için eğilme etkilerine karşı mukavim ve kesme kuvvetine karşı zayıf tasarım yapılmasıdır.

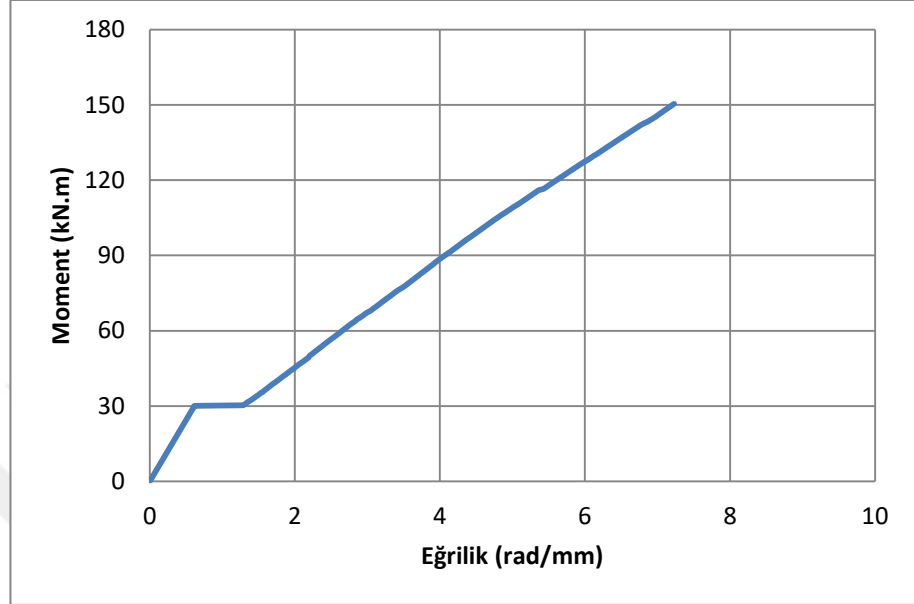
Bu grafiklerin altında kalan alan ile enerji tüketim kapasitesi bulunabilir. Tablo 4.3'te kirişlere ait enerji tüketim kapasitesi (ETK) belirtilmiştir.

**Tablo 4.3** Kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri

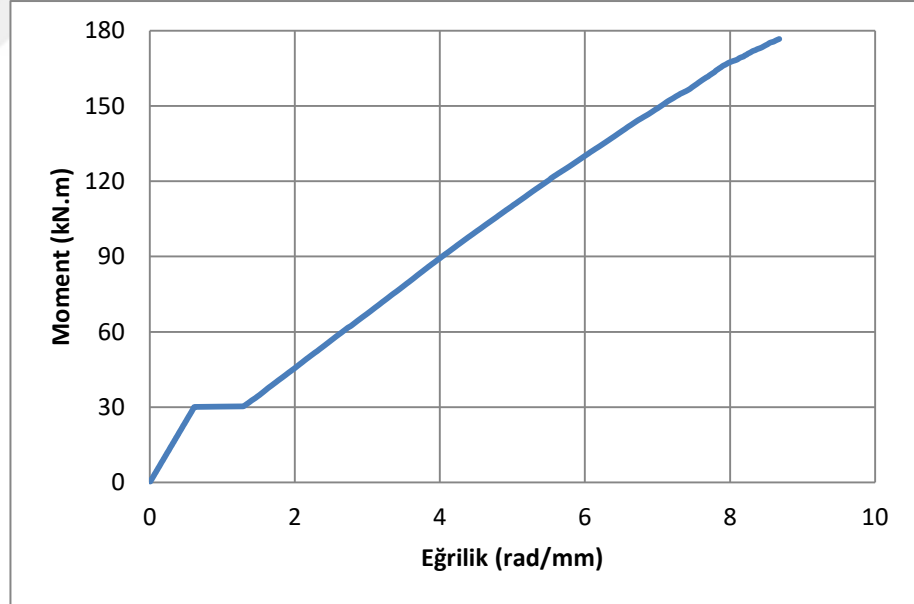
<b>Kiriş No</b>	<b>ETK (kN.m)</b>	<b>K00'a göre artış/azalış</b>
K00	1,25	-
K30	1,64	31,3%
K45	1,60	27,7%
K60	1,56	25,1%
K90	1,49	19,6%

## 4.2 Moment-Eğrilik Grafiğinin Karşılaştırılması

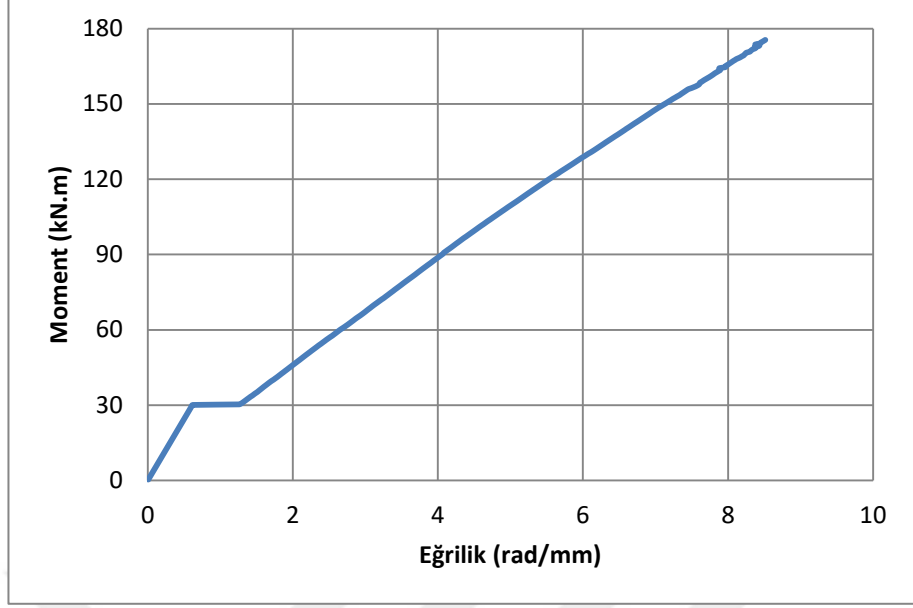
Analizi yapılan kirişlerin moment-eğrilik grafikleri aşağıda görülmektedir.



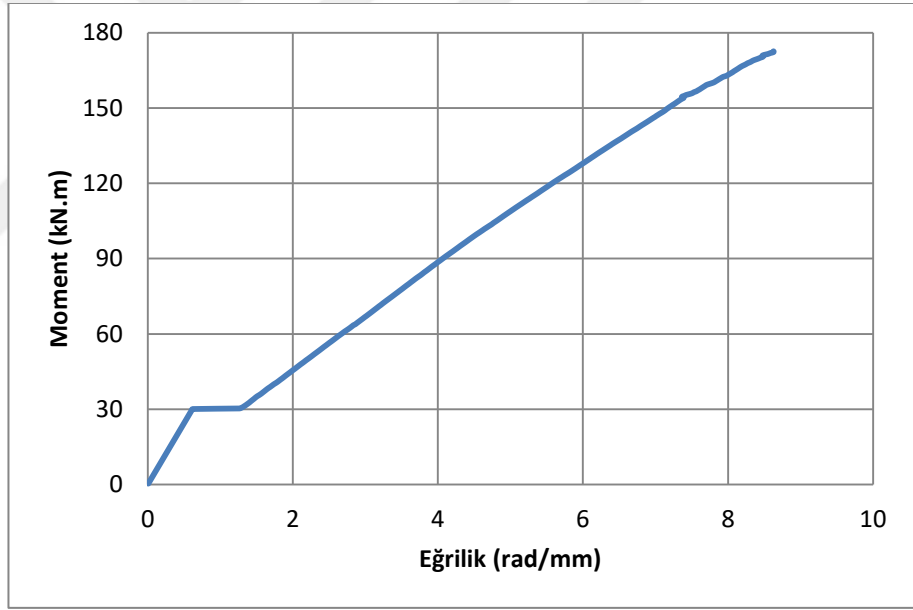
Şekil 4.7 K00 kirişine ait moment-eğrilik grafiği



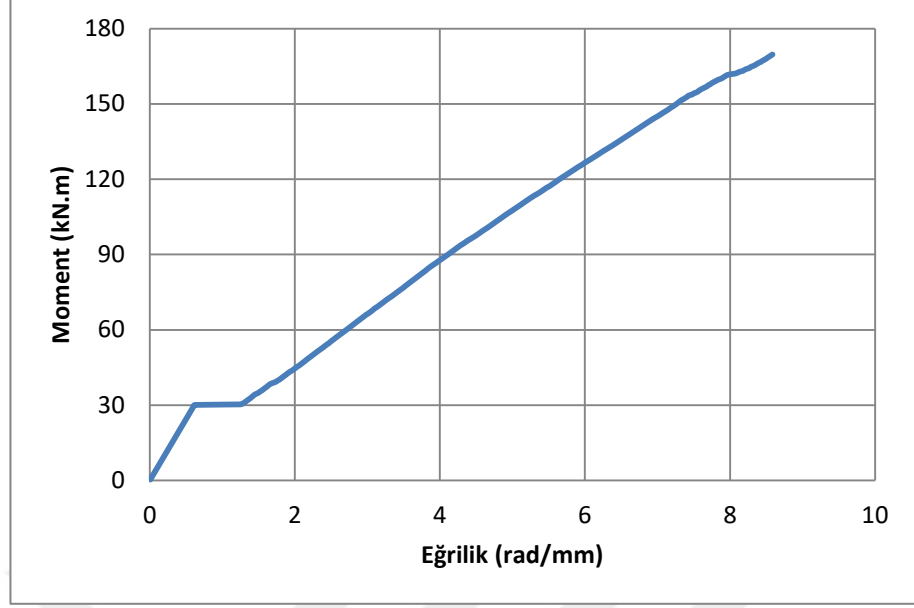
Şekil 4.8 K30 kirişine ait moment-eğrilik grafiği



Şekil 4.9 K45 kirişine ait moment-eğrilik grafiği



Şekil 4.10 K60 kirişine ait moment-eğrilik grafiği



**Şekil 4.11** K90 kirişine ait moment-eğrilik grafiği

Kirişlerin hepsi grafiklerin 30,09 kN.m değerinde yatay duruma geçmiştir. Momentin bu değeri alt liflerdeki uzamasına yani eğilmeye bağlı çatlaklardaki belirginleşmesine denk gelir. Tüm kirişlerdeki alt donatı miktarı eşit olduğundan, hepsi eğilmeye karşı aynı davranışı göstermiş.

**Tablo 4.4** Kirişlerde meydana gelen maksimum moment değerleri

Kiriş No	Mmax (kN.m)	K00'a göre artış/azalış
K00	150,36	-
K30	176,65	17,5%
K45	175,49	16,7%
K60	172,59	14,8%
K90	169,69	12,8%

Tablo 4.4'te sıralanan değerlerde, numuneler arasında maksimum moment değerine K30 kirişi tarafından ulaşılmıştır. Kirişler arasında en sünek olan K30 kirişi iken en gevreği ise beklenildiği üzere K00 kirişidir.

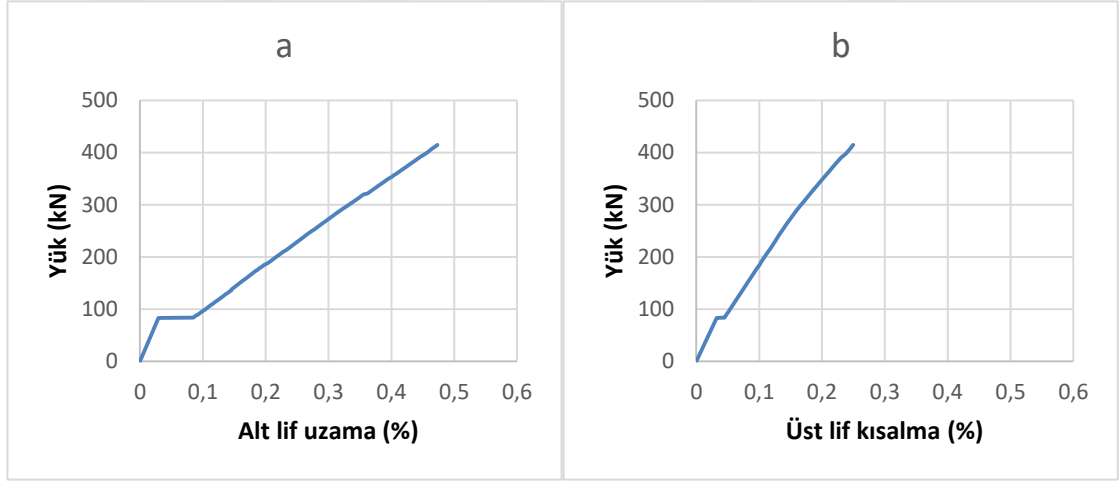
**Tablo 4.5** Maksimum moment anında meydana gelen eğrilik değerleri

Kiriş No	Eğrilik Değerleri (Rad/mm)	K00'a göre artış/azalış
K00	7,23	-
K30	8,68	20,1%
K45	8,51	17,8%
K60	8,63	19,3%
K90	8,59	18,8%

Tablo 4.5'te kirişlerde maksimum moment anında meydana gelen eğrilik değerleri gösterilmiştir.

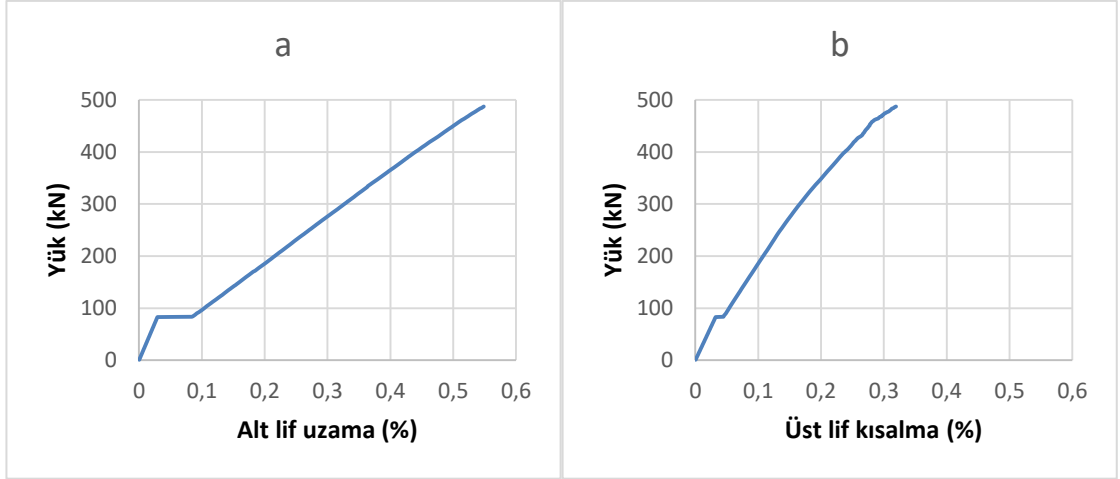
#### 4.3 Alt Lif Uzama ve Üst Lif Kısılma Grafiğinin Karşılaştırması

Analizi yapılan kirişlerin alt lif uzama ve üst lif kısılma grafikleri aşağıda görülmektedir.

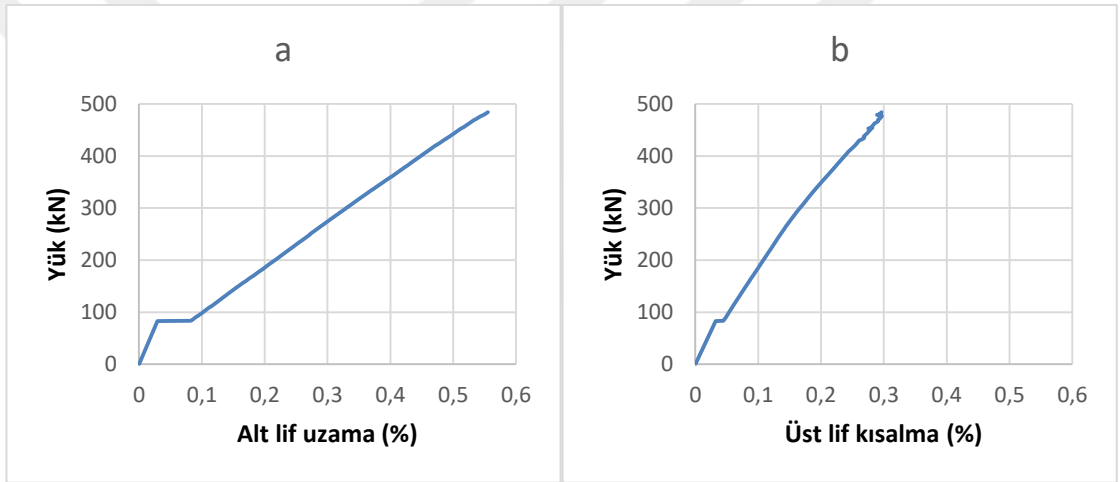


**Şekil 4.12** K00 kirişine ait alt lif uzama (a) ve üst lif kısılma (b) grafiği

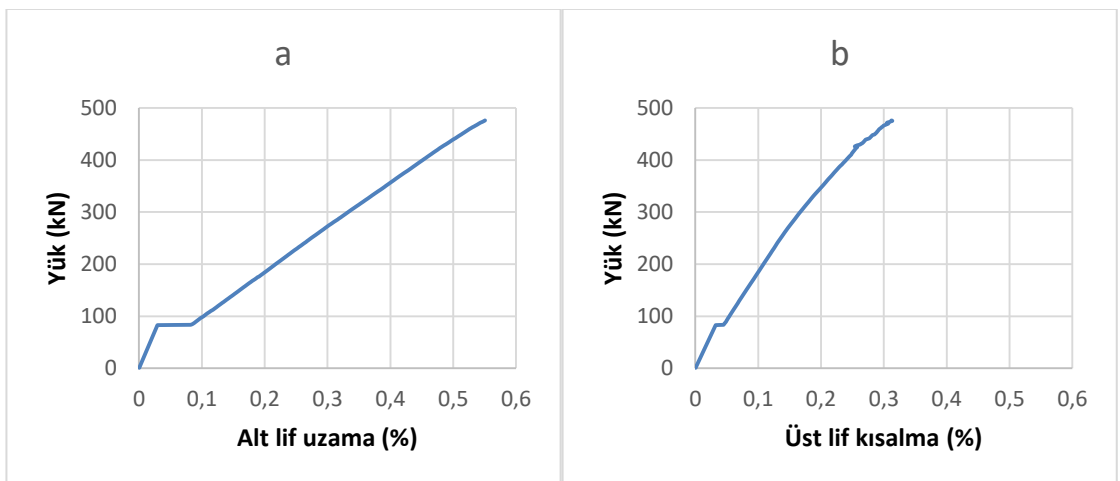




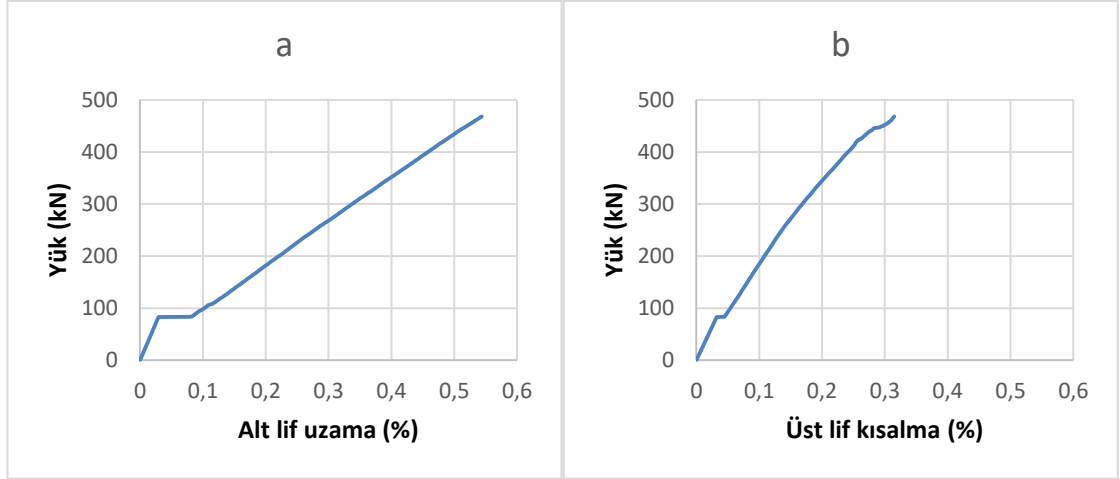
Şekil 4.13 K30 kirişine ait alt lif uzama (a) ve üst lif kısalma (b) grafiği



Şekil 4.14 K45 kirişine ait alt lif uzama (a) ve üst lif kısalma (b) grafiği



Şekil 4.15 K60 kirişine ait alt lif uzama (a) ve üst lif kısalma (b) grafiği

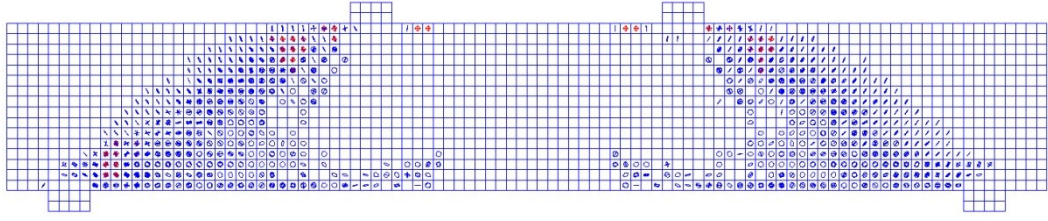


Şekil 4.16 K90 kirişine ait alt lif uzama (a) ve üst lif kısalma (b) grafiği

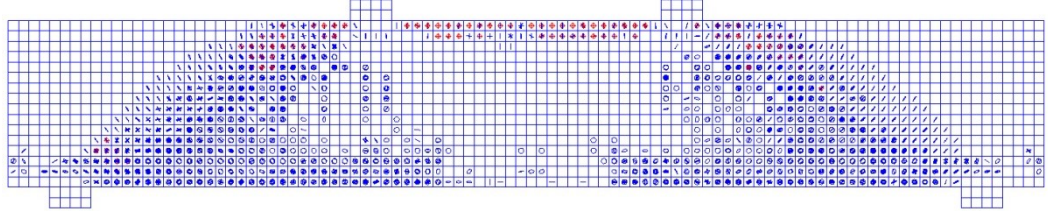
Tablo 4.6 Kirişlerin alt lif uzama ve üst lif kısalma değerleri

Kiriş No	Alt Lif Uzama (%)	K00'a göre artış/azalış	Üst Lif Kısalma (%)	K00'a göre artış/azalış
K00	0,47	-	0,25	-
K30	0,55	15,9%	0,32	27,9%
K45	0,56	17,3%	0,30	18,6%
K60	0,55	16,3%	0,31	25,0%
K90	0,54	14,9%	0,31	26,1%

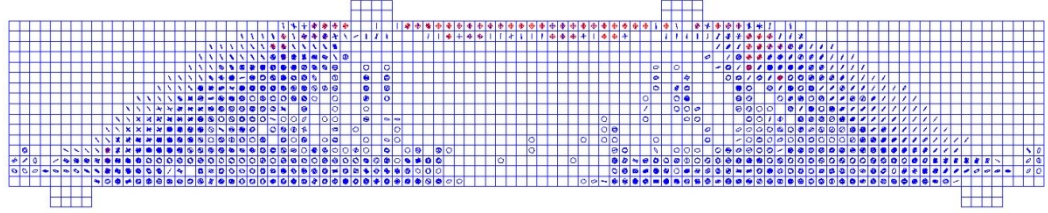
Numuneler arasında en çok üst lif kısalmasına yani ezilmeye maruz kalan K30 kirişidir. Bu durum K30 kirişinin maksimum kuvvete karşı daha mukavim olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki şekillerde kirişlerde meydana gelen ezilme (kırmızı ile belirtilen kısımlar) ve çatlaklar belirtilmektedir.



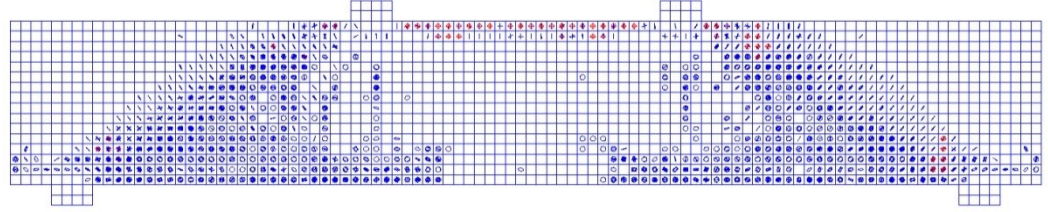
Şekil 4.17 K00 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları



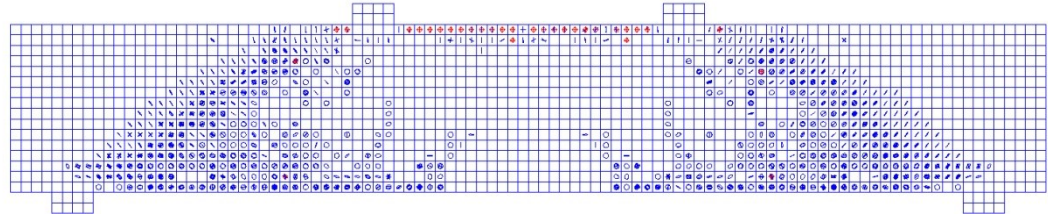
Şekil 4.18 K30 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları



Şekil 4.19 K45 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları



Şekil 4.20 K60 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları



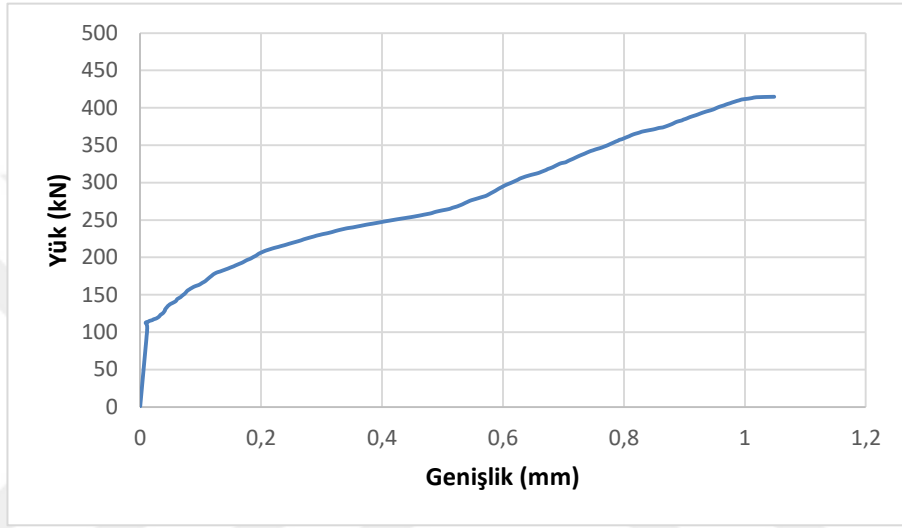
Şekil 4.21 K90 kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Şekil 4.19'da da görüldüğü üzere çekme çatlaklarının en yoğun olduğu kiriş K45 kirişidir. K45 kirişinde maksimum yük taşıyan K30 kirişine göre çok az farkla da olsa (%0,66) daha çok lif uzaması meydana gelmiştir. Fark çok az olduğu için K45 kirişinin

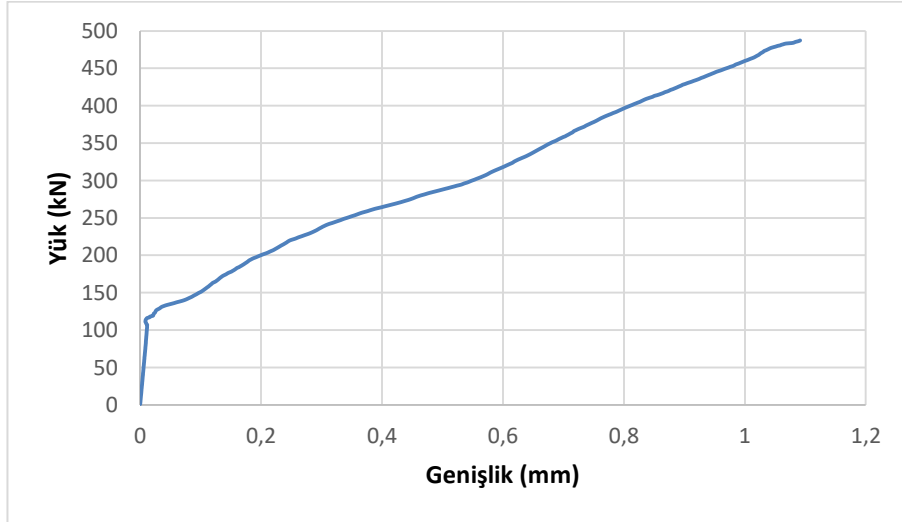
K30 kirişinden daha sünek olduğu ile ilgili yorum yapmak doğru olmayacaktır.

#### 4.4 Kesme Çatlağı Genişliklerinin Karşılaştırması

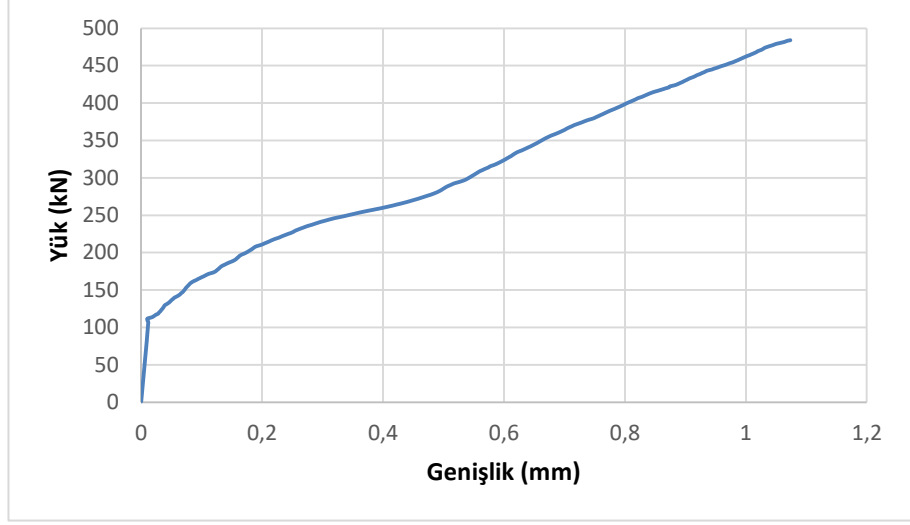
Grafiklerde de görüldüğü gibi çatlak genişlikleri 100 kN değerine kadar yavaş bir artış göstermiştir. Fakat ardından yük artışı oldukça çatlak genişliği de daha belirgin olmaya başlamıştır.



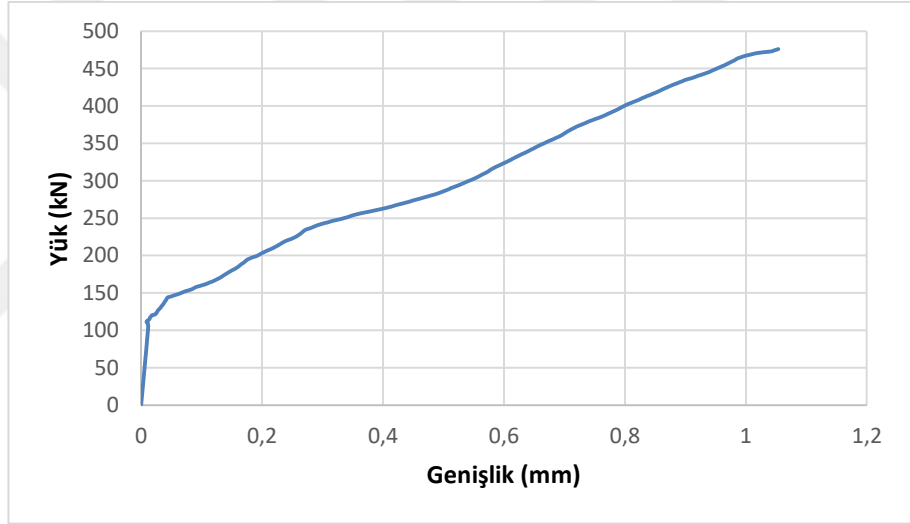
Şekil 4.22 K00 kirişine ait yük-kesme çatlağı genişliği grafiği



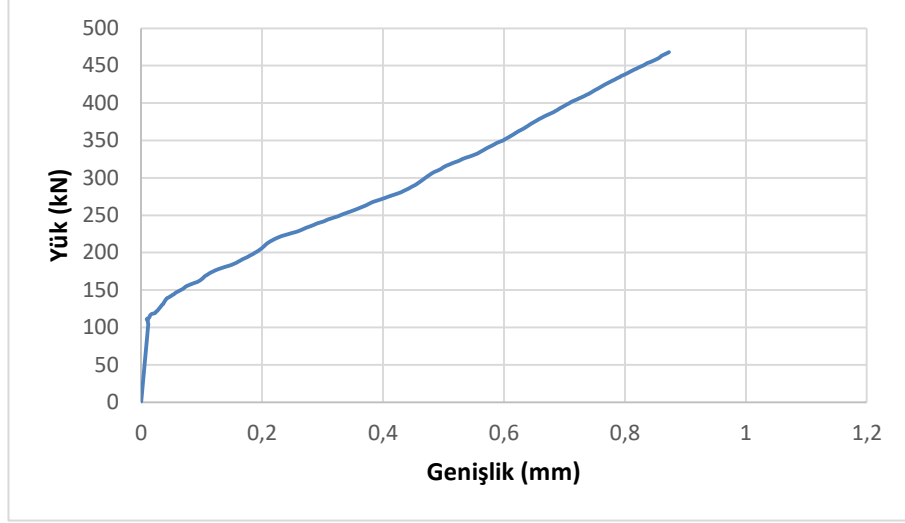
Şekil 4.23 K30 kirişine ait yük-kesme çatlağı genişliği grafiği



Şekil 4.24 K45 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği



Şekil 4.25 K60 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği



Şekil 4.26 K90 kirişine ait yük-kesme çatlak genişliği grafiği

Tablo 4.7 Kirişlerin kesme çatlakındaki genişlik değerleri

Kiriş No	Çatlak Genişliği (mm)	K00'a göre artış/azalış
K00	1,05	-
K30	1,09	4,1%
K45	1,07	2,4%
K60	1,05	0,5%
K90	0,87	-16,8%

Tablo 4.7'de kirişler arasında en küçük çatlak genişliği K90 kirişindedir. Çatlak oluştuğunda kirişin orta kısmı kopup aşağı düşmeye isteklidir. Bu kısımda 90 derecelik kapalı etriyeler, askı vazifesi görmektedir (Şekil 2.7). Etriyeler ile yük paralel olduğundan düşmeye istekli kütleyi diğer kirişlere nispeten daha etkili biçimde taşıyarak düşmesini engeller ve kesme çatlak genişliğinin daha az olmasını sağlar.

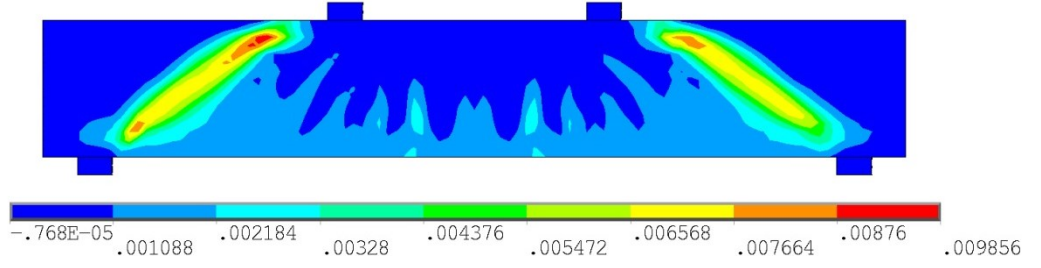
Tablo 4.7'de değerler incelendiğinde çatlak genişliği ile yük taşıma kapasitesi doğru orantılı değildir. Yani çatlak genişliğinin büyük olması kiriş performansının düşük olduğunu göstermemektedir.

#### 4.5 Betonda Asal Gerilme ve Birim Şekil Değişirme Dağılımlarının Karşılaştırılması

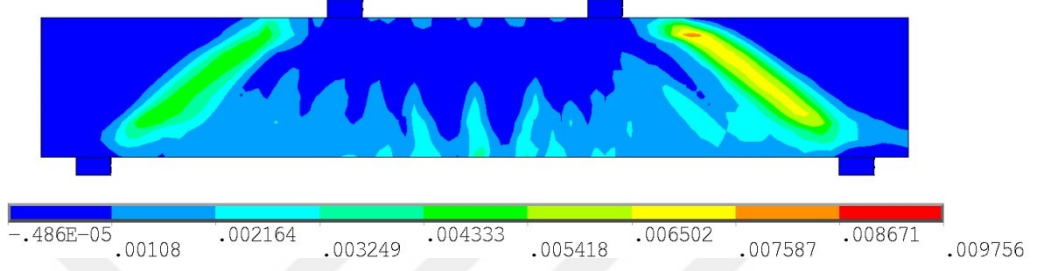
Betonarme kirişlerin davranışı için genel kabul, kiriş üzerine yük uygulanmaya başlandığında taşıma gücüne erişmeden çok önce çekme kuşağında çatlakların ortaya çıkacağıdır. Ancak birim şekil değiştirmelerin %0,1'den az olması kaydıyla beton ve çelik donatı arasında uyumlu bir davranış görülmekte, dolayısıyla bu çatlaklar kılcal ve önemsiz nitelikte olmaktadır (Özkal, 2017). Göçme anındaki gerilmeleri gösteren Şekil 4.27, Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'deki asal birim şekil değiştirmelerin %0,1'den az olduğu bölgeler açık mavi ile belirtilirken, asal birim şekil değiştirmenin maksimum olduğu bölgeler kırmızı ile belirtilmiştir.

Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34, Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da asal gerilmeler ve etriyeler birlikte gösterilmiştir. Pozitif değerler çekmeyi, negatif değerler ise basıncı göstermektedir. Mesnetlerden yüklere doğru olan kısımda ve mesnetler arasındaki kısımda çekme gerilmelerinin yoğun olduğu gözükmektedir.

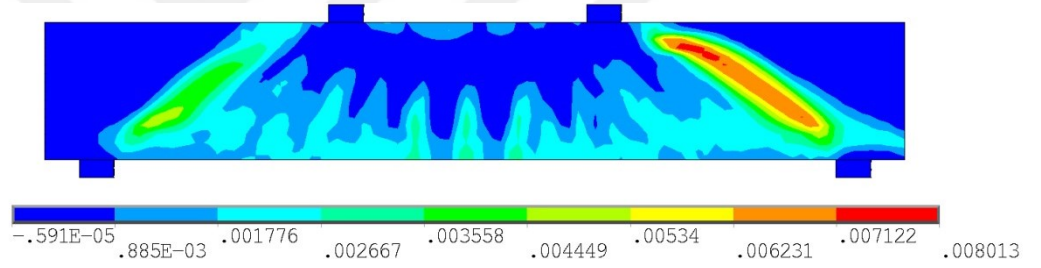




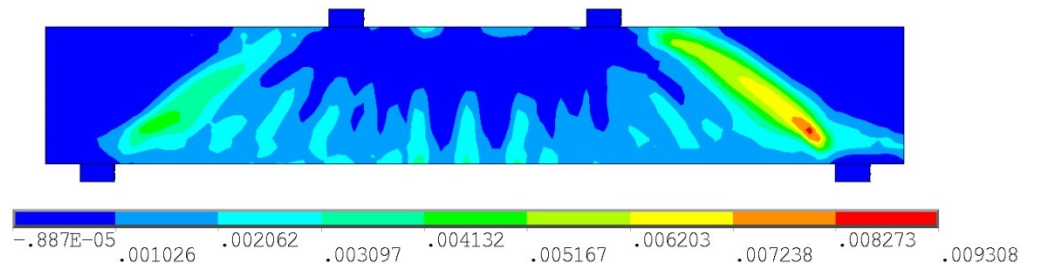
Şekil 4.27 Taşıma kapasitesine ulaşan K00 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri



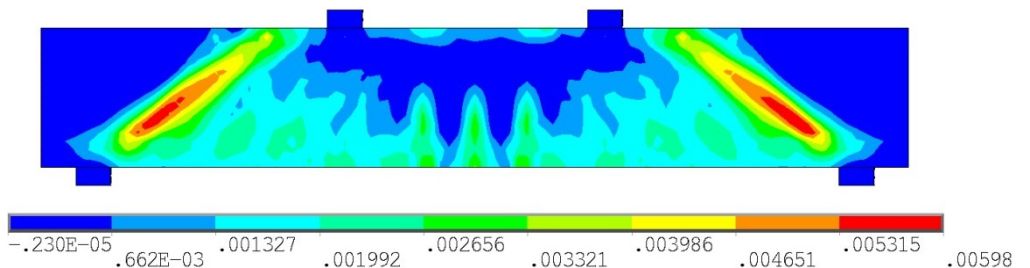
Şekil 4.28 Taşıma kapasitesine ulaşan K30 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri



Şekil 4.29 Taşıma kapasitesine ulaşan K45 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri

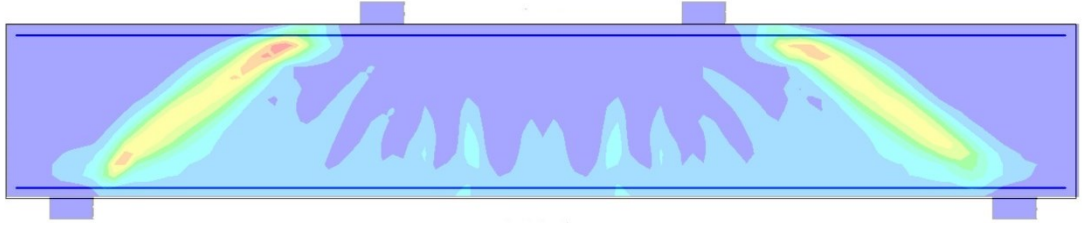


Şekil 4.30 Taşıma kapasitesine ulaşan K60 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri

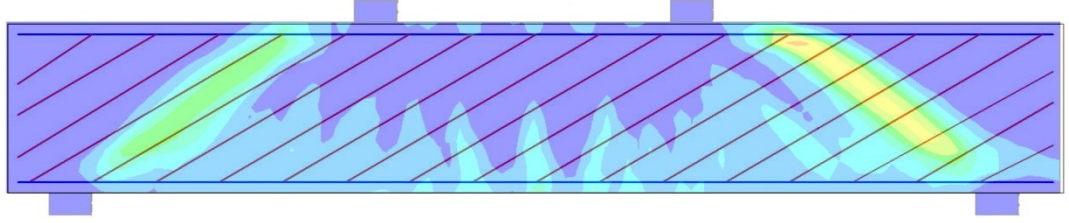


Şekil 4.31 Taşıma kapasitesine ulaşan K90 kirişinin asal birim şekil değiştirmeleri

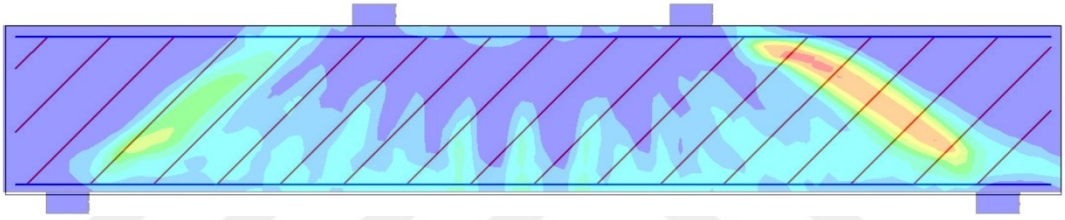




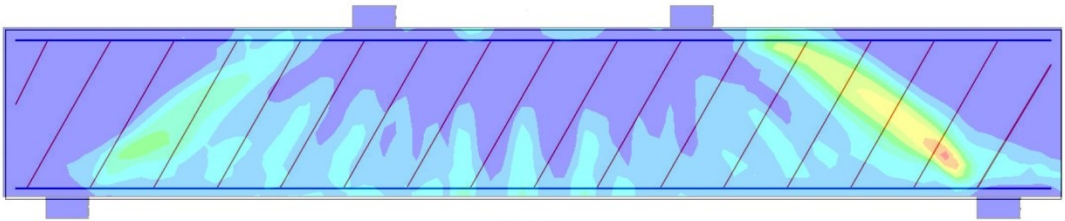
Şekil 4.32 K00 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları



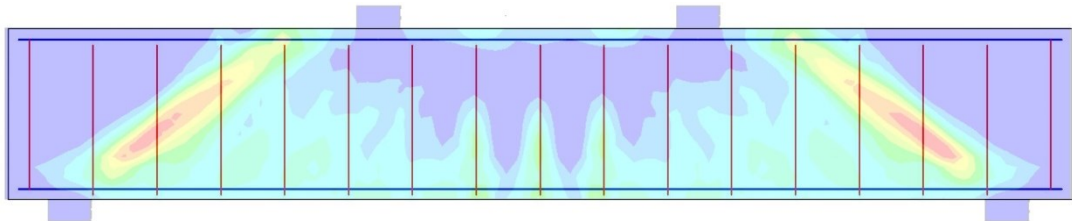
Şekil 4.33 K30 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları



Şekil 4.34 K45 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları



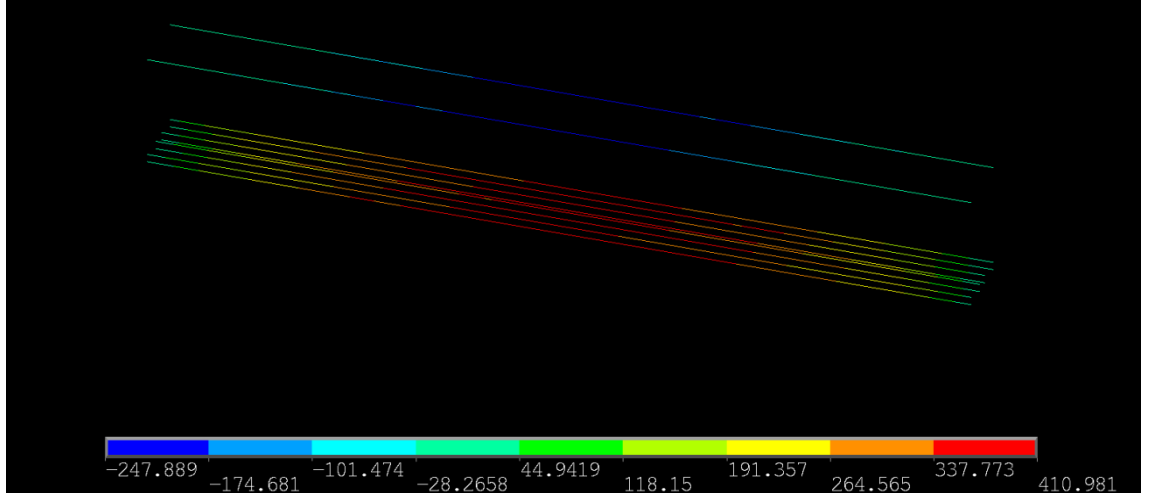
Şekil 4.35 K60 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları



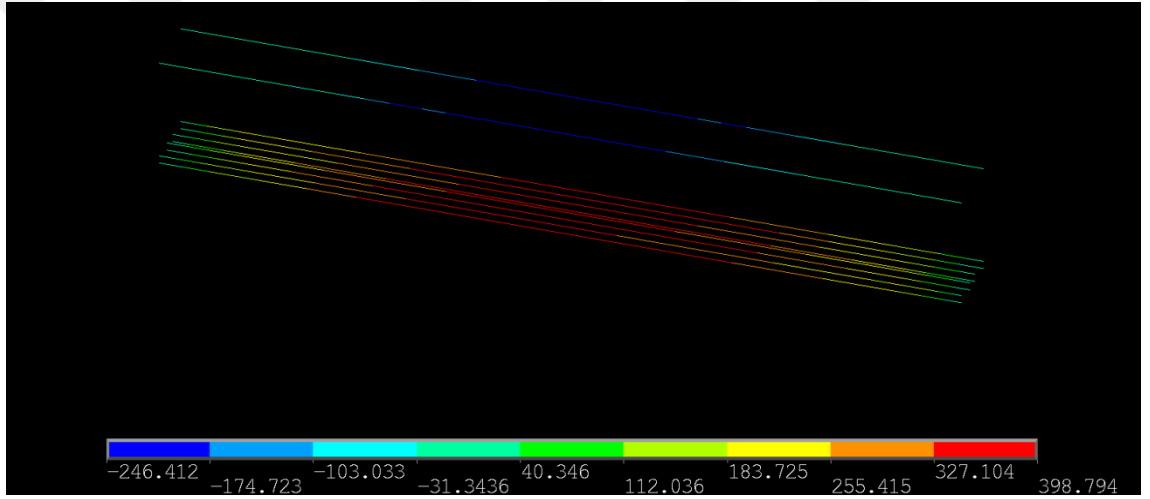
Şekil 4.36 K90 kirişinin asal gerilmeleri ve kesme donatıları

Genel kabullere uygun olarak, betonarme kirişlerdeki etriyelerin asal çekme gerilmeleri doğrultusunda yerleştirilmeleri taşıma gücü ve süneklik açısından yapısal başarıyı artıran en önemli etken olup ardından ise kenetlenme etkisi gelmektedir (Özkal, 2017).

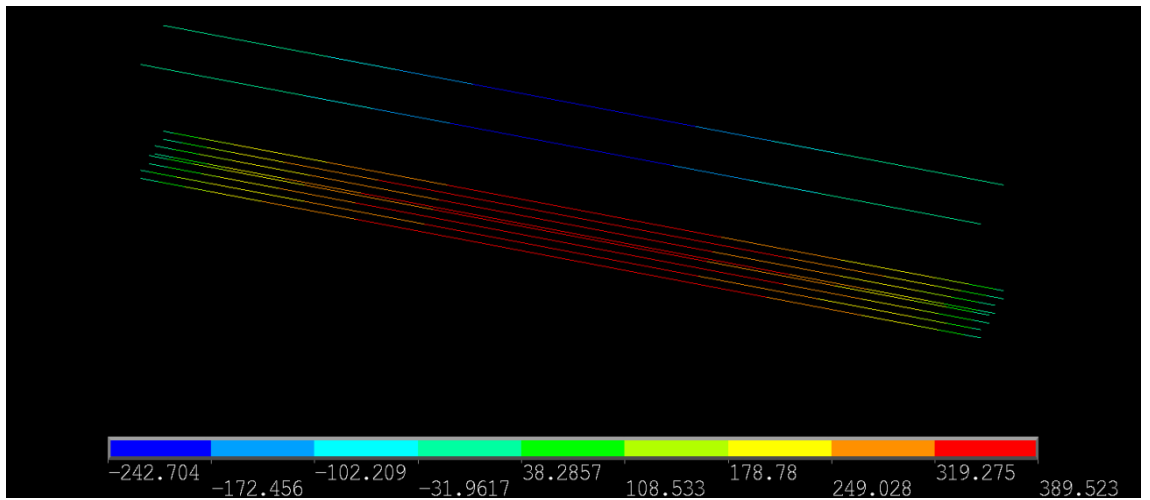




Şekil 4.39 K45 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.40 K60 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı (MPa)



Şekil 4.41 K90 kirişinin boyuna donatılarındaki gerilme dağılımı (MPa)

K00 kirişine kesme kuvvetine karşı donatı eklenmediğinden dolayı boyuna donatılar nispeten fazla gerilmeye maruz kalmadan, kiriş taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Boyuna donatılarda maksimum gerilme K30 kirişinde meydana gelmiştir.

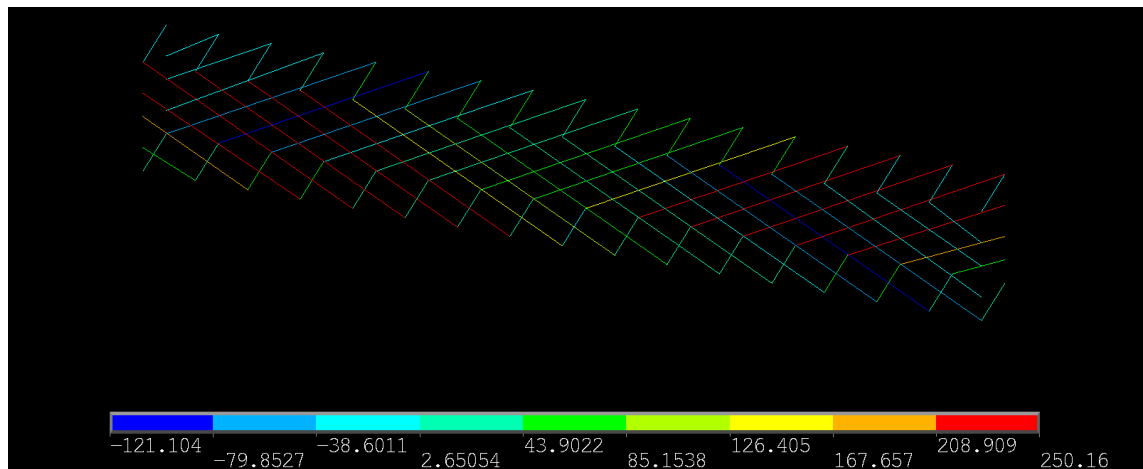
Boyuna donatıları incelediğimizde maksimum gerilmelere maruz kalan kısım beklenildiği üzere momentin maksimum olduğu kiriş orta noktasına denk gelmektedir.

**Tablo 4.8** Boyuna donatılarda maksimum gerilme değerleri ve akma durumları

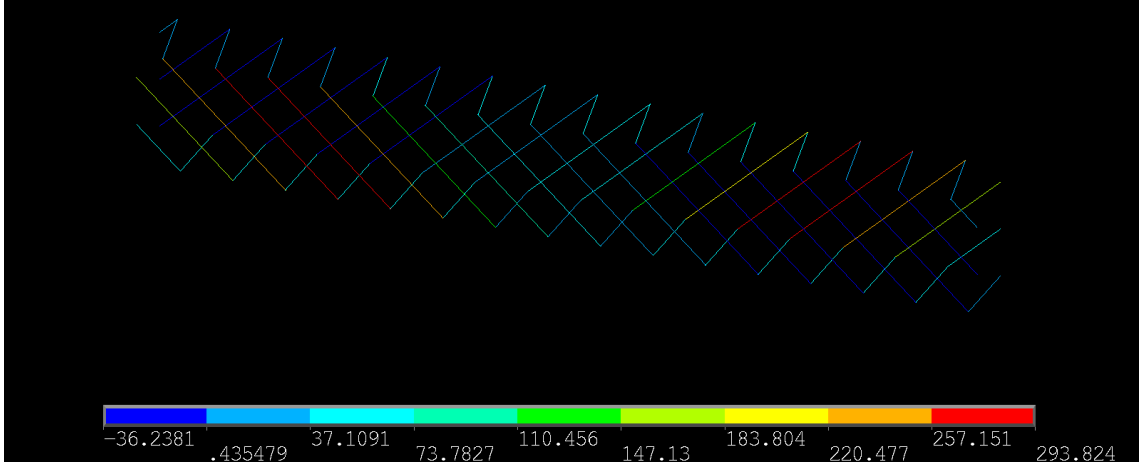
Kiriş No	Boyuna Donatılarda Gerilme (Mpa)	K00'a göre artış/azalış	Donatılarda Akma Durumu
K00	341,82	-	Akmamıştır
K30	413,41	20,9%	Akmamıştır
K45	410,98	20,2%	Akmamıştır
K60	398,79	16,7%	Akmamıştır
K90	389,52	14,0%	Akmamıştır

Boyuna donatının akma seviyesine ulaşmasıyla eğilme etkisi altında göçme gerçekleşmektedir. Ancak tasarımda da amaçladığımız gibi numuneler akma durumuna geçmeden kesme kırılması meydana gelmiştir.

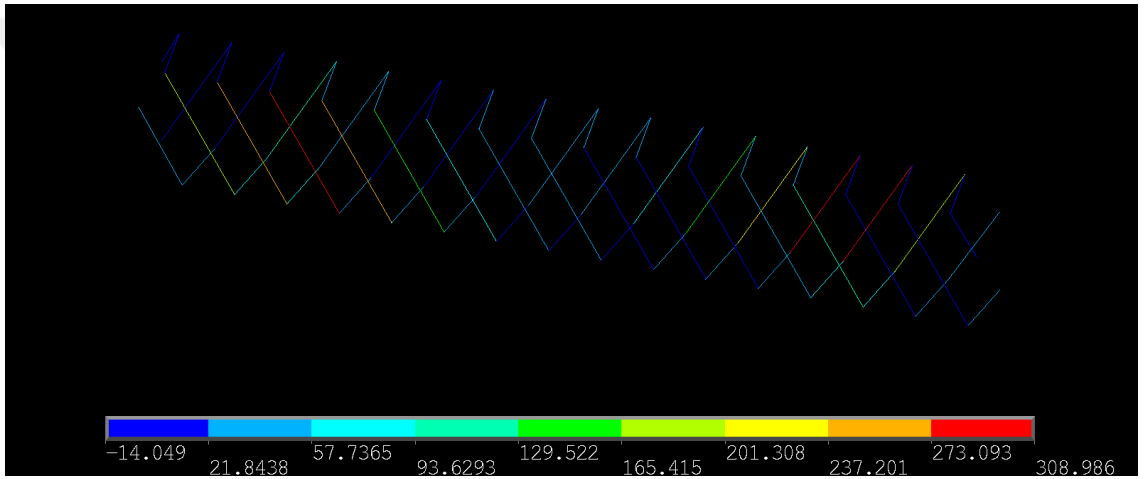
#### 4.7 Enine Donatılarda Gerilme Dağılımının Karşılaştırılması



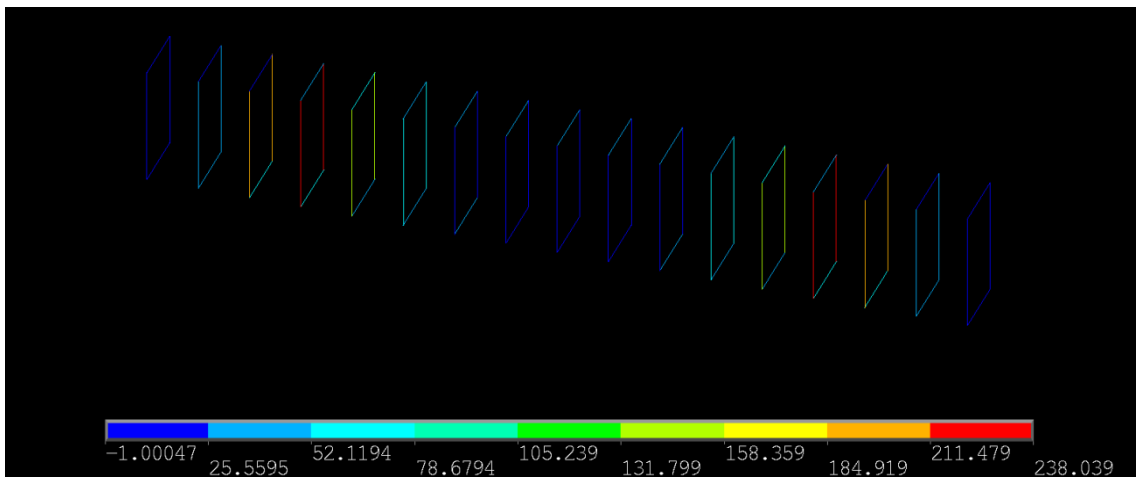
**Şekil 4.42** K30 kirişinin enine donatılarında gerilme (MPa)



Şekil 4.43 K45 kirişinin enine donatılarında gerilme (MPa)



Şekil 4.44 K60 kirişinin enine donatılarında gerilme (MPa)



Şekil 4.45 K90 kirişinin enine donatılarında gerilme (MPa)

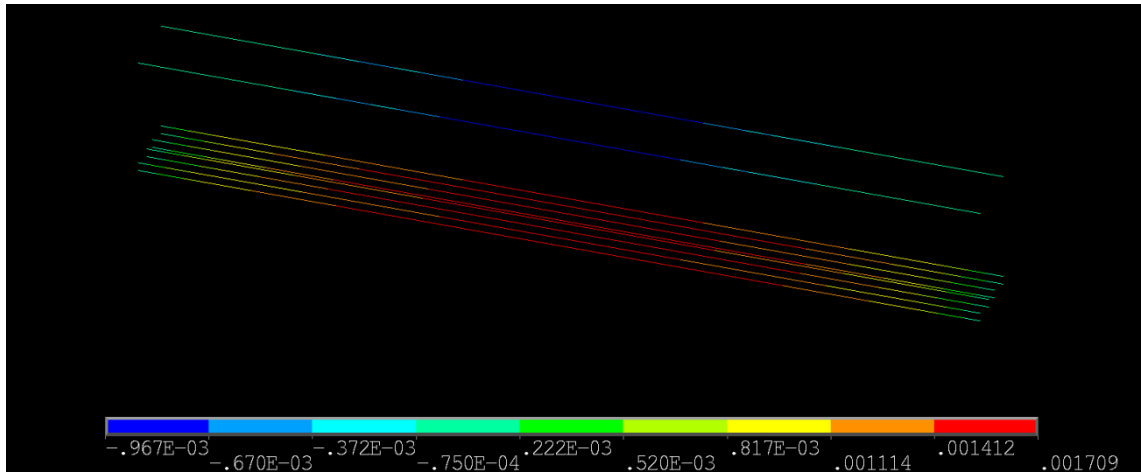
Enine donatılarda maksimum gerilme miktarları, donatıların eğik kesme çatlağına denk gelen kısımlarda meydana gelmiştir. Tablo 4.9'daki kirişlerin enine donatıları baz alındığında maksimum gerilme K60 kirişinde meydana gelmiştir.

**Tablo 4.9** Enine donatılarda maksimum gerilme değerleri

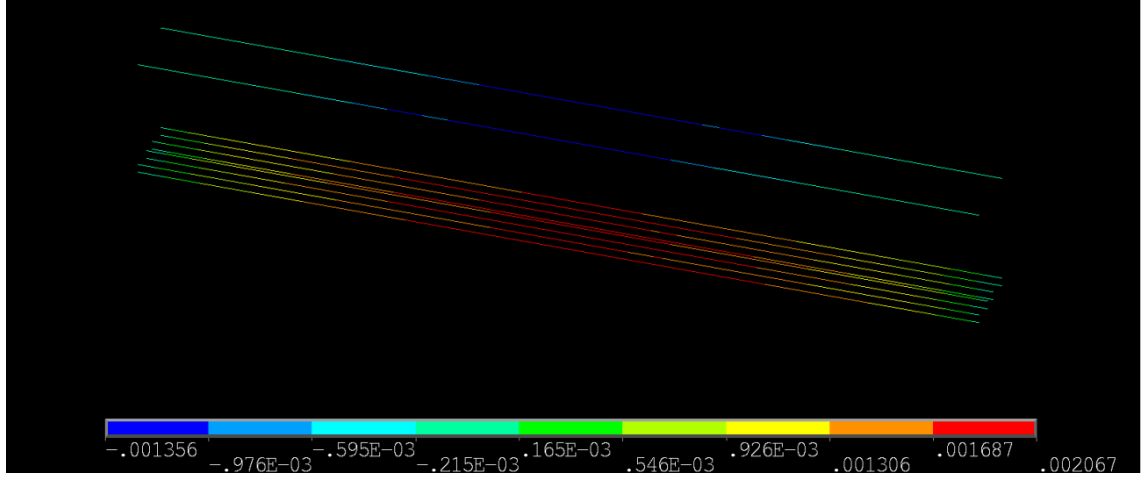
Kiriş No	Enine Donatılarda Gerilme (Mpa)
K00	-
K30	250,16
K45	293,82
K60	308,99
K90	238,04

K60 kirişinde enine donatıların konumlandırılması itibariyle çatlağa denk gelen etriye miktarı az olduğundan, donatıda meydana gelen gerilme diğer numunelere nispeten daha fazla çıkmıştır.

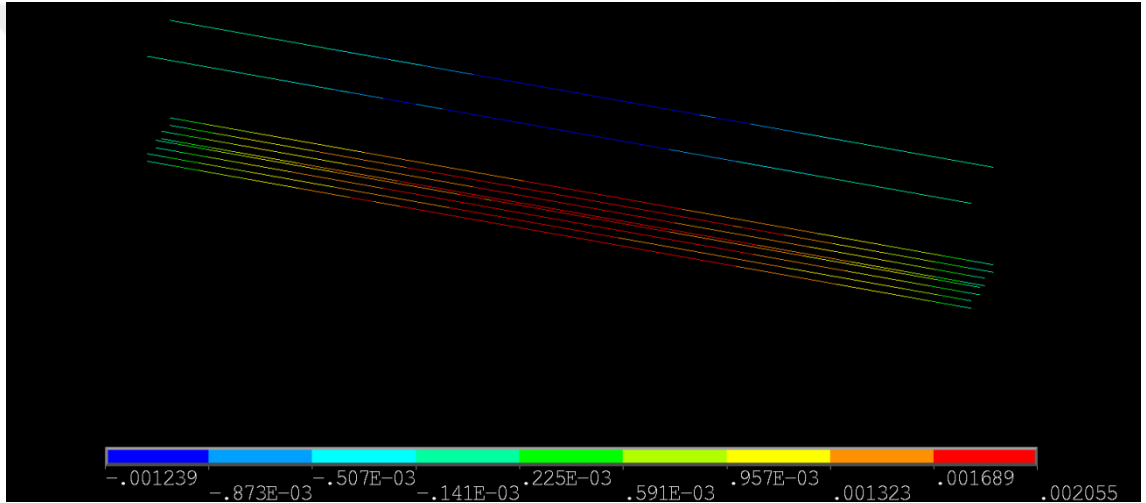
#### 4.8 Boyuna Donatılarda Birim Şekil Değişirmelerin Karşılaştırılması



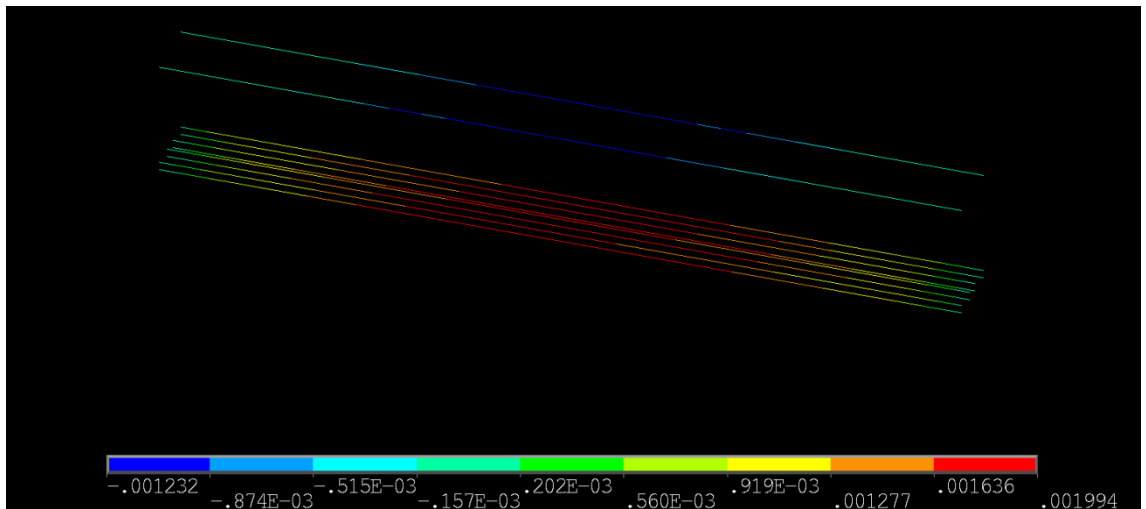
**Şekil 4.46** K00 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları



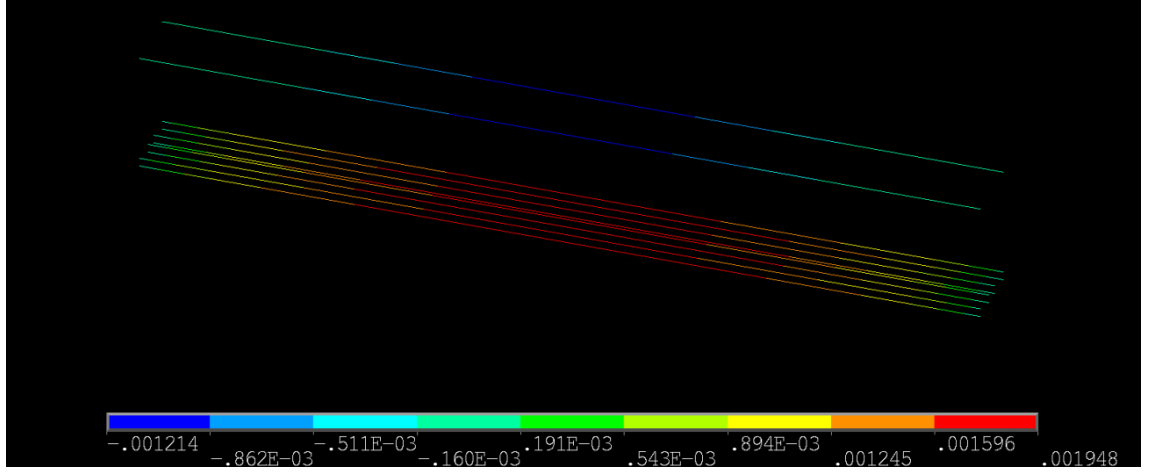
Şekil 4.47 K30 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları



Şekil 4.48 K45 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları



Şekil 4.49 K60 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları



**Şekil 4.50** K90 kirişinin boyuna donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları

Boyuna donatılardaki maksimum birim şekil değiştirme K30 kirişinde meydana gelmiştir. Maksimum gerilmeye K30 kirişinde rastlanıldığından dolayı birim şekil değiştirmenin de (Tablo 4.10) bu kirişte olması gayet doğaldır.

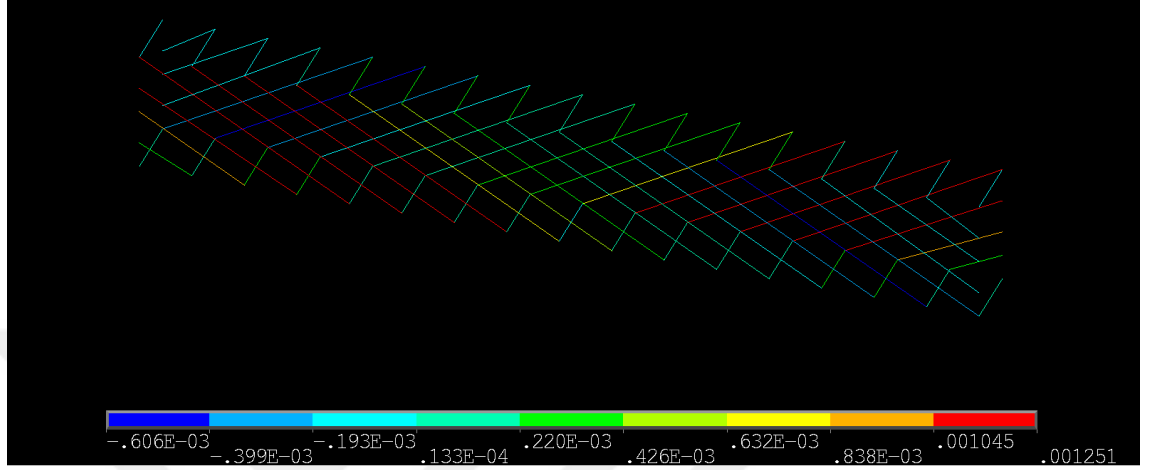
**Tablo 4.10** Boyuna donatılarda birim şekil değiştirme değerleri

Kiriş No	Boyuna Donatılarda Birim Şekil Değiştirme (%)	K00'a göre artış/azalış
K00	0,00171	-
K30	0,00207	20,9%
K45	0,00206	20,2%
K60	0,00199	16,7%
K90	0,00195	14,0%

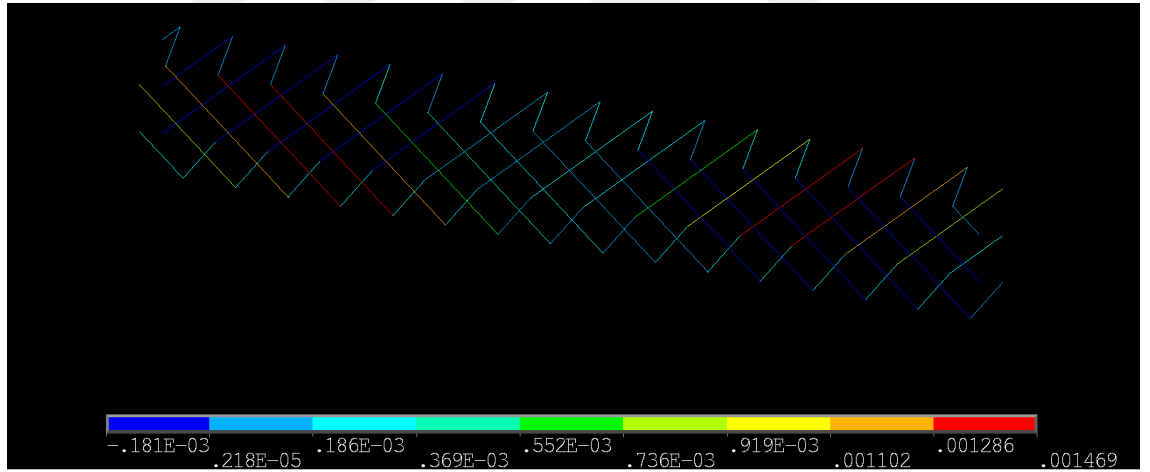


#### 4.9 Enine Donatılarda Birim Şekil Değişirmelerinin Karşılaştırılması

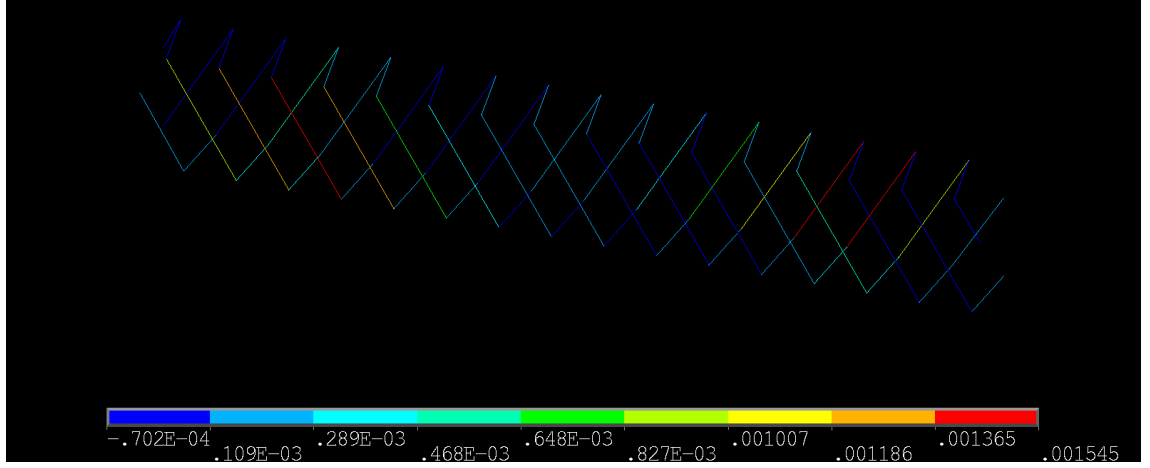
Enine donatılardaki maksimum birim şekil değişirme (Tablo 4.11) K60 kirişinde meydana gelmiştir.



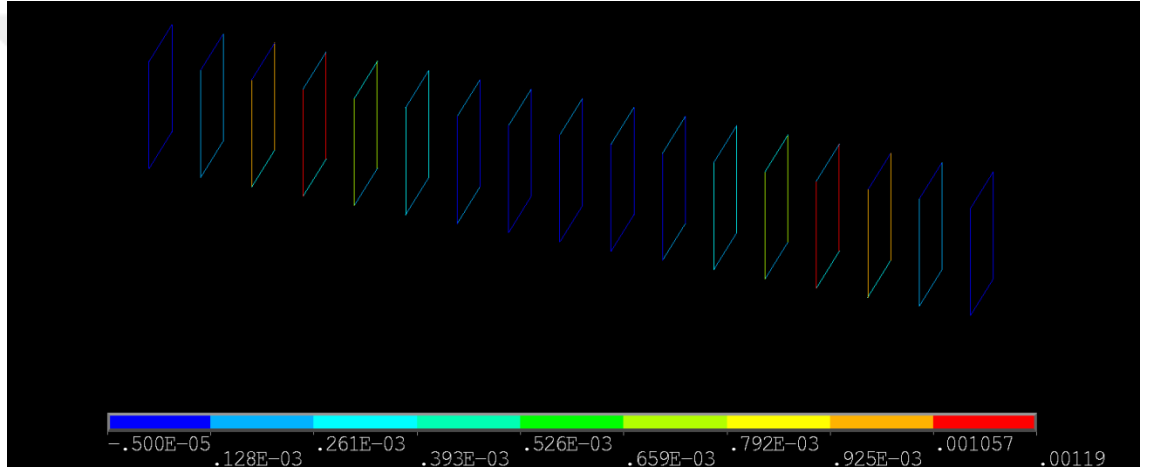
Şekil 4.51 K30 kirişinin enine donatılarında birim şekil değişirme dağılımları



Şekil 4.52 K45 kirişinin enine donatılarında birim şekil değişirme dağılımları



**Şekil 4.53** K60 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları



**Şekil 4.54** K90 kirişinin enine donatılarında birim şekil değiştirme dağılımları

Burada dikkat edilmesi gereken bir hususta enine donatılarda meydana gelen gerilme ve birim şekil değiştirmelerin, kirişin orta noktasına göre neredeyse simetrik olmasıdır. Yalnız kapalı dikdörtgen şeklindeki enine donatımızda kirişin arka ve ön yüzünde gerilmeler yaklaşık olarak aynı iken, helezonik şeklinde donatı yerleştirilen kirişlerde gerilme ve birim şekil değiştirmelerin maksimum olduğu kısım kirişin sol tarafında ön yüzünde meydana gelmiş ise, sağ tarafında arka yüzünde meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise enine donatıların buldukları yüzeyde asal gerilmelere dik olmalarıdır.

**Tablo 4.11** Enine donatılarda birim şekil değıştirme değeri

Kiriş No	Enine Donatılarda Birim Şekil Değıştirme (%)
K00	-
K30	0,00125
K45	0,00147
K60	0,00155
K90	0,00119

#### 4.10 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Numunelerin karşılaştırılabilmeleri için aynı yük değeri elde edilen; en büyük sehim değeri, şekil değıştirmiş eleman parçasının geometrisinden elde edilen eğrilik değeri, üst liflerin birim kısalmaları, alt liflerin birim uzamaları ve çatlak genişlikleri Tablo 4.12’de betonda ve donatılarda meydana gelen gerilme ve asal birim uzamalar Tablo 4.13’te verilmiştir.

**Tablo 4.12** 400 kN yük altında kiriş değeri

Kirişler	Sehim (mm)	Eğrilik (rad/mm)	Alt Lif Uzama (mm)	Üst Lif Kısalma (mm)	Çatlak Genişlikleri (mm)
K00	5,01	6,967	0,4572	0,2396	0,95
K30	4,58	6,778	0,4398	0,2380	0,81
K45	4,60	6,860	0,4484	0,2376	0,80
K60	4,67	6,916	0,4516	0,2400	0,80
K90	4,70	7,001	0,4584	0,2417	0,71

**Tablo 4.13** 400 kN yükte beton ve donatıların gerilme ve asal birim uzama değerleri

<b>Kirişler</b>	<b>Boyuna Donatıda Maks. Gerilme (MPa)</b>	<b>Enine Donatıda Maks. Gerilme (MPa)</b>	<b>Betonda Maks. Birim Uzama <math>\epsilon_1</math>(%)</b>	<b>Betonda Maks. Birim Kısalma <math>\epsilon_3</math>(%)</b>	<b>Betonda Maks. Çekme Gerilmesi <math>\sigma_1</math> (MPa)</b>	<b>Betonda Maks. Basınç Gerilmesi <math>\sigma_3</math> (MPa)</b>
K00	329,42	YOK	0,8788	-0,3628	3,05	-32,86
K30	332,80	204,44	0,9756	-0,4182	3,12	-36,81
K45	325,81	378,36	0,5365	-0,1777	2,98	-33,10
K60	327,21	252,51	0,5411	-0,1770	3,10	-33,14
K90	328,55	198,02	0,4863	-0,1840	2,65	-32,91

## 5. SONUÇ

ANSYS sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçların literatürdeki tasarım hesapları sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu da göstermektedir ki, ANSYS sonlu elemanlar programıyla yapılan modellemeler, deney elemanı tasarım aşamasında yapılabilecek tasarım hatalarının ve yanlış malzeme seçimlerinin önüne geçilmesi açısından hem maddi hem de zamandan tasarruf edilmesini sağlayacak, yapılacak olan deneysel çalışmalara yol gösterici olacaktır.

Maksimum yük taşıyan ve en büyük enerji tüketim kapasitesine sahip olan numune K30 kirişidir. Bu özelliğine, 45°'lik asal gerilmelerle en çok kesişen etriyeye sahip olmasının katkı sağladığı düşünülmektedir.

Çatlak görüntüleri incelendiğinde ezilme dağılımları (kırmızı işaretli sonlu elemanlar) K30, K45 ve K60 kirişlerinde simetrik yüklerin ortasında yoğunlaşırken diğer taraftan da asal gerilmeler doğrultusunda yüklerden mesnetlere doğru ilerlediği gözükmemektedir. Buradan bahsi geçen kirişlerin daha mukavim oldukları söylenebilir. K00 kirişinde ise ezilmeler yoğunlaşmadan 414,8 kN yükünde göçme meydana gelmiştir.

K90 numunesi göçme anındaki çatlak genişliği 0,8729 mm.'dir. Etriyesiz numune K00 ise göçme anında 1,0486 mm. genişliğine ulaşmıştır. Dolayısıyla çatlak genişliğinin az olması kirişin daha performanslı çalıştığını göstermez. Çünkü K90 kirişi 468,1 kN yükte, K00 ise 414,8 kN yükte göçmüştür.

Boyuna donatılardaki gerilme K30 kirişinde en yüksek değere ulaşırken beklenildiği üzere en çok yük taşıyan kirişte meydana gelmiştir. Fakat enine donatılardaki maksimum gerilme K60 kirişinde en yüksek değere ulaşmıştır. Buna sebep ise 45°'lik asal gerilmelere en az etriye denk gelen kirişin K60 kirişi olmasıdır. K30 kirişinde asal gerilmeye denk gelen etriye sayısı 5 iken K60 kirişinde bu sayı sadece 1'dir.

Kirişlerin hiçbirinde boyuna donatılarda akma meydana gelmemiştir. Boyuna donatılar akmadan göçme meydana geldiği için tasarlandığı üzere kesme kırılması meydana gelmiştir.

Göçme anındaki değerler karşılaştırıldığında kirişlerin; maksimum taşıdıkları yükler, en fazla yaptıkları sehim, maksimum taşıdıkları moment, sahip oldukları enerji tüketim kapasiteleri, boyuna donatılarındaki gerilme ve birim şekil değiştirmeler doğru orantılıdır.

Etriyelerin yatayla yaptığı açı azaldıkça taşıma kapasitesi ve enerji tüketimi kapasitesi artmaktadır. Bunun asıl nedeni ise kesme kuvvetine maruz kalan kirişte ortaya çıkan asal çekme gerilmelerinin oluşturacağı eğik çatlığa denk gelen enine donatıların sayısının fazlalığıdır.

Simetrik yüklenen kirişlerde asal gerilmeler de neredeyse simetrik olarak meydana gelir. Fakat helezonik olarak konumlandırığımız enine donatılar sistemde simetrik değildir. Enine donatılar simetrik olmadığından dolayı yüke maruz kalan kirişte meydana iç kuvvetleri simetrik olarak karşılayamamıştır. Şekil 4.44’de görüldüğü gibi kirişin ön yüzünde 273 MPa’ın üzerinde iki etriye varken arka yüzünde sadece bir etriye var. Yani etriyeler, asal gerilmeye ön yüzde sağ tarafta dik kalabilirken arka yüzde sol tarafta dik kalabiliyor. Bu sebeple yatayla 30° açılı kapalı etriyeleri kiriş orta noktasına göre simetrik şekilde konumlandırmak kiriş başarımını daha da arttıracaktır.

Helezonik enine donatılar uygulama kolaylığı bakımından her ne kadar dezavantajlıysa da, yapısal davranış başarımı bakımından avantajlıdır. Önem derecesi yüksek yapıların elemanlarında, enerji tüketimi ve yük kapasitesine ekstra ihtiyaç olması durumunda tercih edilmesi yapı davranış başarımını arttıracaktır.

## KAYNAKLAR

- ABS, (2006) “Rules for Building and Classing Steel Vessels”, *American Bureau of Shipping*, Texas.
- Ali, H. K. (2017) “Nonlinear Three Dimension Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Hollow Beams”, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep.
- ANSYS Inc., “Ansys 5.6 User’s Manual”,  
<http://research.me.udel.edu/~lwang/teaching/MEx81/ansys56manual.pdf>,  
Son Erişim Tarihi: 21.07.2019
- ASCE-ACI 426, (1973) “The Shear Strength of Reinforced Concrete Members”,  
*Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 99(ST6); 1091-1187.
- Arslan, G. (2004), “Yalnız Çekme Donatılı Betonarme Kirişte Sonlu Eleman Boyutunun Yük Taşıma Kapasitesi Tahminine Etkisinin Drucker-Prager ve Çatlak Modelleri ile Karşılaştırılması”, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2004/3.
- Arslan, G. (2005) “Tersinir Yükler Altında Betonarme Çubukların Kesme mukavemeti”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ashour, S. A. (2000) “Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams”, *Engineering Structures*, 22(5), 413-423.
- Aydemir, C. (2004) “Simetrik Donatılı Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Pekleşmeli Eğilme Momenti Kapasitelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Cihanlı, E. ve Arslan, G. (2009) “Yüksek Beton Dayanımlı Sargısız Betonarme Kiriş Kesitlerinde Eğrilik Sünekliliği”, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 27, 139-150.
- Cihanlı, E. (2009) “Yüksek Mukavemetli Beton Kirişlerin Eğilme Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- DBYBHY, (2007) “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, *T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi*, Ankara.
- Demir, C. “Makine Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi”,  
[http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu\\_elemanlar.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf),  
Son Erişim Tarihi: 21.04.2019

- Demirer, A. E. (2011) “Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Plastik Çözümlenmeleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Doğangün, A., (2010) Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 475-487.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001) “Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap”, 6. baskı, *Evrım Yayınevi*, İstanbul, 978-975-503-233-7, 90-91, 31-37, 58-73, 459-477.
- Garip, E. (2011) “Enine donatısız betonarme kirişlerin kesme mukavemeti”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Güler, M. S. ve Şen, S. (2015) “Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler”, *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1) 64-65.
- Hacısalıhoğlu, M. (2010) “Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Plastik Çözümlenmeleri”, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Hamil, S. J., Baglin, P. S. and Scott, R. H., (2000) “Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Beam- Column Connections”, *Proceedings of the American Concrete Institute (Structural Journal)*, 97(1), 886-894.
- Ho, J. C. M., Kwan, A. K. H. and Pam, H. J. (2003) “Theoretical Analysis of Post-Peak Flexural Behaviour of Normal and High Strength Concrete Beams” , *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12, 109-125.
- İnşaport. “Moment-Eğrilik İlişkisi”, <https://www.insaport.com/makale/yuksel-kaya/etkin-kesit-rijitligi-nedir-hangi-durumlarda-kullanacagiz>, Son erişim tarihi: 15.08.2019.
- Kotsovos, M. D., (1984) “Behavior of reinforced concrete beams with a shear span to depth ratio between 1.0 and 2.5”, *ACI Structural Journal*, 81(3), 279-286.
- Kani, G. N. J. (1964) “The riddle of shear failure and its solution”, *ACI Structural Journal*, 61(4), 441-468.
- Kaplan, H. ve Şenel, Ş.M. (2002) “Değişik Donatı Taşıyan Denge Altı Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışının Tersinir Yükleme Altında İncelenmesi”, Proje No: INTAG-564.
- Kazaz, İ. (2012) “Betonarme Perde Duvarların Sonlu Eleman Analizinde Aderans Kaymasının Uygulanması”, Pamukkale Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3),155-163.
- Kıracı, S. ve Erdem, R. T. (2010) “Betonarme Bir Elemanda Eğrilik Sünekliğinin İncelenmesi”, Celal Bayar Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 141-154.



- Ko, M. Y., Kim, S. W. and Kim, J. K. (2001) “Experimental Study on the Plastic Rotation Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams”, *Materials and Structures*, 34(6), 302-311.
- Lundgren, K., Gustavson, R. and Manusson, J. (2002) “Finite Element Modelling as tool to Understand the Bond Mechanisms”, *Proceedings Bond in Concrete - from research to standards*, Budapeşte.
- Mohsen, M. A., Abbas, A. M. and Saadon, A. S. (2016) “Effect of Loading Level and Span Length on Critical Buckling Load”, University of Basrah, *Basrah Journal for Engineering Sciences*, 16(1), 16.
- Orbay, A. (2005) Betonarme 1, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Özkal, F. M. (2017) “Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi”, *20. Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, 551-561.
- Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M. ve Uyan, M. (1999) Her Yönüyle Beton, *THBB Yayını*, İstanbul.
- Özmen, B. H., İnel, M. ve Bilgin, H. (2007) “Sargılı Beton Davranışının Betonarme Eleman ve Sistem Davranışına Etkisi”, Gazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2, 375-383.
- Sertkaya M. S. (2017) “Betonarme ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kesme Kapasitelerinin Tahminine Yönelik Bir Araştırma”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Taşdemir, T. E. “Analiz Mühendisinin El Kitabı”,  
<https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/emea/docs/analyzer-ebook-13-06-dB.PDF>,  
Son Erişim Tarihi: 31.07.2019
- Topçu, A. “Betonarme 1-2”,  
[http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme\\_1\\_2.pdf](http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme_1_2.pdf),  
Son Erişim Tarihi: 21.04.2019.
- TS 500, (2000) “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40)”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Wasti, T. (1990) “Sonlu Eleman Yönteminin Betonarme Elemanlarına Uygulanması”, *İMO Teknik Dergi*, 199-208.

## ÖZGEÇMİŞ

İslam Enes KAHRAMAN, 1989 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Sivas'ta tamamladı. 2009 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2016 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

