

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONARME KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMİNİN SAYISAL BENZETİM İLE
İNCELENMESİ

Alperen Taha DEMİRBAĞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Ocak, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMİNİN SAYISAL BENZETİM İLE
İNCELENMESİ**

Alperen Taha DEMİRBAĞ tarafından hazırlanan tez çalışması çalışması 20.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Ahmet Anıl DİNDAR

Gebze Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Betonarme Kiriş-Kolon Birleşiminin Sayısal Benzetim İle İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Alperen Taha DEMİRBAĞ

İmza



Aileme
ve
arkadaşılarım

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Yüksek Lisans sürecim boyunca Akademik alandaki çalışmalarım ve birçok alanda fikir ve görüşlerini benimle paylaşan, tavsiye ve eleştirileriyle bana her zaman yön veren, Danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na, tezimin her aşamasında desteklerini benden esirgemeyen ve tezimi değerlendirerek önerilerde bulunan kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Yusuf AYVAZ'a ve tezimi titizlikle değerlendirerek önemli katkılarda bulunan tez jüri üyesi Sayın Dr. Öğr. Üye. Ahmet Anıl DİNDAR en içten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik sürecimde desteklerini gördüğüm, başta Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Ana Bilim Dalı hocalarım olmak üzere, tüm hocalarıma emekleri için teşekkür ederim.

Tez sürecim boyunca benimle bir abi-kardeş edasıyla çalışmalarını sürdüren, bilgisini ve tecrübesini paylaştıkça mutlu olan, sabrıyla ve çalışma azmi ile bana örnek olan Arş. Gör. Mehmet Ozan YILMAZ'a ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman olduğu gibi tez sürecimde de koşulsuz destekleriyle yanımda olan ve hayatın her alanında kendime örnek aldığım babam Prof. Dr. Zihni Demirbağ ile annem Prof. Dr. Birsal Canan Demirbağ'a ve hayattaki en büyük şanslarım canım ablam Belemir ve kardeşim Atahan'a destekleri için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Alperen Taha DEMİRBAĞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	VII
KISALTMA LİSTESİ	XI
ŞEKİL LİSTESİ	XII
TABLO LİSTESİ	XV
ÖZET	XVI
ABSTRACT	XVIII
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
2 GENEL BİLGİLER	5
2.1 Betonarmenin Mekanik Özellikleri	5
2.2 Kiriş-Kolon Birleşim Bölgeleri	6
3 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	11
3.1 Malzeme Modelleri	14
3.1.1 Plastisite ve Hasar Teorisi	15
3.1.2 Drucker Prager Başlık Teorisi.....	18
3.1.3 Mikro-Düzlem Plastisitesi ve Hasar Teorisi.....	19
3.1.4 Yerel Olmayan Düzenlemeler.....	22
3.1.5 William-Menetrey Teoremi.....	23
3.2 Mikrodüzlem Plastisitesi İçin Malzeme Modeline Ait Sonlu Eleman Formülasyonunun Türetilmesi.....	24
3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme.....	27
3.3.1 Problemin Tanımı	28

3.3.2	Problemin Geometrisinin Oluşturulması.....	29
3.3.3	Malzeme Özelliklerinin Oluşturulması	29
3.3.4	Temas Durumları ve Sınır Durumlarının Belirlenmesi	30
3.3.5	Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması	31
4	YAPILAN SAYISAL ÇALIşMALAR.....	32
4.1	Tekil Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesi Modelleri.....	32
4.1.1	Tekil Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesi Modellerinin Analiz Sonuçları	41
4.2	Portal Çerçeve Sistem Modelleri	45
4.2.1	Portal Çerçeve Sistem Modellerinin Analiz Sonuçları	50
5	SONUÇ ve ÖNERİLER.....	90
	KAYNAKÇA.....	93
	TEZDEN ÜRETİLMİş YAYINLAR.....	96

SİMGE LİSTESİ

σ_y	Akma gerilmesi
θ_y	Akmanın gerçekleştiği dönme değeri
f_c	Basınç altındaki akma yüzeyi
σ_v^c	Basınç başlığı ve Drucker-Prager yüzeyinin kesişiminin apsisi
β_c	Basınç hasar sabiti
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
R	Biçimsel ve hacimsel asal gerilmelerin birbirine oranı
ρ_{joint}	Birleşim bölgesi hacimsel donatı oranı
γ	Birleşim bölgesinin yatay elemanlar tarafından sargılanmasını dikkate alan kesme güvenliği katsayısı
$\{p^v\}$	Cisim kuvvetleri
r_w	Çatlak ağırlık katsayısı
f_t	Çekme altındaki akma yüzeyi
β_t	Çekme hasar sabiti
f_{yk}	Çeliğin karakteristik akma dayanımı
$[A], [B]$	Deplasman ve şekildeğiştirme arası türev matrisi
J_2	Deviatorik gerilme tensörünün 2. değismezi
α	Dilatasyon
ρ	Donatı oranı
f_1	Drucker-prager akma yüzeyi
E^e	Düğüm noktası yerel olmayan değeri
R_c	Eksenel basınç dayanımı
ε_e	Elastik şekildeğiştirme vektörü

E	Elastisite modülü
c	Etkileşim yarıçapı
σ_V^e	Etkili hacim gerilmesi
σ_D^e	Etkili sapma gerilmesi
η_m	Geliştirecek yerel değişken
I_1	Gerilme tensörünün 1. değişmez
\mathbf{R}^e	Gerilme ve yerel olmayan diferansiyel denklemlere ait artık ifade
γ_{t0}	Hasar başlangıcı için basınç altındaki eşdeğer şekildeğiştirme sınırı
γ_{c0}	Hasar başlangıcı için çekme altındaki eşdeğer şekildeğiştirme sınırı
$\{q\}$	Her bir nokta için yerdeğiştirme bilgisi içeren vektör
f_{ub}	İki eksendeki basınç dayanımı
R_b	İki eksenli basınç dayanımı
c_2	İki eksenli basınç ve tek eksenli basınç malzeme parametresi
c_3	İki eksenli basınç ve tek eksenli çekme malzeme parametresi
V_e	Kesme kuvveti
v_j	Kesme kuvveti sınır değeri [29-30]
A_{s1}	Kiriş-kolon düğüm noktasının bir tarafında, kirişin negatif momentini karşılamak için üste konulan çekme donatısının toplam alanı
A_{s2}	Kiriş-kolon düğüm noktasının A_{s1} 'e göre öbür tarafında, kirişin pozitif momentini karşılamak için alta konulan çekme donatısının toplam alanı
M_{kir}	Kirişte oluşan moment
V_{kol}	Kolondaki kesme kuvveti
M_{kol}	Kolonda oluşan moment
b_j	Kolon genişliği
h	Kolon gözönüne alınan deprem doğrultusundaki enkesit boyutu

F	Kuvvet
$\{f\}$	Kuvvet vektörü
Ω	Makro düzlemde çözüm alanı
m	Malzeme düzenleme parametresi
$[D]$	Malzeme matrisi
D	Malzeme pekleşme sabiti
R_t	Malzeme sabiti
d_c^{mic}	Mikro düzlemdeki basınç hasarı katsayısı
d_t^{mic}	Mikro düzlemdeki çekme hasarı katsayısı
w^{mic}	Mikro düzlemde her integrasyon noktası için ağırlık katsayısı
d^{mic}	Mikro düzlemdeki toplam hasar katsayısı
θ_s	Moment-dönme grafiğinin son noktasındaki dönme değeri
t_e	Normal gerilme vektörü
K	Pekleşmeyi kontrol eden parametredir
λ	Plastik çarpan
$\dot{\lambda}$	Plastik çarpanın zamana göre türevi
Q	Plastik potansiyel
ε_p	Plastik şekildeğiştirme vektörü
ν	Poisson oranı
K	Rijitlik
$[k]$	Rijitlik matrisi
τ_0	Sınır kayma gerilmesi
n_b	Sınır normal vektörü
R_θ	Süneklik oranı
$\{\varepsilon\}$	Şekildeğiştirmelerin vektörü
N	Şekil fonksiyonu

$[N]$	Şekil fonksiyon matrisi
f_{uc}	Tek eksenle basınç dayanımı
f_{ut}	Tek eksenle çekme dayanımı
R_t	Tek eksenli gerilmede akma dayanımı
U	Yerdeğiştirme
$\{u\}$	Yerdeğiştirme vektörü
$\bar{\eta}_m$	Yerel olmayan değer
$\{p^S\}$	Yüzey kuvvetleri



KISALTMA LİSTESİ

<i>ABYYHY</i>	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
<i>ACI</i>	American Concrete Institute
<i>BB</i>	Birleşim Bölgesi
<i>CEN</i>	Comite Europeen de Normalisation
<i>CI</i>	Kolon katsayısı [29]
<i>DBYBHY</i>	Deprem Bölgelerinde yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
<i>DY</i>	Deprem Yönetmeliği
<i>EE</i>	Dış merkezlik etkisi katsayısı [29]
<i>JT</i>	Birleşim tipi katsayısı [29]
<i>Kol</i>	Kolon
<i>Kir</i>	Kiriş
<i>NE</i>	Eksenel kuvvet etkisi katsayısı [29]
<i>SEY</i>	Sonlu Elemanlar Yöntemi
<i>SI</i>	Döşeme katsayısı [29]
<i>TBDY</i>	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
<i>WB</i>	(ANSYS) Workbench
<i>WB</i>	Geniş kiriş katsayısı [29]

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Beton ve Çelik Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramları	5
Şekil 2.2 Beton gerilme-şekildeğiştirme diyagramı	6
Şekil 2.3 Deprem etkisi altında tipik kiriş-kolon birleşim bölgesi davranışı ve kuvvet reaksiyonun kiriş-kolon birleşim bölgesi üzerinde idealize edilmesi [27]	7
Şekil 2.4 Birleşim bölgesinin ideal yüklemesi [27]	8
Şekil 2.5 Deprem doğrultusunda kiriş-kolon birleşim bölgesi kesme kuvveti [28] ...	9
Şekil 2.6 Öngörülen ve b) deneysel birleşim bölgesi kesme dayanımı ve ACI [30] tarafından önerilen kesme dayanımı [29]	10
Şekil 3.1 Seçilen araştırma yöntemi ve kullanılan metotlara ait diyagram	14
Şekil 3.2 Gerilme uzayında akma yüzeyinin gösterimi [31]	16
Şekil 3.3 Plastik akma kuralı [31]	17
Şekil 3.4 İzotropik Pekleşme [31]	18
Şekil 3.5 Kristalografik yüzey [34]	19
Şekil 3.6 Mikro-düzlem [34]	20
Şekil 3.7 Yerelleştirme görseli	23
Şekil 3.8 SEY ile yapılan modellemelerde izlenilecek adımlara ait diyagram	28
Şekil 3.9 Temas durumunun a) olmadığı, b) olduğu durum [35]	31
Şekil 4.1 Yatay kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi [21]	33
Şekil 4.2 E1 Numune geometrisi [21]	34
Şekil 4.3 CPT215 elamanı [36]	35
Şekil 4.4 ANSYS APDL Kodu	36
Şekil 4.5 Donatı ve betona ait solu elemanlar ağı	38
Şekil 4.6 Deneysel çalışma [21] ve mikro-düzlem ile birleştirmiş plastisite hasar modelinin kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	39
Şekil 4.7 E1 Numunesi üzerinde hasar dağılımı [21] ve 65 mm monotonik yükleme altında sayısal modelde toplam hasar dağılımı	40
Şekil 4.8 Kolon etriyeleri arası mesafenin artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri	43
Şekil 4.9 Boyuna donatıların çaplarının artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri	44
Şekil 4.10 Etriye çaplarının artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri	44

Şekil 4.12 Fiziki geometri, Ökten [40]	45
Şekil 4.13 Referans modeline ait sonlu elemanlar ağı.....	46
Şekil 4.14 Deneysel çalışma Ökten [40] ve mikro-düzlem ile birleştirilmiş plastisite hasar modelinin kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	46
Şekil 4.15 Sonlu eleman ağı duyarlılık grafiği	47
Şekil 4.16 Deneysel çalışma Ökten [40], çatlak haritası ve model hasar son durum	48
Şekil 4.17 APDL'de kullanılan kod	50
Şekil 4.18 Portal çerçeve sistem bölgeleri	50
Şekil 4.19 KOLGEN1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	52
Şekil 4.20 KOLGEN3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	53
Şekil 4.21 KOLGEN4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	55
Şekil 4.22 Kolon genişliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafikleri	56
Şekil 4.23 Kolon genişliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim	56
Şekil 4.24 KİRDER1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	58
Şekil 4.25 KİRDER3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	59
Şekil 4.26 KİRDER4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	61
Şekil 4.27 Kiriş derinliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği	61
Şekil 4.28 Kiriş derinliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim	62
Şekil 4.29 KİRGEN1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	63
Şekil 4.30 KİRGEN3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	65
Şekil 4.31 KİRGEN4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	66
Şekil 4.32 Kiriş genişliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği	67

Şekil 4.33 Kiriş derinliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücü değişimi.....	67
Şekil 4.34 KİRET1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	69
Şekil 4.35 KİRET3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	70
Şekil 4.36 Kiriş etriye adetlerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği.....	70
Şekil 4.37 KOLET1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	72
Şekil 4.38 KOLET3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	72
Şekil 4.39 Kolon etriye adetlerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği.....	73
Şekil 4.40 KİRETCAP2 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	74
Şekil 4.41 KİRETCAP3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	76
Şekil 4.42 Kiriş etriye çaplarının değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği.....	76
Şekil 4.43 KOLET CAP1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	78
Şekil 4.44 KOLET CAP3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	79
Şekil 4.45 KOLET CAP4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	81
Şekil 4.46 Kolon etriye çaplarının değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği.....	81
Şekil 4.47 Kolon etriye çaplarının artmasıyla süneklik ve taşıma gücü değişimi.....	82
Şekil 4.48 N1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	83
Şekil 4.49 N3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	85
Şekil 4.50 N4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler	86
Şekil 4.51 Sabit yüklerin değiştirilmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği	87
Şekil 4.52 Sabit yüklemenin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim	8

TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Donatı çeliği için doğrusal elastik ve bilineer izotropik sertleşme malzeme parametreleri	36
Tablo 4.2 Beton elemanlar için doğrusal elastisite ve mikro-düzlem drucker-prager cap yüzey parametreleri	36
Tablo 4.3 Beton elemanlar için mikro-düzlem hasar ve yerel olmayan değişkenleri	37
Tablo 4.4 Kullanılan model ve tasarım değerleri	411
Tablo 4.5 Akmanın gerçekleştiği moement ve yumuşamadan önce ve sonra buna karşılık gelen döneme değeri	42
Tablo 4.6 Modellere ait parametrik değerler ve kapasite ön değerlendirilme tablosu	48
Tablo 4.7 KOLGEN1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	51
Tablo 4.8 KOLGEN3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	52
Tablo 4.9 KOLGEN4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	54
Tablo 4.10 KİRDER1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	57
Tablo 4.11 KİRDER3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	58
Tablo 4.12 KİRDER4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	60
Tablo 4.13 KİRGEN1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	62
Tablo 4.14 KİRGEN3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	64
Tablo 4.15 KİRGEN4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	65
Tablo 4.16 KİRET1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	68
Tablo 4.17 KOLET1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	71
Tablo 4.18 KİRETCAP2 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	73
Tablo 4.19 KİRETCAP3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	75
Tablo 4.20 KOLETCAP1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	77
Tablo 4.21 KOLETCAP3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	78
Tablo 4.22 KOLETCAP4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	80
Tablo 4.23 N1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	82
Tablo 4.24 N3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	84
Tablo 4.25 N4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi	85
Tablo 4.26 Modellerin kapasite ve hasar değerlendirme tablosu	88

Betonarme Kiriş-Kolon Birleşiminin Sayısal Benzetim İle İncelenmesi

Alperen Taha DEMİRBAĞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Betonarme yapıların genel davranışı üzerinde etki potansiyeli yüksek olan kiriş-kolon birleşim bölgelerinin yapısal tasarımda yeri oldukça önemlidir. Birleşim bölgelerindeki gerilme durumunun karmaşıklığı ve deneysel gözlemin zor olması sebebiyle performans dayalı tasarımda, mafsallaşma oluşan kiriş-kolon birleşim bölgelerinin elastik eleman gibi davrandığını kabul edilmektedir. Bu tez kapsamında betonarme moment çerçevesinde kiriş-kolon birleşim bölgesinin tekil olarak ve portal çerçeve sistem içerisinde parametrik olarak sayısal analiz ile performansları değerlendirilmektedir. Bu anlamda literatürde deneysel çalışması yapılmış mevcut sistemlerin doğrusal olmayan malzeme ve geometri dikkate alınarak ANSYS Workbench programında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Malzeme modeli olarak pekleşme ve yumuşama bölgelerini de içeren mikro düzlem tabanlı bir yaklaşım dikkate alınmaktadır. Sayısal modelde boyuna donatılar ve etriye donatıları aksenel eleman, beton ise hacimsel eleman ile ayrıklaştırılmış olup donatı ve betonun tam bağlı olduğu düşünülmüştür.

Tsonos [21] çevrimsel yükleme altında gerçekleştirdiği dört farklı tekil kiriş-kolon birleşim düzeneklerinden biri olan E1 numunesinin analizi yapılmıştır. Elde edilen

sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırıldığında gerçekçi bir yük-yerdeğiştirme davranışı sergilendiği ve plastik gerilme-hasar davranışının makul şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu model üzerinden 9 farklı model üretilerek parametrik bir çalışma yapılmıştır. Ökten [40] yapmış olduğu dolgu duvar davranışları üzerindeki deneysel çalışmalarından dolgu duvarsız portal çerçeveye ait sistem seçilmiştir. Bu sistemin sayısal modeli kurularak yük-yerdeğiştirme davranışı, portal ereve sistem için de elde edilmiş ve doğruluğunun kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Bu model üzerinden 22 farklı model üretilerek parametrik bir çalışma daha yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda dikkate alınan parametrik değişimlerin tümünde plastik mafsal oluşumları, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu, süneklikleri, taşıma kapasitelerinde anlamlı olarak değişimler gözlemlenmiştir. Özellikle, kolondaki donatı oranının, kolon boyutunun veya donatı çapının değişiminden dolayı artması sistem sünekliğini azalttığı görülmüştür. Boyuna donatı oranlarının kesitte olması gerekenden fazla olması durumuna, kat döşemesi seviyesindeki kolonların boyuna donatı bindirme bölgelerinde rastlanmaktadır. TDBY-2018 bu bindirme bölgelerinin kolon ortasına taşınmış olması, sistemin snekliğini doğrudan etkilediği bu alışmada grlmştr.

Anahtar kelimeler: Betonarme, kolon-kiriş birleşim bölgesi, çerçeve sistem, sonlu elemanlar yöntemi, mikro-düzlem, dayanım, süneklik.

Investigation of Reinforced Concrete Beam-Column Joint Behaviour Through Numerical Simulation

Alperen Taha DEMİRBAĞ

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assoc. Dr. Serkan BEKİROĞLU

The beam-column joint that is a high potential impact on the general behaviour of reinforced concrete structures is so crucial on the structural design. It is assumed that due to the complexity of the stress situation and difficulty of experimental observation beam-column connection elastically behaves in the analysis of performance-based design. Within the scope of this thesis, performances of the beam-column joints of reinforced concrete frame are evaluating parametric and numerically as an individual beam-column joint and inside of portal reinforced concrete frame systems. In this sense, finite element analysis of existing systems whose experimental work have been done considering the nonlinear material and geometry in ANSYS Workbench program. At this analyses, microplane based approach, including even hardening and softening zones, as a material model are taken into consideration. In the numerical model, longitudinal reinforcement and transverse reinforcements are discretized by axial element and concrete by solid element, and it is considered that the reinforcements are fully bonded to concrete.

An analysis of a specimen called as “E1” of the four different individual singular beam-column specimens supposed to hysterical load, experimented by Tsonos [21], was performed. When the numerical results are compared with the experimental

results, it observed that there are acceptable load-displacement behaviour and a reasonable the plastic stress-damage behaviour. A parametric study was performed by producing nine different models based on the numerical model mentioned above. A portal frame, which is not filled with masonry wall chosen from Okten's experimental studies [40] is intended. The load-displacement behaviour of the is obtained establishing a numerical model of the unfilled portal frame, and its accuracy is seemed as reasonable An even parametric study was conducted by producing 22 different models based on the model.

As a result of these analyses, in all of the parametric variations; plastic hinge formations, damage formation in the joint region, ductility and ultimate strength were significantly changed. Specifically, as the ratio of reinforcement in the column increases due to the change in column size or reinforcement diameter; decrease in system ductility is observed. Longitudinal reinforcement ratio is higher than required in the cross-section if the longitudinal reinforcement of the columns is overlapped at the floor slab level. In the TDBY-2018, the fact that these reinforcement overlap zones were moved to the centre of the column was found that it directly affects the ductility of the system.

Keywords: Reinforced concrete, beam-column joint, frame, finite element method, microplane, strength, ductility.

1 GİRİŞ

Günümüzde her yıl artan nüfus miktarı ve paralelinde artış gösteren talepler her yıl milyonlarca yapı ihtiyacı doğurmaktadır. İnşaat sektörünün büyümesi ve gelişen teknolojiler sayesinde yapıların imalat süreleri kısalmış ve kullanım ömürleri ise uzamıştır. Kullanım süresi boyunca hizmet amacına, bulunduğu bölgenin özelliklerine ve birçok parametreye göre taşıyıcı sistemi seçilen yapılar; emniyet, ekonomi ve estetik açısından en uygun şekilde tasarlanmaya çalışılmaktadır.

Yapılar arasında en çok kullanılan “betonarmenin” kullanılmaya başlangıcı 1850’li yıllara dayanmaktadır. Hollandalı Modernist Mimar Hendrik Petrus BERLAGE, betonarmenin önemini 1922 yılında “Betonarme, malzeme alanında donatıdan sonraki önemli belki de en önemli, olan buluştur” şeklinde tanımlamıştır [1]. Günümüze ait sonuçlar, Mimar Berlage’in yaklaşık bir asır önce yapmış olduğu bu tanımı haklı çıkarmıştır. Birçok ülkede halen inşaa edilen yapıların çoğunluğunu betonarme yapılar oluşturmaktadır. Ülkemizde ise son on yıl içerisinde inşaa edilmiş yapıların yaklaşık %90’ını betonarme yapılar oluşturmaktadır [2].

Ülkemizde betonarme yapıların önemi üzerinde durulmasının en önemli sebeplerinden birisi ülkemizin de Alp-Himalaya deprem kuşağı içerisinde olması ve nüfusun %95’inin deprem açısından tehlikeli bölgelerde yer almasıdır [3]. Kayıtlara geçmiş çok ciddi depremlerle (Erzincan-1939, Tokat-1942, Kastamonu-1944, Bolu-1944, Çanakkale-1953, Muğla-1957, Bolu-1957, Balıkesir-1964, Bolu-1967, Kütahya-1970, Van-1976, İsmayılı-1981, Erzincan-1992, Adana-1998, Marmara-1999, Van-2011) yüzleştığımız için bu süreçler boyunca can ve mal kayıplarının önüne geçebilmek adına 1940’dan beri birçok deprem yönetmelikleri (1940-DY, 1944- DY, 1961-DY, 1961-DY, 1968-DY, 1975-ABYYHY, 1998-ABYYHY, 2007-DBYBHY, 2018-TBDY) uygulanmıştır [4] – [5]. Yapıların tasarımı hakkında sınırlamalar ve koşullar içeren bu yönetmeliklere bilgi kaynağı olan birçok akademik çalışma yapılmıştır. Günümüzde de betonarmenin davranışını daha iyi

anlamak ve geliştirebilmek adına birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmaya devam edilmektedir.

Çok katlı betonarme yapılara etkiyen dış yükler (deprem, rüzgar, kar) ve zati ağırlıklardan oluşan yükler kolon ve kirişler arasında birbirlerine aktarılmaktadır. Bu yüzden kiriş-kolon birleşim bölgeleri de yapı taşıyıcı sistemlerinin bir elamanıdır ve üç eksenli karma gerilme-şekildeğiştirme durumundadır. Son yıllarda yapılan deprem sonrası incelemelerde bina taşıyıcı sistemlerinin içinde bu birleşim bölgelerinin en hassas kısımlar olduğunu ve bu bölgede oluşan kopmalar ve geniş çatlakların gevrek kırılmalar oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu gevrek kırılmalar bina göçmesinde ön görülemez bir etki yaratmaktadır [6].

Kolon kiriş birleşim bölgesi performans dayalı tasarımda elastik bir eleman olarak kabul edilir. Dolayısıyla bu bölgedeki deformasyon ve enerji yutma kapasitesi ihmal edilmektedir. Bu kiriş-kolon birleşim bölgesindeki gerilme durumunun karmaşıklığı ve deneysel olarak gözleminin oldukça zor olması bu tür basitleştirmelere yol açmıştır.

1.1 Literatür Özeti

Betonarme kiriş-kolon birleşim bölgeleri üzerindeki deneysel ve sayısal çalışmalar yaygın olarak yapılmaktadır. Bu tez kapsamında betonarme sonlu elemanlar yöntemiyle modellemeler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Betonarme sistemin veya elemanların davranışını sayısal ortama gerçekçi yansıtabilmenin en önemli adımı olan malzeme modeli oluşumu ile ilgili literatür araştırması aşağıda sunulacaktır.

Feenstra ve Borst [7] akma kriteri olarak basınç gerilmeleri adına von Mises ve çekme gerilmeleri için ise Rankine'i birlikte, Feenstra ve Borst [8] ise Drucker-Prager ve Rankine kriterlerini birlikte kullanarak malzeme modeli oluşturmuşlardır. Jirasek ve Bazant [9] betona uygun akma yüzeyi fonksiyonu geliştirmiştir. Bu fonksiyonda kullanılan sabitler deney sonuçlarından alınmaktadır. Oluşturulan bu formda birçok akma yüzeyi geliştirilip kullanılmıştır. Ottosen [10] bu forma yeni bir malzeme sabiti eklemiş ve hesabını en küçük kareler yöntemi kullanarak yapmıştır. Bu değer dışbükey bir yüzey elde edebilmek adına 1'den

küçük bir değer almaktadır. Hsieh ve diğerleri [11] yeni bir akma yüzeyi önermiştir ve bu formda bilinmeyen değerleri dört adet deney sonucuna göre belirlemiştir. Birçok araştırmacı tarafından bu akma fonksiyonu kullanılmıştır. Imran [12] kullanılan bu fonksiyona yeni bir terim eklemiş ve plastik şekildeğiştirmeler adına kabuller yapmıştır. Betonda sargı etkisini de içeren yeni bir malzeme modeli oluşturmuştur.

Diğer taraftan Willam ve Warkne [13] üç parametrelilik akma yüzeyini tanımlamıştır. Tanımlanan bu akma yüzeyinde basınç gerilmeleri arttıkça akma yüzeyinin kesiti değişmekte ve böylece daha doğru sonuçlar alınmaktadır. Etse ve William [14], Mohr-Columb ve Rankine birleşimi ile oluşturulmuş ve deviatorik kesiti köşeli ve kırıklık bir akma yüzeyine sahip Hooke-Brown fonksiyonunun göçme ve yükleme yüzey fonksiyonlarını farklı ifade ederek Leon Modelini oluşturmuştur. William ve Menetrey [15] Hooke Brown modelinden yola çıkarak Leon Modelini (ELM) 3 parametrelilik sade bir hale dönüştürmüştür. Bu modelde üç eksenli eşit çekme gerilmesi durumu dışında düzgün değişen ve dışbükey bir yüzey oluşturmaktadır. Cervenka ve Papanikolau [16] kırılma ve plastisite esaslı üç boyutlu malzeme modeli geliştirmiştir. Bunlar dışında da birçok araştırmacı plastisite tabanlı malzeme modelleri oluşturmuşlardır. Oluşturdukları modelde çekme durumu için yayılı çatlak modelini kullanmışlardır. Bu konu ile ilgili geniş bir derleme Lale [17] de bulunabilir.

Bazant ve Oh [18] çeşitli yüzeylerdeki düzlemlerde mikro yüzeyler arasındaki tek eksenli ilişkilere dayanan kurallar tanımlamıştır. Bu yaklaşım, çok boyutlu tensörlerin vektörlerle yerdeğiştirmesiyle tahmin edilebilirken aynı zamanda bazı sayısal sorunları çözmeye de yardımcı olmaktadır. Ozbolt ve Eligehausen [19], çevrimsel bir yükleme altında betonarme kiriş-kolon birleşimler üzerinde yük-yerdeğiştirme davranışını yeniden üretebilmişlerdir. Ancak makul ölçüde gerçekçi sonuçlar verilmesine rağmen, mikro düzlem yaklaşımına dayanan yapısal modellerin, malzeme parametrelerinin sezgisel anlamları olmadığı ve karmaşık testler gerektirdiği için zor kalibre edilmektedir.

Kaliske ve Zreid [20], iyi bilinen Drucker-Prager akma yüzeyini temel alıp çekme ve basınç bölgelerinde deviatorik-volumetrik gerilmeler uzayında kapalı yüzeyler

elde edecek şekilde değişiklikler yapmıştır. Bunun bir sonucu olarak bu uzayda sürekli ve daima türevlenebilir bir akma fonksiyonu ortaya çıkmıştır. Yumuşama sırasında oluşan “lokalizasyon/yerelleşme” problemini çözmek için de yerel değişkenleri, yerel olmayan değişkenler ile değiştirmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında betonarme moment çerçevesinde kiriş-kolon birleşim bölgesinin tekil olarak ve portal çerçeve sistem içerisinde parametrik olarak sayısal analiz ile performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu anlamda literatürde deneysel çalışması yapılmış mevcut sistemlerin doğrusal olmayan sonlu elamanlar analizi ANSYS programı ile yapılacaktır. Sayısal analizlerde doğrusal olmayan malzeme ve geometri dikkate alınacaktır. Malzeme modeli olarak mikro düzlem tabanlı bir yaklaşım kullanılacak olup pekleşme ve yumuşama bölgeleride dikkate alınacaktır. Sayısal modelde boyuna donatılar ve etriye donatıları aksel eleman, beton ise hacimsel eleman ile ayrıklaştırılacak olup donatı ve betonun tam bağlı olduğu düşünülecektir. Mevcut deneysel modeller doğrulandıktan sonra parametrik olarak sayısal modeller kurularak sistemlerin plastik mafsallık, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu, süneklikleri, taşıma kapasiteleri karşılaştırılarak betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin davranışı irdelenecektir.

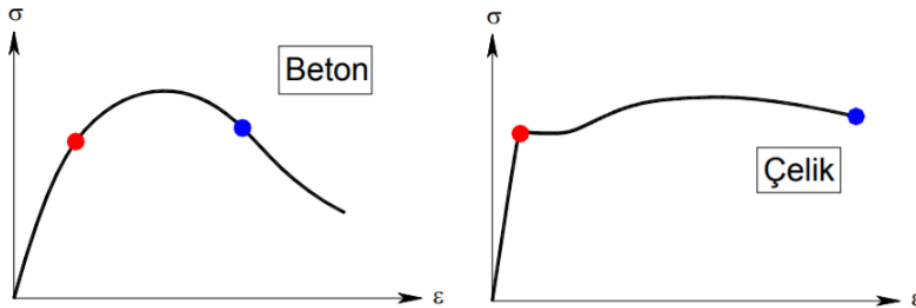
1.3 Hipotez

Yapılacak analizler sonucunda; plastik şekildeğiştirmeleri üzerinden plastik mafsallık oluşumları ve kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu ayrıca süneklikleri ve taşıma kapasiteleri açısından dikkate alınan parametrik durumların hepsine karşı anlamlı şekilde duyarlıdır.

2.1 Betonarmenin Mekanik Özellikleri

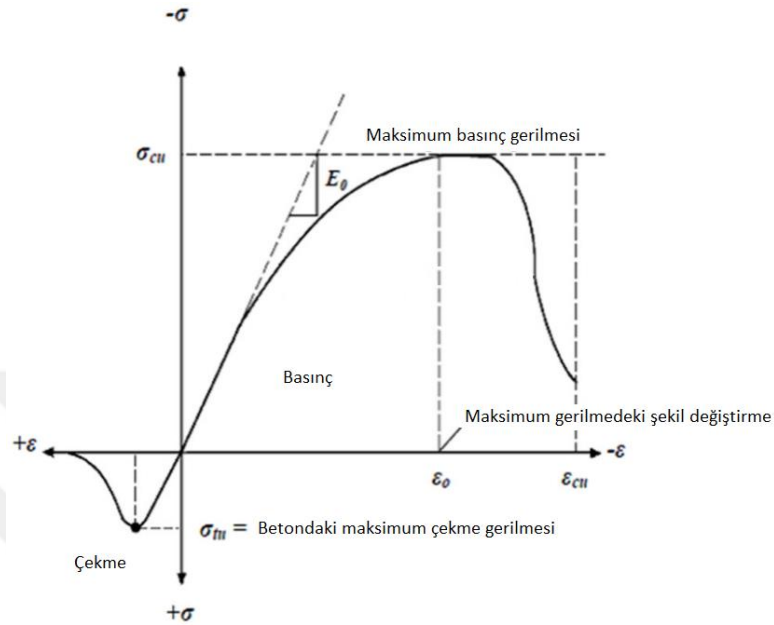
Gevrek olan beton, sünek olan çelik ile güçlendirilerek kompozit bir yapı malzemesi oluşturur. Beton ve çelik arasındaki sürtünme tam aderanslı kabul edilmektedir. Betonarmede basınç gerilmelerini beton karşılarken çelik ise çekme gerilmelerini karşılamaktadır. Ayrıca betonarme, boşluklu ve çatlaklı bir yapıya sahiptir.

Betonarme yapılarda deprem etkilerine karşı güvenlik temel üç madde ile aranmaktadır. Bunlar: Yeterli dayanım, yeterli süneklik, yeterli rijitliktir. Bu kapsamda, dayanımda belirgin bir azalma olmadan yerdeğiştirme yapabilme yeteneği olarak tanımlanan süneklik (düktilite) üzerinden betonarme yapılar ve elemanlar ayrıca incelenmiştir [22]. Sünek bir sistem oluşturmak için sünek sistem elemanları içeren bir sistem kurulmalıdır. Sünek sistem elemanlarını kullanmak doğrudur ancak bu durum kullanılan malzemeler arasında süneklik kıyası gerektirmektedir. Bu kıyas malzemelere ait gerilme-şekildeğiştirme diyagramı üzerinden yapılabilmektedir. Şekil 2.1'de gösterilen beton ve çeliğe ait gerilme-şekildeğiştirme diyagramı üzerinden hareket edilerek "Çelik yapılar sünektir" veya "Betonarme yapılar gevrekler" önermelerini yapmak doğru değildir [23]. Örneğin sargılı beton sünek davranış sergilemektedir. Bu yüzden süneklik hakkında değerlendirme yapılırken elemanın sistem içerisindeki davranışı esas alınır [24-25].



Şekil 2.1 Beton ve çelik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

Betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisini etkileyen birçok parametre mevcuttur. Bu yüzden kesin ve tek bir tane gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi tanımlamak imkânsızdır. Hem doğrusal hem de elastik olmayan bu grafik betona ait genel davranışı vermektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Beton gerilme-şekildeğiştirme diyagramı

Basınç bölgesindeki davranış doğrusal olmayan bölge mevcuttur. Elastik bölge aşıldır aşılmaz çatlaklar ve süreksizlikler oluşmaktadır. Betonarmenin basınç dayanımının yaklaşık %10'una denk gelen çekme dayanımı, basınç dayanımına göre oldukça düşüktür. Yapılan çalışmalarda aksenal çekme kuvvetiyle yapılan deneylerdeki numunelerde gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinin basınç eğrisine benzer şekilde doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğu gerilmeden sonra da yumuşama kısmında içerildiği görülmektedir. Beton hem çekme hem basınç altında yumuşama özelliği gösterebilmektedir.

2.2 Kiriş-Kolon Birleşim Bölgeleri

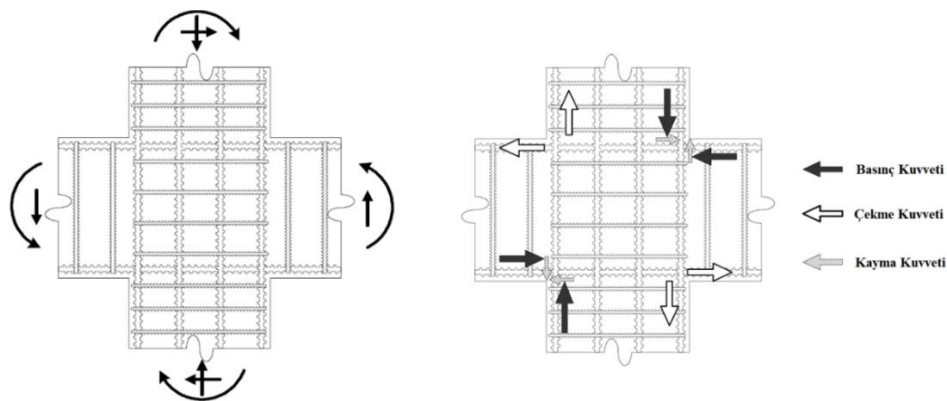
Kolon, kiriş ve bunların birleşim bölgelerinden oluşan betonarme taşıyıcı sistemlerin davranışının gerçekleşebilmesinin en önemli esaslarından birisi; betonarme malzemeye ait yeteneklerinden birisi olan yeniden dağılım özelliğidir. Bu özellik hem kesitte hem de sistem üzerinde görülmektedir. Kesitte bir bölgede akma gerçekleştiği zaman bu kesit yükü bir sonraki ve daha sonraki life

aktarmaktadır. Sistemde oluşan yeniden dağılımda ise bir çerçeve sistem üzerinde mafsallaşan elemanlar daha fazla yük alamadığı için üzerinde taşınması gereken momentleri diğer komşu elemanlara aktarmaktadır. Birim kısılmanın artmasıyla fazla zorlanan liflerin az zorlanan liflere gerilme aktarılmaktadır.

Herhangi bir dış yük altında betonarme sistemlerde kolonlarda moment kapasitesinin kirişlerdeki moment kapasitesinden önce aşılması istenmez (Denklem 2.1). M_{ra} ve $M_{r\ddot{u}}$ kolon alt ve üst, M_{ri} ve $M_{r\ddot{u}}$ kiriş uçlarında oluşan momentlerdir.

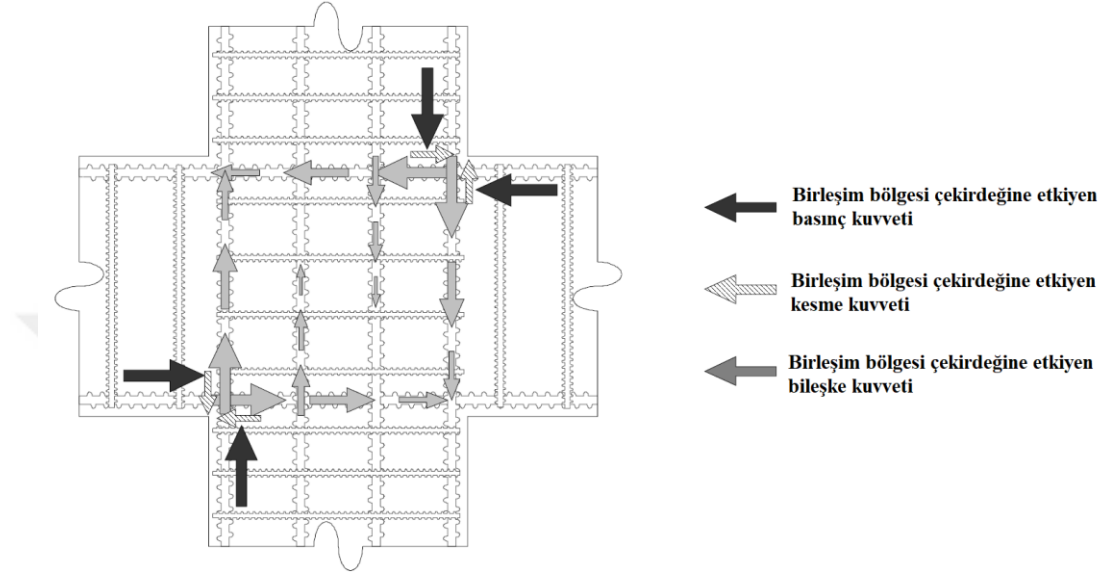
$$(M_{ra} + M_{r\ddot{u}}) \geq 1.2 (M_{ri} + M_{r\ddot{u}}) \quad (2.1)$$

Herhangi bir kolonda göçme meydana gelmesi tüm yapıyı doğrudan etkilerken, bir kirişte oluşacak göçme kısmi hasarla atlatılabilmektedir [26]. Bu yüzden güçlü kolon testleri yapılmaktadır. Kiriş uçlarında oluşması istenen momentlerin adım adım artmasıyla kirişler akma sınırına kadar ulaşır. Akma sınırında ve hala yük taşıyabilen kirişler artan momentlerle taşıma gücü sınırına geldiğinde artık bu noktada plastik mafsal oluşumu başlar. Momentlerin artmasıyla mafsallar döner ve gelen momentleri diğer uca aktarır. Plastik mafsal oluşumundan sonra kiriş, basit kiriş gibi davranır. Yeterli sayıda plastik mafsal oluşumundan sonra sistem göçme anına gelir. Birleşim bölgesinde kiriş ve kolon momentleri; donatı tarafından çekme kuvveti (Şekil 2.2, beyaz oklar), beton tarafından basınç kuvveti (Şekil 2.2, siyah oklar) aktarılarak taşınmaktadır. Böylece, kesme kuvvetleri birleşim bölgesinde beton basınç bloğu ve donatı çekme bloğu tarafından aktarılmaktadır (Şekil 2.2, gri oklar).



Şekil 2.3 Deprem etkisi altında tipik kiriş-kolon birleşim bölgesi davranışı ve kuvvet reaksiyonunun kiriş-kolon birleşim bölgesi üzerinde idealize edilmesi [27]

Kiriş-kolon birleşim bölgesi çekirdeğine etki eden yüklemelerin idealleştirilmiş hali Şekil 2.4’de verilmiştir. Basınç ve kesme kuvvetlerinin boyuna donatılar ve beton vasıtasıyla birleşim bölgesinin merkez bölgesine taşındığı varsayılmaktadır. Bu kabuller sayesinde birleşim bölgesinde gerçekleşecek tepkilerin ve oluşacak mekanizmanın tahmini yapılmaktadır.



Şekil 2.4 Birleşim bölgesinin ideal yüklemesi [27]

Kiriş-kolon birleşim bölgelerinin kapasitesi için yönetmelikler bazı sınırlandırmalar ve kabuller getirmiştir. Denklem 2.1 sayesinde sistemin göçmesi zorlaşmakta ve süneklik artmaktadır. TDBY-2018 [28] bu konuda sınırlandırma yaparken kirişleri kuşatılmış kiriş ve kuşatılmamış kiriş olarak iki sınıfta incelemiştir. Kirişlerin kolona dört taraftan birleştiği durum ve her kiriş genişliğinin birleştiği kolonun genişliğinden $\frac{3}{4}$ daha az olmaması halinde bu birleşim kuşatılmış birleşim olarak tanımlanacaktır. Aksi durumlar ise kuşatılmamış kiriş olacaktır. Bu kapsamda Denklem 2.2’de verilmiş olan formülle kesme kuvveti hesaplanacaktır.

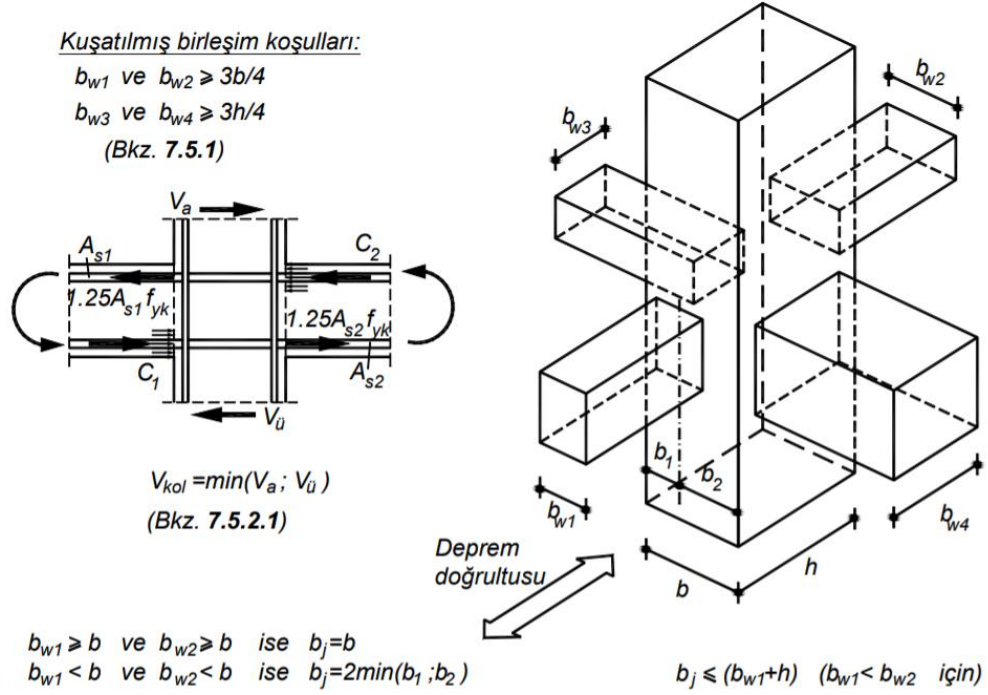
$$V_e \leq 1.25 * f_{yk} * (A_{s1} + A_{s2}) - V_{kol} \quad (2.2)$$

Hesaplanan kesme kuvveti kuşatılmış birleşimlerde Denklem 2.3’de, kuşatılmamış kirişlerde ise Denklem 2.4’e ait sınırlandırmaları aşmayacaktır. Bu sınırların aşıldığı durumlar için tasarım aşamasında kolon veya kiriş kesit boyutları büyütülerek deprem hesabının tekrar başlaması gerekmektedir.

$$V_e \leq 1.7 * b_j * h \sqrt{f_{ck}} \quad (2.3)$$

$$V_e \leq 1.0 * b_j * h \sqrt{f_{ck}} \quad (2.4)$$

Deprem doğrultusunda kuşatılmış kirişlerden oluşmuş kolon ve kesitlerde oluşan kesme ve moment yönleri Şekil 2.6'da ki gibidir. Burada b_w ile numaralandırılmış notasyonlar kiriş genişliklerini ifade ederken, b ve h kolon genişlik ve derinliğini ifade etmektedir.

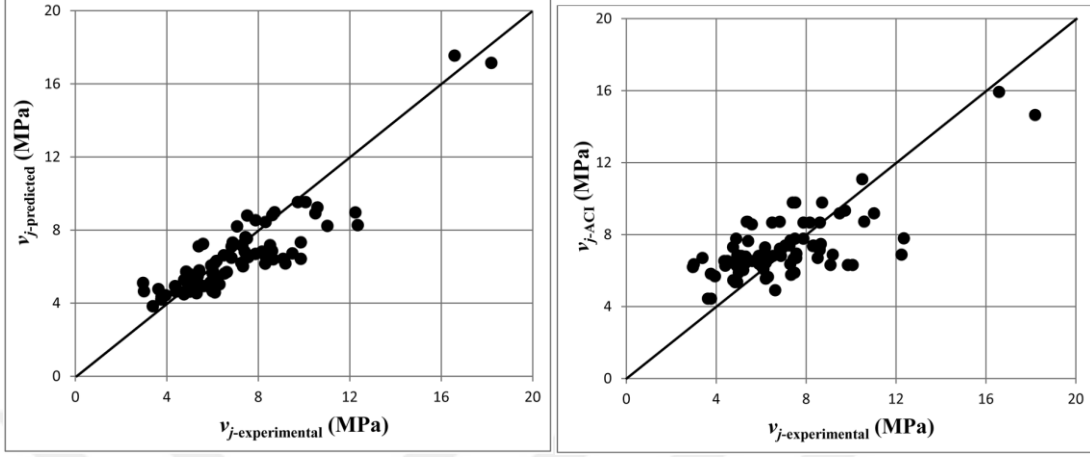


Şekil 2.5 Deprem doğrultusunda kiriş-kolon birleşim bölgesi kesme kuvveti [28]

Unal ve Burak [29] istatistiksel çalışmasında, bir dizi deneysel çalışma ile tespit edilmiş kiriş-kolon bölgesi kesme dayanımını ACI [30] tarafından verilen Denklem 2.5 ile karşılaştırmıştır. Bu denklemde ki v_j : Kesme kuvveti sınır değerini, γ : Birleşim bölgesinin yatay elemanlar tarafından sargılanmasını dikkate alan kesme güvenliği katsayısını temsil etmektedir. Karşılaştırma sonucunda ACI [30] kesme dayanımı bağıntısının yeterli emniyette sonuç vermediğini tespit edip, kiriş dış merkezliği, eksenel yük seviyesi gibi faktörleri de kapsayan Denklem 2.6 önerilmiştir. Bu denklemde verilen JT: Birleşim tipi katsayısı, EE: Dış merkezlik etkisi katsayısı, NE: Eksenel kuvvet etkisi katsayısı, CI: Kolon katsayısı, SI: Döşeme katsayısı, WB: Geniş kiriş katsayısını temsil etmektedir.

$$v_j - ACI(MPa) = 0.083 * \gamma * \sqrt{f_c'} \quad (2.5)$$

$$v_j(MPa) = JT * (f_c * f_y)^{\frac{1}{6}} * \rho_{joint} * EE * CI * NE * WB * SI \quad (2.6)$$



a)

b)

Şekil 2.6 a) Öngörülen ve b) deneysel birleşim bölgesi kesme dayanımı ve ACI [30] tarafından önerilen kesme dayanımı [29]

Deney sonuçlarında tahmin edilen hesaplara yakın değerler bulmuşlardır. Ancak ACI tarafından verilen Denklem 2.6 kullanıldığında sonuçlar çok daha geniş bir alana yayılmaktadır. Unal ve Burak [29] bu dağılımı çizgi üzerinde toplayarak Denklem 2.5'i iyileştirdiklerini göstermişlerdir. Bu durum Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Uzayda herhangi bir cisim üzerine etkiyen yükler (yüzey ya da cisim kuvvetleri) ve bu cismi sınırlayan koşullar, cisimde bir yerdeğiştirmiş durum oluşturur. Cisim üzerindeki rastgele iki noktanın yerdeğiştirmelerinin eşit olmaması halinde şekildeğiştirmeler ve gerilmeler oluşur.

Yapı mühendisliğinde sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, cisme etkiyen yükler ve sınır koşullarının oluşturduğu gerçek yerdeğiştirmelere, önerilen basit bir fonksiyon vasıtası ile yaklaşılmalarını sağlar. Örneğin, yerdeğiştirmelerin u vektörü ile ve bunların elastik bir bünyede oluşturacağı şekildeğiştirmelerin ε vektörü ile tanımlandığı durumda ikisi arasındaki ilişki A matrisi ile kurulur.

$$\{u\} = \{u \ v \ w\} \quad (3.1)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}\} \quad (3.2)$$

$$\{\varepsilon\} = [A]\{u\} \quad (3.3)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \partial/\partial_x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial_y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial_z \\ \partial/\partial_y & \partial/\partial_x & 0 \\ 0 & \partial/\partial_z & \partial/\partial_y \\ \partial/\partial_z & 0 & \partial/\partial_x \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Elastik bir malzeme için geçerli olan Hooke kanununa göre oluşan gerilmeler de,

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\} \quad (3.5)$$

ile tanımlanır. Bu aşamada gerilmelerin hesabı, malzemenin elastik davranmadığı durumlarda, ilgili probleme özel şekilde çözülebilir (plastisite teorisi gibi). Denklem 3.5 ile tanımlanan gerilmelerin, onları oluşturan şekildeğiştirmeler ile yaptığı işe şekildeğiştirme enerjisi, yüzey ve cisim kuvvetlerinin yerdeğiştirmesi ile yaptıkları işe ise dış kuvvetlerin işi denir. Bu tanıma göre toplam potansiyel enerji

$$\Pi = \int_V \frac{1}{2} \{\varepsilon^e\}^T \{\sigma\} dv - \int_V \{u\}^T \{P^V\} dV - \int_S \{u\}^T \{P^S\} dS \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sonlu elemanlar yönteminde yapılan çözümlemenin temel amacı, enerjinin korunumundan faydalanarak potansiyel enerjinin minimum değerini bulmaktır. Buna göre, cisim sonlu sayıda eleman ile ayrıklaştırılarak her bir nokta için yerdeğiştirme bilgisi q vektörü ve noktalar arasında kalan kısmın enterpolasyonu için N matrisi tanımlanmış olsun. Bu durum,

$$\{u\} = [N]\{q\} \quad (3.7)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & \dots \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

şeklinde tarif edilebilir. Şekildeğiştirmeler ile yer değiştirme bilgisi vektörü arasındaki ilişki de,

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \quad (3.9)$$

$$[B] = [A][N] = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ \dots] \quad (3.10)$$

halini alır. Denklem 3.7 ve Denklem 3.9, Denklem 3.6'da yerine konulduğunda

$$\Pi = \int_V \frac{1}{2} ([B]\{q\})^T [D]([B]\{q\}) dV - \int_V ([N]\{q\})^T \{p^V\} dV - \int_S ([N]\{q\})^T \{p^S\} dS \quad (3.11)$$

elde edilir. Toplam potansiyel enerjinin minimum değeri her bir yerdeğiştirme bilgisi için bulunmak istenildiğinde

$$\left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial q} \right\} = 0 \quad (3.12)$$

$$\int_V [B]^T [D][B] dV \{q\} - \int_V [N]^T \{p^V\} dV - \int_S [N]^T \{p^S\} dS = 0 \quad (3.13)$$

şeklinde ana denklem elde edilir. Burdan elde edilen denklem, cismin verilen koşullar altındaki yerdeğiştirmeleri ve dolayısıyla iç kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Denklem 3.13 genellikle matris formda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$[k]\{q\} = \{f\} \quad (3.14)$$

$$\{f\} = \left\{ \int_V [N]^T \{p^V\} dV + \int_V [N]^T \{p^S\} dS \right\} \quad (3.15)$$

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (3.16)$$

Burada k , rijitliği temsil etmektedir. Rijitliğin sabit kalıp değişmediği durumda sistem doğrusal davranmaktadır. Ancak genellikle mühendislik problemlerinde karşılaşılan durum doğrusal olmayandır. Doğrusal olmayan durumlar, geometrik doğrusal olmayan, malzeme doğrusal olmayan ve mesnet doğrusal olmayan durum olarak üçe ayrılmaktadır. Oluşan yerdeğiştirmelerin küçük şekildeğiştirmeler kabulunu aştığı ve yeni iç kuvvetlerin doğmasına sebep olması geometrik doğrusal olmayan durumdur. Uygulanan kuvvet sonrasında malzemenin gerilme-şekildeğiştirme arasındaki ilişki (bünye bağıntısı) doğrusallığı kaybederse malzemenin doğrusal olmayan durumu ortaya çıkar. Örneğin yorulma, betonun çekme altında çatlaması ve rijitliğini kaybetmesi ile ortaya çıkan doğrusal olmayan davranış veya basınç altında ezilmesi vb durumlar malzemenin doğrusal olmaması kapsamına girmektedir. Zamandan bağımsız doğrusal olmayan durumlara ise aderans, büzülme, sıcaklık değişimi örnek verilebilir. Uygulanan kuvvetler sonrasında mesnet davranışlarının değişimi veya ortaya çıkabilecek yeni mesnet durumları ise doğrusal olmayan mesnet durumunu oluşurmaktadır.

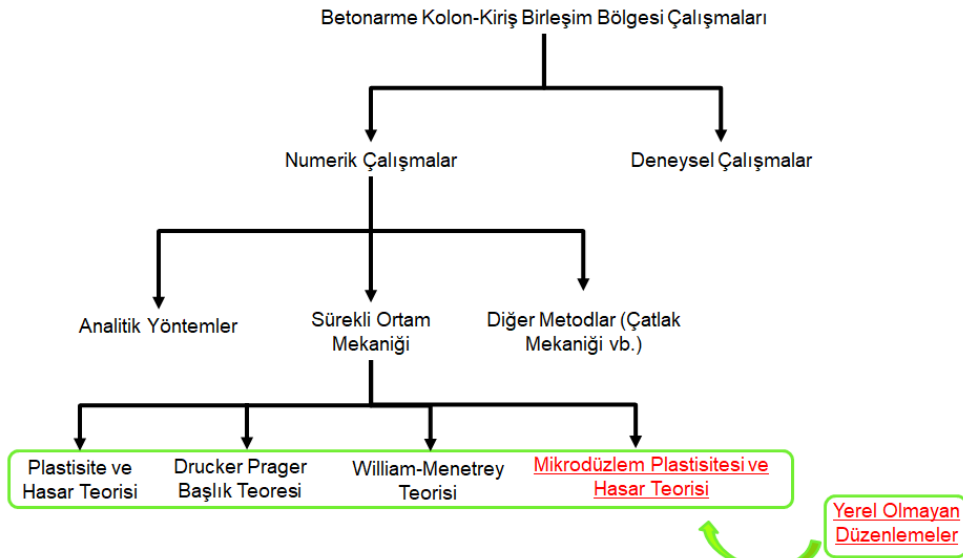
İlk kullanım yılları 1900'lü yıllara dayanan sonlu elemanlar yöntemi 1950'ler de Boing uçak kanatlarında kullanılmış 1960'lı yıllardan sonra da diğer mühendis dallarınca benimsenmiştir. Günümüzde ise sonlu elemanlar yöntemi halen mühendisliğin birçok alanındaki programlarda (ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS) kullanılmaktadır.

Bu yöntemde mevcut sistem düğüm noktası içeren elamanlara bölünür ve her eleman için fiziksel büyüklüklere ait davranışlar tanımlanır. Tüm temas halindeki elemanlar birbirlerine düğüm noktalarından bağlanarak bütün yapıya ait yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur. Düğüm noktalarında aranan bilinmeyen değerler için sistem denklemleri çözümler ve böylece elemanlara ait istenilen değerler hesaplanmış olur.

3.1 Malzeme Modelleri

Kompozit bir yapı malzemesi olan beton çatlaklı ve boşluklu yapıya sahiptir. Betonun çekme ve basınç dayanımı farklıdır ve ayrıca doğrusal olmayan davranışlıdır. Donatı çeliğinin ise basınç ve çekme etkisinde gerilme-şekildeğiştirme grafiği aynıdır. Araştırmacılar beton adına birçok farklı bünye bağıntısı geliştirmiş ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Gerçekçi bir betonarme eleman davranışı sergileyebilmek için oluşturulan malzeme modelleri incelenmiştir. Beton malzeme için geçerli bir model kurmak, üç temel çözümü içermelidir: (1) Çekme ve basınç altında akma yüzeyleri, (2) (non-associative) akma koşulunu sağlayan bir plastik potansiyel fonksiyonu ve (3) yumuşama koşuluna uygun çözüm içermelidir.

Literatürde doğrusal olmayan elastisite, hasar mekaniği, plastisite, kırılma mekaniği, mikro-düzlem kullanılarak birçok doğrusal olmayan bünye bağıntısı oluşturulmuştur. Bunlar arasında plastisite teorisi doğrusal olmayan malzemeler içinde en yaygın kullanılandır. Bu tez kapsamında araştırılan ve modellerde kullanılan metodlar Şekil 3.1’de ki diyagramda toplanmıştır.



Şekil 3.1 Seçilen araştırma yöntemi ve kullanılan metodlara ait diyagram

Bu tez kapsamında yapılan sayısal çalışmalarda kullanılacak modellerde sürekli ortam mekaniğine ait teoriler kullanılarak oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda Plastisite ve Hasar Teorisi, Drucker Prager Başlık Teorisi, William-

Menetrey Teorisi, Mikro-düzlem Plastisitesi ve Hasar Teorisi araştırılmıştır. Çalışmada oluşturulan modeller yerel olmayan düzenlemelerden yararlanılarak mikro-düzlem plastisitesi ve hasar teorisi esas alınarak oluşturulmuştur.

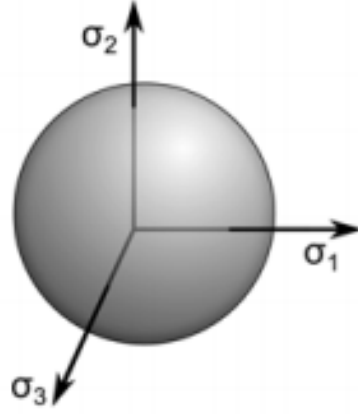
3.1.1 Plastisite ve Hasar Teorisi

Basit bir tanımla herhangi bir malzeme noktasında ki gerilme durumunun belirli bir yüzeyi (akma yüzeyi) geçemeyeceği ve gerilme durumunun bu yüzeydeyken plastik deformasyon gerçekleştirdiği varsayımına dayanır. Akma yüzeyleri gerilme veya gerilme değişkenleri olarak tanımlanabilir. Rankine, Tresca, von Mises, Mohr-Columb ve Drucker-Prager yaygın olarak kullanılan akma fonksiyonlarıdır. Bunların içinde, von Mises en basit plastiklik şekli olarak görülebilir. Malzemenin kafes yapısındaki iki bitişik gövde arasında bağlanmanın sadece ara yüzeylerine etki eden kayma gerilmelerine bağlı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Deneyler, bu varsayımın metaller için iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ancak bu varsayım beton benzeri malzemeler için geçerli değildir, çünkü kayma yüzeyi çok pürüzlüdür ve sürtünme gerilme bileşeninin normali yönünde bağlıdır. Bu malzemeler “sürtünmeli (frictional) malzemeler” olarak tanımlanmaktadır. Gerilme durumu akma fonksiyonuna ulaştığında, akma başlar ve metallerde akmanın yönü, en büyük plastik dağılımının sağlandığı noktada bu fonksiyonun gradyanıyla orantılıdır. Sürtünme malzemelerinde, yön bilgisi aynı şekilde elde edilemez, çünkü sürtünme açısı plastik akmada önemli bir rol oynar.

Plastisite teorisi ilk başta metallerin davranışını modellemek amacı ile kullanılıyordu. Beton ise yapısı gereği basınç altında kalıcı şekilde değişimlerine maruz kaldığı için betonda plastisite teorisiyle modellenmektedir. Bu teoride toplam şekil değişimi Denklem 3.17’de belirtildiği gibi elastik ve plastik olarak ayrıca hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (3.17)$$

Plastisite teorisini oluşturan malzemeye ait üç temel tanım vardır. Bunlar akma yüzeyi, akma kuralı, pekleşme kuralıdır. Akma yüzeyi gerilme ve iç değişkenlere bağlı bir fonksiyondur. Bu fonksiyon ise her model için Şekil 3.2’deki gibi yüzey tanımlar. Böylece akma fonksiyonu elastik bölgenin sınırını belirlemiş olur.



Şekil 3.2 Gerilme uzayında akma yüzeyinin gösterimi [31]

Akma fonksiyonları gerilme veya gerilme değişkenleri ayrıca şekildeğiştirmeler cinsinden tanımlanabilmektedir. Literatürde kullanılanlardan Rankine, Tresca, von Mises, Mohr Columb akma fonksiyonlarından bazılarıdır. Verilen gerilmeler f akma fonksiyonunu sağlayacak şekilde olmalıdır (Şekil 3.3). Yani akma yüzeyi içerisinde ($f < 0$) veya yüzey üzerinde ($f = 0$) bulunabilir, akma yüzeyi dışına çıkamaz. Bu duruma kadar plastik şekil değişimi oluşmaz ($\dot{\lambda} = 0$). Gerilmelerin artmasıyla plastik şekil değişimi oluşur ($\dot{\lambda} > 0$). Bu durum Kuhn-Tucker koşulları olarak adlandırılır. Bu eşitsizliklerin sonucu olarak Denklem 3.18 ve Denklem 3.19'da ki plastik uygunluk ifadesi elde edilmiş olur.

$$f \leq 0 \text{ ve } \dot{\lambda} = 0 \Rightarrow f \dot{\lambda} = 0 \quad (3.18)$$

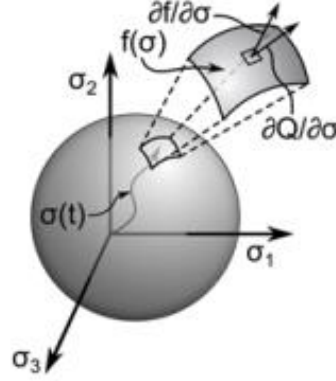
$$f = 0 \text{ ve } \dot{\lambda} \geq 0 \Rightarrow f \dot{\lambda} = 0 \quad (3.19)$$

Malzemeler Kuhn-Tucker'in sınır koşullarına uymayıp akmaya başladıklarında yaptıkları plastik şekil değişimlerin doğrultusunu ve miktarını belirleyebilmek için bir akma kuralı tanımlanmalıdır (Denklem 3.20).

$$\varepsilon_p = \dot{\lambda} \frac{\delta Q}{\delta \sigma} \quad (3.20)$$

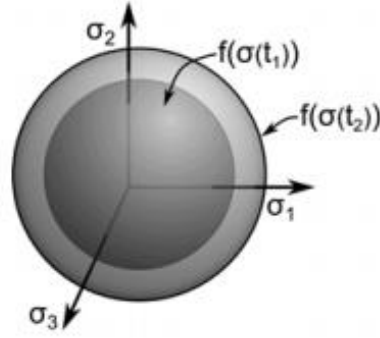
Bu formülde Q plastik potansiyeli ifade eden skaler bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun akma yüzeyine eşit olduğu durumda plastik şekildeğiştirmelerin diklik koşulu (associated plasticity) gerçekleşmiş olur. Farklı fonksiyonun seçilmesi durumunda ise bu kural geçersiz olur. Beton adına oluşturulan malzeme modellerinde diklik kuralı geçersizdir [32]. Bu yüzden plastik potansiyel için farklı

fonksiyon seçilmelidir. Aynı fonksiyonların seçildiği yani diklik kuralının geçerli olduğu durumda hacimsel şekildeğişimlerin fazla yüksek hesaplandığı ortaya konulmuştur [33].



Şekil 3.3 Plastik akma kuralı [31]

Akma yüzeylerinin şekil değişimlerinin artmasıyla değişmediğinin kabul edildiği durumda malzeme ideal elasto-plastik malzeme olarak davranış sergiler. Malzemelerinin gerçek davranışı gereği çoğunlukla plastik şekil değişimlerinin artışı sonucu akma sınırları da değişmektedir. Akma gerilmelerinin nasıl değiştiğinin tanımı pekleşme kuralı olarak bilinmektedir. Pекleşme izotropik ve kinematik pekleşme olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 3.4). İzotropik pekleşmede akma yüzeyi genişleyebilirken kinematik pekleşmede akma yüzeyinin gerilme uzayında yer değişimi söz konusudur. Yumuşama olduğu durumda ise akma yüzeyi daralmaktadır.



Şekil 3.4 İzotropik Pekleşme [31]

İzotropik pekleşme halinde akma gerilmesi (σ_y) ile tanımlanır. Denklem 3.21’de verilen (κ) pekleşmeyi kontrol eden bir parametredir [9].

$$\sigma_y = h(\kappa) \quad (3.21)$$

3.1.2 Drucker Prager Başlık Teorisi

Drucker-Prager akma yüzeyini genişletilmiş bir başlık yüzeyi halinde kullanarak mikro-düzlem tabanlı bir yaklaşım tanımlamıştır. Bunun sayesinde herhangi gerilme-şekildeğiştirme durumu için yumuşak bir akma fonksiyonu elde edilmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak yerel değişkenler, düzenlenmiş yerel olmayan değişkenlerle değiştirilerek sonuç vermektedir ve ayrıca yumuşama durumu için doğru sonuçlar elde edilmektedir [20].

Sünek malzemelerde plastik deformasyon kristolografik düzlemler boyunca oluşmaktadır. Bu olay stres tensörünün hacimsel kısmından bağımsız olup bu durumda akma fonksiyonu Denklem 3.22’de verilmektedir [9].

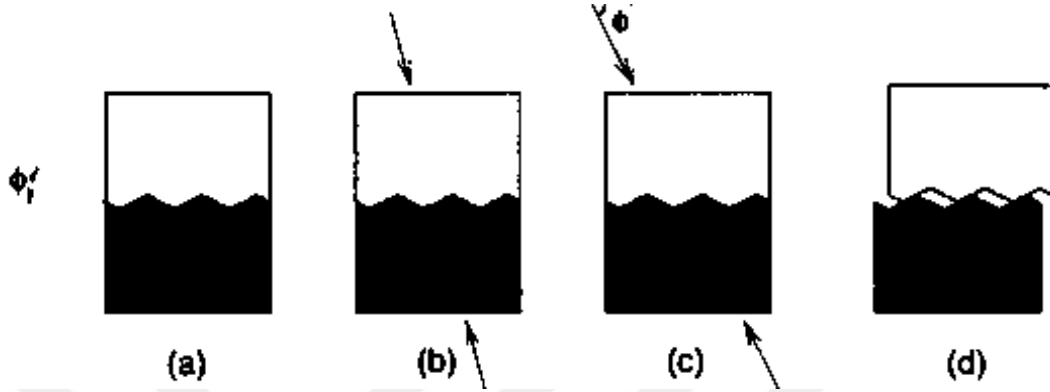
$$f(J_2) = \sqrt{J_2} - \tau_0 \quad (3.22)$$

Ancak deneyler bu temel varsayımın beton malzemesi için geçerli olmadığını göstermiştir. Sürtünmeli modellerde (örneğin Drucker-Prager) bu kristolografik hacimler arasındaki yüzeyleri pürüzlüdür. Bu yüzden sıyırma (kayma) olayı bu yüzeyler arasındaki sürtünmeye ve hacimler arasındaki açılara bağlıdır.

Pürüzlü yüzeylerdeki kaymalar normal yerdeğiştirmelerle sonuçlanmakta bu yüzden hacimde plastik değişimler oluşmaktadır. Bu etki dilatasyon (α) olarak

adlandırılmaktadır. Bu sayede sürtünlü malzemelerde plastikleşmeyi basınca hassas hale getirilir. Akma kriteri stres tensörünün hacimsel kısmından (I_1) bağımsız değildir.

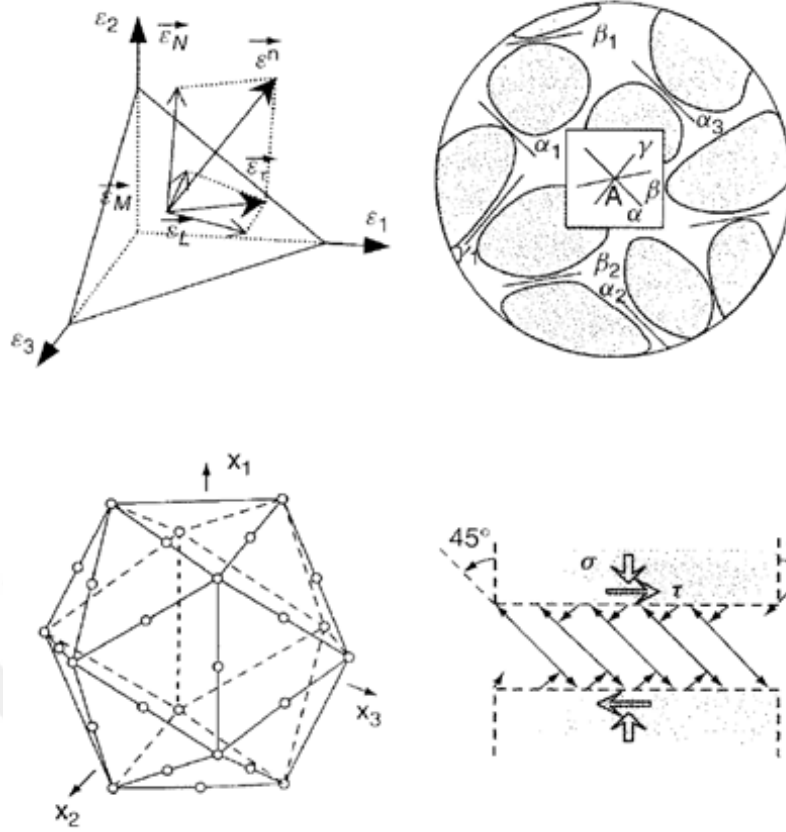
$$f(J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \tau_0 \quad (3.23)$$



Şekil 3.5 Kristalografik yüzey [34]

3.1.3 Mikro-Düzlem Plastisitesi ve Hasar Teorisi

Mikro-düzlem yaklaşımı, vektörel ilişkilerle agregalar ve çimento harcı arasındaki ara yüzeyler gibi zayıf yüzeyler boyunca oluşabilecek fiziksel olayları tanımlamak için bünye bağıntılarını basitleştirir. Ayrıca farklı yönlerde oluşan hasar ve plastisiteyi hesaba katar ve anizotropinin doğal bir şekilde yaklaşıma dahil edilmesini sağlamaktadır [20].



Şekil 3.6 Mikro-düzlem [34]

Literatürde ve ticari sonlu eleman programlarının kodları içerisinde çeşitli plastisite modellerine ait geleneksel uygulamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Sayısal problemleri aşabilmek için alışılmadık ancak güçlü bir yaklaşım getirilmiştir [20]. Bu çalışmanın formülasyonunda tensor formülasyonu yerine tek eksenli gerilme durumuyla değişen mikro-düzlem formülasyonları kullanılmıştır. Bu yaklaşımın ana avantajları (1) modelleyicinin farklı yönlerde oluşan hasar, plastisite ve anizotropiyi doğal bir şekilde hesaba katarak sayısal sorunları ortadan kaldırabilmesi; (2) sürtünmeli malzemelerde dilatasyondan kaynaklanan normallikten sapmaları yakalayabilmek; (3) yüzeylerle ilişkili fiziksel olayları (sürtünmeli kayma, yanal sıkıştırma) doğrudan karakterize edebilmesidir.

Makroskopik (konvansiyonel) miktarların, Denklem 3.24 kullanılarak mikro düzlemlerin oluşturduğu küre üzerinde sayısal entegrasyon yoluyla hesaplandığı varsayılmaktadır.

$$\frac{3}{4\pi} \int_{\Omega} (\bullet) d\Omega = \sum_{mic=1}^{21} (\bullet) w^{mic} \quad (3.24)$$

Herhangi bir akma kriterinin mikro düzlemde karşılığı, bir mikro düzlem plastiklik modelinin oluşturulması ile tanımlanabilir. Bu duruma ait Drucker-Prager (1952) akma fonksiyonu Denklem 3.25'de verilmiştir.

$$f_{DP}^{mic} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_D^e \cdot \sigma_D^e + \alpha \sigma_V^e - \sigma_0} \quad (3.25)$$

σ_D^e etkili sapma gerilmesini (deviatorik), σ_V^e etkili hacim gerilmesini (hidrostatik), α sürtünme açısını ve σ_0 başlangıçtaki akma dayanımını temsil etmektedir. Bu fonksiyon gerilme alanında açık bir yüzey oluşturmaktadır. Tüm muhtemel gerilme durumlarını kapsamak için şekil Denklem 3.29'da tarif edildiği gibi fonksiyon basınç ($f_c(\sigma_V^e, \kappa)$) ve çekme ($f_t(\sigma_V^e, \kappa)$) eğrileriyle sınırlandırılmıştır.

$$f^{mic}(\sigma_D^e, \sigma_V^e, \kappa) = \frac{3}{2} \sigma_D^e \cdot \sigma_D^e - f_1^2(\sigma_V^e, \kappa) f_c(\sigma_V^e, \kappa) f_t(\sigma_V^e, \kappa) \quad (3.26)$$

Drucker-prager akma yüzeyi çekme ve basınç eğrilerine göre düzenlenmiştir f_c , f_t ve f_1 genişleme(dilatancy) parametresi ve tüm yüzeyler pekleşme parametresi (κ) içermektedir. Drucker-prager başlık teorisi bu açıdan pürüzsüz sürekli bir fonksiyon sağlamaktadır. Bu konu hakkında detaylı bilgilendirme Kaliske ve Zreid [20]'den elde edilebilir. Denklem 3.27'de gösterilen fonksiyonda pekleşme doğrusal ilişkilerle kontrol edilmektedir ve burada D malzemeye ait pekleşme sabitidir.

$$f_h(\kappa) = D\kappa \quad (3.27)$$

Hasar, sırasıyla β_c ve β_t basınç ve çekme malzeme hasar sabitlerinin fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Toplam hasar parametrelerinin kombini Denklem 3.28'de bir araya gelmektedir. Fakat asal gerilmelerin bir fonksiyonu olan ayrılma ağırlık faktörünün eklenmesiyle Denklem 3.29 esas alınmaktadır.

$$1 - d^{mic} = (1 - d_c^{mic})(1 - r_w d_t^{mic}) \quad (3.28)$$

$$r_w = \frac{\sum_{l=1}^3 \langle \epsilon^l \rangle}{\sum_{l=1}^3 |\epsilon^l|} \quad (3.29)$$

3.1.4 Yerel Olmayan Düzenlemeler

Kurulan model üzerinde beton davranışında, betonun şekildeğiştirme yumuşaması yaptığını ifade edebilmek hedeflenmektedir. Ancak negatif sertleşme ile plastisite modelleri arasındaki sayısal düzensizlikler yüzünden sonuç alınamamaktadır. Bunun asıl sebebi yumuşamaya ait bölgenin çok (sonsuz) küçük olması ve göçme durumu boyunca harcanan toplam enerji miktarının sıfır olmasıdır [41]. Bu yüzden sınır değer problemi için genel bir çözüm yoktur.

Literatürde bu probleme ait çözümler üretilmiştir; en etkili çözümlerden birinde yerelleşmeyi engellemek için çözümü yerel olmayan değerlerle yer değiştirilen diğer değerler problemi çözülebilir yapmaktadır. Yerel bir değişkenin yerel olmayan ortalaması, homojen Neumann sınır koşuluyla (Denklem 3.30), Helmholtz tipi denklemin (Denklem 3.31) kullanıldığı yerel olmayan değer varsayılarak hesaplanır.

$$\bar{\eta}_m - c\nabla^2\bar{\eta}_m = \eta_m \quad (3.30)$$

$$\nabla\bar{\eta}_m n_b = 0 \quad (3.31)$$

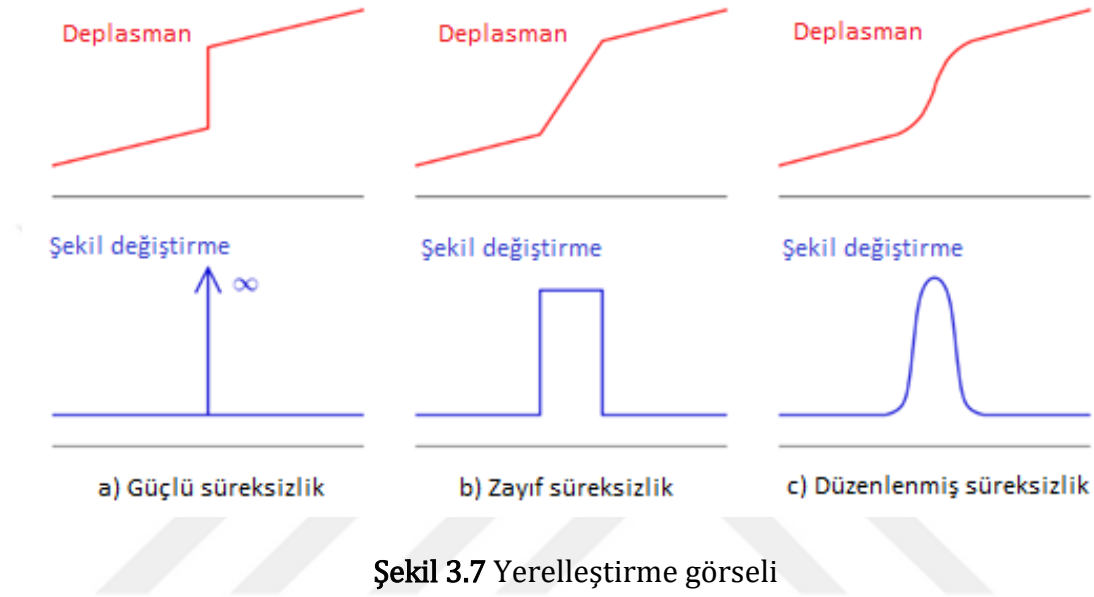
Bu denklemde η_m geliştirilecek olan yerel değişkeni, $\bar{\eta}_m$ ise yerel olmayan değeri gösterir. c Etkileşimin yarıçapını (veya lokalizasyonu) kontrol eden uzunluk ölçeğine ait parametredir, n_b ise sınır normal vektörüdür. Örtük (implicit) düzenleme, yerel ve yerel olmayan değişkenlerin ağırlıklı bir kombinasyonu ile elde edilmektedir (Denklem 3.32).

$$\hat{\eta}_i^{mic} = m\bar{\eta}_{mi} + (1 - m)\eta_{mi} \text{ for } i = t, c \quad (3.32)$$

Bu denklemde m malzeme düzenleme parametresidir. Yerelleşmenin önlenmesi veya diğer bir tanımla değişkenlik aralığında yerel değişkenlerin (eşdeğer gerilmenin) homojenleştirilmesi her eleman için iki (basınç ve çekme) ek serbestlik derecesi gerektirir. Bir malzeme içerisinde çekme dayanımı aşıldığı kısımda gerilmeler azalır. Malzemenin çekme gerilmesinin aşıldığı diğer kısımlarında elastik boşaltma görülebilir.

Bazant [41] yumuşamanın gerçekleştiği bölgenin sonsuza yakın derecede küçük olduğunu (lokalizasyon problemi) ve göçme süreci boyunca harcanan toplam enerji

miktarının bu gibi problemlerde sıfır olduğunu belirtmiştir. Yerelleşmeyi sınırlandırmak ve bu sorunu çözebilmek için, yerel değişkenlerle (örneğin plastik gerilme) düzenlenmiş yerel olmayan değişkenler değiştirilir. Bu sayede homojen bir gerilme dağılımı elde edilerek düzgün bir çözüm elde edilmektedir (Şekil 3.7). Bu düzenlemede her bir elemanın bahsedilen yerel olmayan parametreleri (çekme ve basınç) için ilave serbestlik derecesine sahip olması gerekmektedir.



3.1.5 William-Menetrey Teoremi

Sonlu eleman analizlerinde betona ait malzeme davranışı William ve Menetrey [34] tarafından önerilen model ile tanımlanabilmektedir. Bu modelin avantajları: Çekme ve basınç bölgeleri için ayrı akma yüzeyi tanımlarına izin vermesi; basınç altında pekleşme ve yumuşamayı, çekme altında yumuşama davranışını yansıtabilmesi; malzeme parametresi olarak temel büyüklükleri kullanmasıdır. Ancak donatı elemanların monotonik yükler altındaki davranışı için iki doğrulu ya da çok doğrulu izotropik pekleşme modelleri kullanılırken, çevrimsel yükler altında Bauschinger etkisini de hesaba katmak adına yine iki-doğrulu ya da çok-doğrulu kinematik pekleşme modelleri kullanması betonarme modeller açısından teoremin dezavantajlarıdır. Beton davranışını ifade edebilmek için Menetrey-William'a ait formülasyonlardan oluşturulmuş bir malzeme modeli mevcuttur. Akma yüzeyi ve akma potansiyeli dört parametre (R_t : Tek eksenli gerilmede akma dayanımı, R_c :

Eksenel basınç, R_b : İki eksenli basınç ve Ω_{tc} :) ile Haigh-Westergaard kordinatlarında ifade edilmiştir.

$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3}(\sqrt{2}\bar{z} + r\rho) + \rho^2 - \frac{1}{c_3} \quad (3.33)$$

Bu formülasyonlarda c_2 ve c_3 iki eksenli ve tek eksenli basınç ve çekme gerilmeleri hakkında malzeme parametreleridir. Haigh-Westergaard kordinatları $\bar{z} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1$ ve $\rho = \sqrt{2J_2}$ dönüşümleri bu şekilde yapılmaktadır. Akma potansiyelinin ifade edildiği bu formüllerde ψ dilatasyon açısını simgelemektedir.

$$Q_{MW} = \rho^2 + B_g\rho + C_g\bar{z} \quad (3.34)$$

$$B_g = \frac{2\dot{R}_c \tan\psi - \sqrt{2}\dot{R}_t}{\sqrt{3}(1 - \sqrt{2}\tan\psi)} \quad (3.35)$$

$$C_g = \frac{B_g}{\sqrt{2}} + \frac{2\dot{R}_t}{\sqrt{3}} \quad (3.36)$$

Ancak bu tez kapsamında kurulacak modeller fazla sayıda sonlu elemanlardan oluşmaktadır. Kuvvet aktarımında yükü dengelemeye çalışan sayısal algoritmalar William-Menetrey teorisiyle bunu yapamamış ve genellikle donatıların olduğu yerlerde iterasyonun kavuşamadığı gözlemlenmiştir. William-Menetrey hasarı modelleyemediği için büyük plastik şekil değişimler olduğunda hasar dağıtılamamıştır. Bu durum mikro düzlem ile aşılmıştır. Mikro düzlem sayesinde bir bölgede biriken enerji katsayılarla yayılarak ve analiz devam edebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı William-Menetrey modeli kullanılamamıştır.

3.2 Mikro Düzlem Plastisitesi İçin Malzeme Modeline Ait Sonlu Eleman Formülasyonunun Türetilmesi

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan formülasyon, Zreid ve Kaliske [20] temel alınarak aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir. Doğrusal momentumun eşitliği zayıf formda,

$$\int_B \delta \mathbf{u} \cdot \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} dv + \int_B \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{f} dv = 0 \quad (3.37)$$

şeklinde elde edilmektedir. Buna ilave olarak yerleşmeyi engellemek için non-lokal (yerel olmayan) alanı tanımlamak için yine zayıf formda,

$$\int_B \delta \bar{\eta}_m \bar{\eta}_m dv - \int_B \delta \bar{\eta}_m c \nabla^2 \bar{\eta}_m dv = \int_B \delta \bar{\eta}_m \eta_m dv \quad (3.38)$$

denklemini kullanılabilmektedir. Denklemlerde kullanılan ağırlık fonksiyonları sırasıyla $\delta \mathbf{u}$ ve $\delta \bar{\eta}_m$ 'dir. Denklem 3.38 üzerinde Cauchy gerilme teoremi uygulanarak,

$$\int_{\partial B} \mathbf{t}_e \cdot \delta \mathbf{u} da - \int_B \boldsymbol{\sigma} : \nabla \delta \mathbf{u} dv + \int_B \delta \mathbf{u} \cdot \mathbf{f} dv = 0 \quad (3.39)$$

haline getirilebilir. Benzer şekilde Denklem 3.37, $\nabla \bar{\eta}_m \cdot \boldsymbol{\eta}_b = 0$ sınır koşulu uygulanarak,

$$\int_B \delta \bar{\eta}_m \bar{\eta}_m dv + \int_B \nabla \delta \bar{\eta}_m \cdot c \nabla \bar{\eta}_m dv = \int_B \delta \bar{\eta}_m \eta_m dv \quad (3.40)$$

formuna dönüştürülebilir. \mathbf{N} ve $\bar{\mathbf{N}}$ şekil fonksiyonları ve E^e düğüm noktası yerel olmayan değeri olmak üzere,

$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \mathbf{d}^e, \quad \bar{\eta}_m = \bar{\mathbf{N}} E^e, \quad (3.41)$$

denklemleri ile yerdeğıştirmeler \mathbf{u} ve yerel olmayan değışken $\bar{\eta}_m$ elemanlar üzerinde tarif edilebilir. Bu değışkenlerin gradyenti

$$\nabla \mathbf{u} = \partial_x \mathbf{N} \mathbf{d}^e = \mathbf{B} \mathbf{d}^e, \quad \nabla \bar{\eta}_m = \partial_x \bar{\mathbf{N}} E^e = \bar{\mathbf{B}} E^e \quad (3.42)$$

şeklinde tanımlanarak, Denklem 3.39 ve Denklem 3.40 tekrar yazılabilir.

$$\int_B \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv = \int_B \mathbf{N}^T \mathbf{f} dv + \int_{\partial B_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t}_e da \quad (3.43)$$

$$\int_B \bar{\mathbf{N}}^T \bar{\eta}_m dv + \int_B \bar{\mathbf{B}}^T c \nabla \bar{\eta}_m dv = \int_B \bar{\mathbf{N}}^T \eta_m dv \quad (3.44)$$

Denklem 3.43 ve Denklem 3.44'e ait artık ifade her iki diferansiyel denklemini kapsayacak şekilde

$$\mathbf{R}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_u^e \\ \mathbf{R}_{\bar{\eta}}^e \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 4.43 ve Denklem 4.44 ile i. iterasyon adımı için Denklem 3.45'in bileşenleri

$$\mathbf{R}_{u,i}^e = \int_B \mathbf{B}^T \sigma dv - \int_B \mathbf{N}^T \mathbf{f} dv - \int_{\partial B_e} \mathbf{N}^T \mathbf{t}_e da \quad (3.46)$$

$$\mathbf{R}_{\bar{\eta},i}^e = \int_B \bar{\mathbf{B}}^T c \bar{\mathbf{B}} \mathbf{E} dv + \int_B \bar{\mathbf{N}}^T [\bar{\mathbf{N}} \mathbf{E} - \mathbf{m}] dv \quad (3.47)$$

formunu alır. Denklem 3.46 ve Denklem 3.47 ile ortaya konan ifadeler doğrusal değildir ve Denklem 3.48'de olduğu gibi Taylor serisi ile açılarak doğrusal hale getirilebilir.

$$\text{Lin} \mathbf{R}^e = \mathbf{R}^e|_{\mathbf{x}^e,i} + \left(\frac{\partial \mathbf{R}^e}{\partial \mathbf{X}^e} \right) |_{\mathbf{x}^e,i} \cdot \Delta \mathbf{X}^e_{,i+1} \quad (3.48)$$

Böylece, üç boyutlu uzaydaki serbestlik derecelerini, E^e ise yerel olmayan alandaki serbestlik derecelerini tarif etmek üzere Denklem 3.46 ve Denklem 3.47 ile verilen ifadeler matris formda

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu,i}^e & \mathbf{K}_{u\bar{\eta},i}^e \\ \mathbf{K}_{\bar{\eta}u,i}^e & \mathbf{K}_{\bar{\eta}\bar{\eta},i}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_{,i+1}^e \\ \Delta E_{,i+1}^e \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{u,i}^e \\ \mathbf{R}_{\bar{\eta},i}^e \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

olarak yazılabilir. Burada rijitlik matrisinin bileşenleri

$$\mathbf{K}_{uu,i}^e = \int_B \mathbf{B}^T \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \mathbf{B} dv \quad (3.50)$$

$$\mathbf{K}_{u\bar{\eta},i}^e = \int_B \mathbf{B}^T \frac{\partial \sigma}{\partial \bar{\eta}_m} \bar{\mathbf{N}} dv \quad (3.51)$$

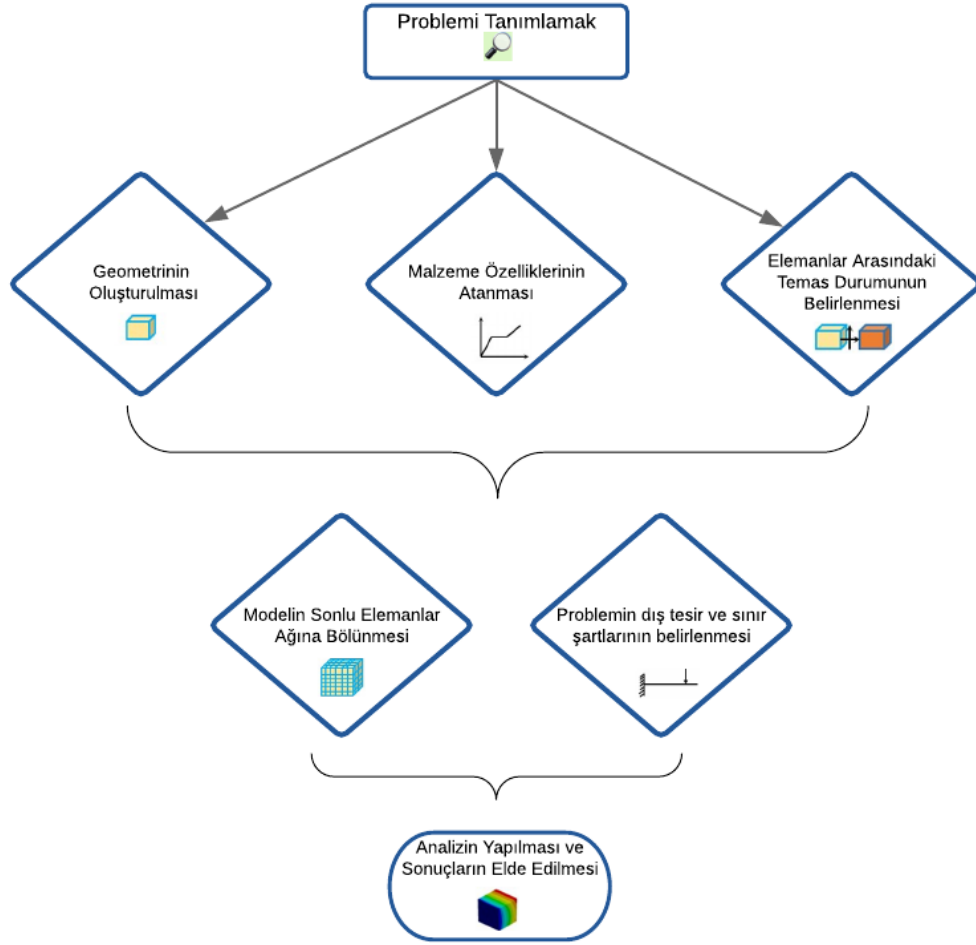
$$\mathbf{K}_{\bar{\eta}u,i}^e = - \int_B \bar{\mathbf{N}}^T \frac{\partial \eta_m}{\partial \epsilon} \mathbf{B} dv \quad (3.52)$$

$$\mathbf{K}_{\bar{\eta}\bar{\eta},i}^e = \int_B \bar{\mathbf{B}}^T c \bar{\mathbf{B}} dv + \int_B \bar{\mathbf{N}}^T \bar{\mathbf{N}} dv \quad (3.53)$$

şeklinindedir. Görüldüğü gibi rijitlik matrisi simetrik değildir. Dolayısıyla sayısal analizde simetrik olmayan (unsymmetric solver) çözüm kullanılmalıdır.

3.3 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modelleme

Sonlu Eleman Yöntemi ile modellemeye başlanılmadan önce problem tanımlanmalıdır. Tanımlanan problem doğrultusunda modele ait geometri sonuçları değiştirecek bir etki oluşturmadan en sade ve sınırlı şekilde tasarlanmalıdır. Başlangıç için basit görünen bu ilk adım ilerleyen kısımlarda yapılacak analizlerde meydana gelebilecek uzun çözüm sürelerini kısaltmak açısından önemlidir. Geometrisi oluşturulan modele ANSYS programı içinde var olan kütüphaneden malzeme seçilebilir ve kullanılan malzeme özellikleri modelin gerçek davranışına uygun olacak şekilde değiştirilebilir. Malzeme özellikleri belirlenmiş sistemin elemanları arasındaki ilişkiyi ifade edebilmek için temas durumları belirlenmelidir. Sisteme ait sonlu elemanlar ağı oluşturulurken hareket kabiliyetlerine göre düğüm noktaları ve yüzey sayıları belirli olan üç boyutlu elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanların tipi ve sayısı, problem süresini ve alınacak analiz sonuçlarını etkileyecek önemli bir faktördür. Bu kapsamda en mantıklı sonlu eleman ağının sayısını belirlemek için yakınsama çalışması yapılmalıdır. Probleme ait dış tesir şartlarının ve sınır şartlarının da modele tanımlanmasından sonra analiz başlatılır ve istenilen sonuçlar elde edilir. Bu modelleme adımları Şekil 3.8'de özetlenmiştir. Bu tez kapsamında oluşturulacak sonlu elemanlar yöntemiyle kurulan modellerde bu adımlar takip edilecektir.



Şekil 3.8 SEY ile yapılan modellemelerde izlenilecek adımlara ait diyagram

3.3.1 Problemin Tanımı

Yapılacak çalışma hakkında ön bilgilendirmeler verildikten sonra bu çalışmanın neticesinde nasıl bir çözüm elde edilmek istenildiği veya bu çözümlere neden ihtiyaç olduğu tanımlanmalıdır. Problem tanımlanmalı ve bu konuda ki motivasyon kaynağı veya ulaşılması beklenen hedef önem arz etmektedir. Problemi doğru tanımlayabilmek elde edilecek sonuçların doğru yorumlanabilmesi ve hatasız bir model oluşturabilmek adına en önemli aşama olmaktadır.

Kurulacak olan model veya modellere ait yükleme prosedürleri belirlenmelidir. Bir doğrulama çalışması mı yoksa parametrik bir çalışma mı olacağı ve bunun gibi araştırma adımları belirlenmelidir.

3.3.2 Problemin Geometrisinin Oluşturulması

Probleme ait geometri oluşturulurken analiz sonucuna etki etmeyecek en sade biçimde geometriyi tanımlayabilmek önemlidir. Geometriyi önemli kılan en önemli özelliklerinden biriside analiz süresine olan etkisidir. Sonlu eleman ağının düzeni, sayısı ve ebatları hem analiz süresi hem de sonucun doğruluğu için önem arz etmektedir. Bu noktada geometri çizilirken, sonlu elemanlar ağını en büyük ortak böleni seçmeye yönelik bir mantıkla, uyumlu ebatlar n görülerek eleman boyutları belirlenmelidir. Ancak geometrisi zaten belirli bir Şekil modellenmek isteniyorsa da kkk ve fazla sayıda sonlu elemanlar ortaya çıkacaktır. Bunun içinde en duyarlı sonlu elamanlar ağını belirleyecek bir çalışmanın yapılması gerekmektedir.

Özellikle geometrinin her ekseninde simetriklik durumu kontrol edilmelidir. Şeklin hacmini yarıya veya çeyreğine düşürebilecek olan bu hamle önem arz etmektedir. Simetri özelliği tanımlanan eksen normalinde yerdeğiştirme sıfır olarak tanımlanmalıdır.

ANSYS Workbench'te yapılan geometrik tasarımlar iki farklı arayüz ile yapılabilir. Aynı zamanda AutoCAD gibi bir çizim programından da veriler programa aktarılabilir. Ancak ANSYS kendi içerisinde çizim yaparak geometriyi oluşturmak, çalışmanın ileri aşamaları için kolaylıklar sağlamaktadır. Özellikle geometrik özelliklerde parametrik bir çalışma yapılmak isteniyorsa programın kendi içerisinde çizim yapmak, geometriyi değiştirmek ve yeni analizi sonuçlandırabilmek adına harcanacak olan süreci kolaylaştıracaktır. Aynı zamanda yapılan hatalı durumlar için daha kolay geri dönüş imknı sağlayacaktır.

3.3.3 Malzeme zelliklerinin Oluşturulması

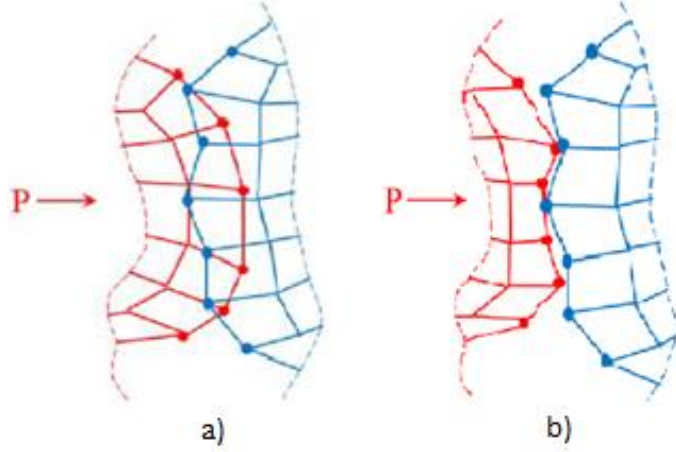
ANSYS kütüphanesinde birçok malzeme için veriler tanımlanmıştır. Kullanılacak olan malzemenin değerleri istenilen Şekilde düzenlenebilmektedir. Bu hazır olan malzeme tanımları haricinde, probleme ve kullanılacak malzeme davranışına göre de mekanik bir model oluşturulabilmektedir. Sürekli ortam mekaniği, çatlak mekaniği vb. Çalışmalardan faydalanılabilmektedir. Bu kapsamda plastisite ve hasar mekaniği, mikro düzlem plastisitesi ve yerel olmayan (non-local) düzenlemeler hakkında açıklamalara bu tezin "Malzeme Modelleri" kısmında yer verilmiştir.

3.3.4 Temas Durumları ve Sınır Durumlarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan elemanların aralarındaki ilişkiyi ve davranış biçimlerini ifade edebilmek adına bu elemanlar arasında temas durumları belirlenmelidir. Kullanılan ANSYS Workbench programı kapsamında beş farklı temas durumu tanımlanabilmektedir:

- a) Tam bağlı temas (Bonded): Elemanlar arasında birbirlerine dikey ve teğet yönde hareketin olmadığı durumdur.
- b) Ayrılmayan temas (No Separation): Elemanlar birbirlerinin teğet yönü doğrultusunda hareket edebildiği, diğer yönde hareketin olmadığı durumdur.
- c) Ayrılabilen temas (Rough): Elemanlar birbirlerine dik doğrultu da hareket edebildiği, teğetleri yönde hareketin olmadığı durumdur.
- d) Sürtünmeli temas (Frictional): Elemanların birbirlerine dik doğrultuda hareket edebildiği ve teğetleri doğrultusunda belirli sürtünme katsayısına bağlı hareketi olabilen temas durumudur.
- e) Sürtünmesiz temas (Frictionless): Elemanların birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareket edebildiği ve birbirlerine dik doğrultuda belirli sürtünme katsayısına bağlı hareketi olabilen temas durumudur.

Programda tanımlanan bu temas türlerinden tam bağlı ve ayrılmayan temas durumları için doğrusal analiz yapılırken diğer durumlar için doğrusal olmayan analiz yapılmaktadır. Bu durum analizin süresini etkileyen önemli faktörlerdendir. Doğrusal olmayan temas durumlarının seçilmesi analiz süresini uzatacaktır. Modelde farklı temas durumunu gerektirecek bir durum söz konusu değilse ve bir tanımlama yapılmadıysa program otomatik olarak tam bağlı temas (bonded) atayacaktır. Elemanlar arasında tam bağlı temas durumu da yoksa ve hiçbir temas durumunu tanımlanmadıysa elemanların birbiriyle etkileşimi ve temas durumunun olduğu haldeki birbiriyle etkileşimi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Temas durumunun a) olmadığı, b) olduğu durum [35]

3.3.5 Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

Probleme ait sonlu elemanlar ağı oluşturulurken kullanılan üç boyutlu elemanlarla ağ yapısı oluşturulmaktadır. Bu ağ yapısı oluşturulurken kullanılacak elemanlar, sistemin çözümü için kullanılacak malzeme modeline göre değişmektedir. ANSYS malzeme referansında bu seçeneklere ait uzun bir liste oluşturulmuştur [36]. Sıkça kullanılan elemanlardan bazıları SOLID185, SOLID186, SOLID 187'dir. Bu elemanları birbirinden farklı kılan en temel nokta oluşturdukları hacme ait yüz ve nokta sayılarıdır. Yüz sayısı fazla olan elemanların hareket yetenekleri daha yüksek olurken doğal olarak analiz esnasında hesaplama süreleri de daha fazla olmaktadır.

Problemin sonlu eleman ağı oluşturulurken analizin önem arz eden kesimlerinde, özellikle gerilmelerin daha yüksek olduğu yerlerde daha yoğun sonlu elemanlar kullanılabilir. Sonlu eleman adedi sonucu değiştirebilecek bir faktördür. Bu yüzden analize ait sonuçların sonlu eleman sayısından bağımsızlaştığını göstermek için yakınsama çalışması yapılmalıdır. Sonlu elemanların sayısının artması analiz süresini çok fazla uzatabileceği için bu sayının sonuca etkisinin önemsiz olacağı optimum sayı belirlenmelidir. Bu çalışma kapsamında sonlu eleman sayısı için yapılan yakınsama çalışmaları, 4. Bölüm yapılan sayısal çalışmalar kısmında verilecektir.

Bu tez kapsamında deneysel çalışmaları mevcut olan iki farklı sistem üzerinde sayısal çalışmalar yapılacaktır. Tekil kiriş-kolon birleşim bölgesi [21] ve portal çerçeve sistemler [40] üzerinde yapılmış deneysel çalışmalar içerisinde modellenen numuneler belirlenmiştir. Deneysel çalışmaları ölçekli olarak gerçekleştirilmiş olan bu modellerin, sayısal analizinde ölçekli halleri dikkate alınacaktır. Bu analizlerde ANSYS Workbench programı kullanılacaktır.

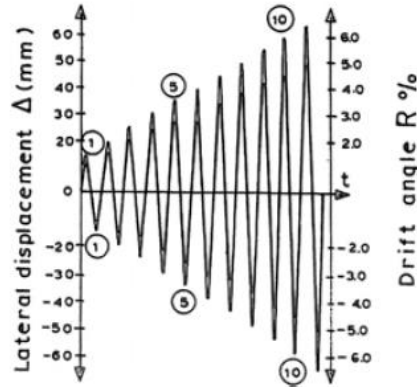
Tekil kiriş-kolon birleşim bölgesi modeli için ana modelin etriye sayısı, boyuna donatı çapı ve etriye çapı değiştirilerek 9 farklı model oluşturulacaktır. Portal çerçeve sistemler modeli için ise kolon genişliği, kiriş derinliği, kiriş genişliği, kiriş etriye adedi, kolon etriye adedi, kiriş etriye çapı, kolon etriye çapı ve sabit yükleme miktarı değiştirilerek 22 farklı model oluşturulacaktır. Analiz sonuçları yorumlanacak ve özellikle taşıma gücü, süneklik ve yumuşamada oluşan değişiklikler gösterilecektir, plastik mafsallık, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu incelenecektir.

4.1 Tekil Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesi Modelleri

Bu çalışma amacı monotonik yükleme altında tekil kiriş-kolon birleşim bölgelerine ait deneysel ve sayısal model test sonuçlarıyla eşleşen bir yük-yerdeğiştirme eğrisi elde etmektir. Modelleme yaklaşımının doğrulanmasından sonra bir dizi parametrik benzetim analizleri gerçekleştirilecektir. Doğrulanmış benzetim modelinin elde edilmesinden sonra, pahalı maliyetler içeren gerçek numune testleri yapılmadan tasarıma ait bilgilerin elde edilmesinin mümkün olduğunun gösterebilmesi hedeflenmektedir.

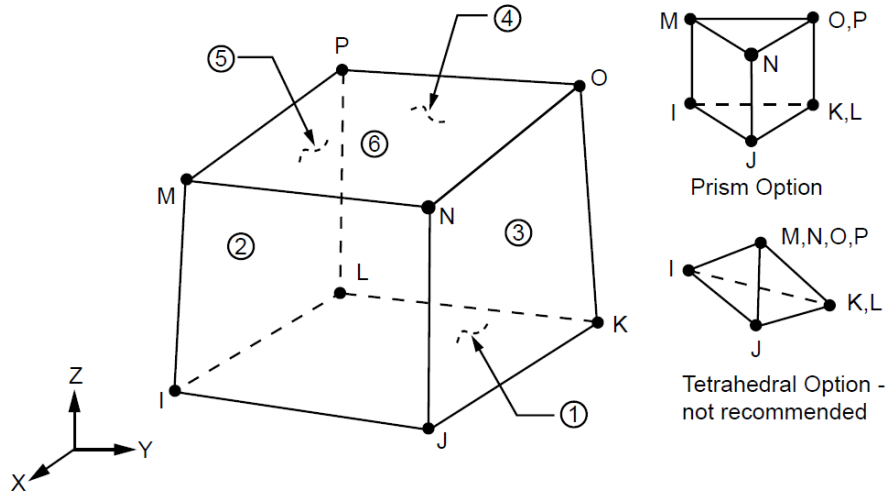
Burada Tsonos [21] çalışmasında yer alan E1 adlı kiriş-kolon birleşimi doğrulama örneği olarak seçilmiştir. Daha sonra parametrik çalışmalar yapılarak birleşim bölgeleri hakkında çıkarımlar yapılacaktır.

Tsonos [21] çalışmasında, modern yapılarda tersinir yükleme altında tekil kiriş-kolon birleşim bölgelerinin davranışı incelenmiştir. Çalışmada Avrupa CEN [37-38] ve Amerikan ACI [39] betonarme tasarım standartlarına göre hazırlanmış olan dört tane ½ ölçekli numunenin tekrarlı yükler altındaki performansı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Kiriş ucuna uygulanan %6 göreceli yerdeğiştirme oranına kadar (Şekil 4.1) çevrimsel yükleme yapıldıktan sonra bazı örneklerin birleşim bölgelerinde ciddi hasarlar gözlemlenmiştir ve bu tasarım standartları hakkında iyileştirmeler önerilmiştir.



Şekil 4.1 Yatay kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi [21]

Tsonos [21] makalesinde yer alan dört farklı numune içerisinde, modellemek için seçilen E1 düzeneğinin problem geometrisi, y ekseninde simetri özelliğine sahip olduğu için şeklin sadece yarısı modellenmiştir. Boyuna donatılar için Ø14 etriyeler için ise Ø6 çaplı donatı kullanılmıştır. Donatılar oluşturulurken tanımlanan en kesitleri doğrultusunda çubuk olarak modellenmiştir. Donatının çubuk eleman olarak modellenmesi sayesinde beton kısmının sonlu eleman yapısı daha düzgün olarak elde edilecektir. Probleme ait uzunluklar, donatı adetleri ve kesitleri içeren geometri Şekil 4. 2'de verilmiştir.



Şekil 4.3 CPT215 elemanı [36]

CPT215 elemanı çekme ve basınç hasarı altında ek serbestlik derecelerine sahip 8 düğüm noktalı bir elemandır. Bu elemanın çok kullanılan SOLID185 elemanından farklı kılan özelliklerinden en önemlisi serbestlikleridir. Bu kodların sayesinde her noktada hasardan kaynaklanan yerdeğiştirmeler kaydedilmektedir. KEYOPT(18)'in açılmasıyla iki adet ilave serbestlik eklenmektedir (GFV1, GFV2). Beton ve donatıya ait düğüm noktalarının paylaşılması için Şekil 4.4'de verilen APDL (Ansys parametric design language) kodu kullanılmıştır.

<code>/PREP7</code>	<code>/SHOW,png</code>
<code>CMSEL, S, BODY</code>	<code>/ANG,1,</code>
<code>ALLSEL, BELOW, ELEM</code>	<code>/DSCALE,1</code>
<code>NUMMRG, ALL</code>	<code>/VIEW,1,1,1,1</code>
<code>/SOLU</code>	<code>ESEL,S,TYPE,,1</code>
	<code>SET,1,1</code>
	<code>PLNSOL,EPTO,1</code>

Şekil 4.4 ANSYS APDL Kodu

Donatı çeliğini modellemek için yalnızca aksenal kuvvetlere dayanma yeteneğine sahip LINK180 3 boyutlu kafes elemanlar kullanılmıştır. Tsonos [21] 'de tarif edildiği gibi E1 numunesinin boyuna donatıları için 495 MPa akma dayanımına sahip 14 mm çaplı çelik donatılar, etriyeler için ise 540 Mpa akma dayanımına sahip 6 mm çelik donatılar kullanılmıştır. Tablo 4.1'de verilen parametreler ile iki doğrultulu izotropik pekleşme kuralı tanımlanmıştır.

Tablo 4.1 Donatı çeliği için doğrusal elastik ve bilineer izotropik pekleşme malzeme parametreleri

	Doğrusal elastisite		İki doğrultulu izotropik pekleşme	
	E(MPa)	ν	f_y (MPa)	E_t (MPa)
Boyuna donatı	200000	0,3	495	1000
Etriye donatısı	200000	0,3	540	1000

Temel beton parametreleri (E, ν) deneyde kullanılan beton malzemenin dayanım tanımına dayanarak sezgisel olarak belirlenmiştir. Diğer parametrelerse Kaliske ve Zreid [20] tarafından sunulan akma yüzeyini (başlık) oluşturacak şekilde Tablo 4.2'de gösterilen verilerle kalibre edilmiştir.

Tablo 4.2 Beton elemanlar için doğrusal elastisite ve mikro-düzlem drucker-prager başlık yüzey parametreleri

Doğrusal Elastisite		Mikro-düzlem Drucker-Prager Başlık Yüzey Parametreleri						
E (MPa)	ν	f_{uc} (MPa)	f_{ub} (MPa)	f_{ut} (MPa)	R_t	D	σ_v^c (MPa)	R
20000	0,2	22	$1.15f_{uc}$	$0.1f_{uc}$	1	$3,5 \times 10^4$	-45	1

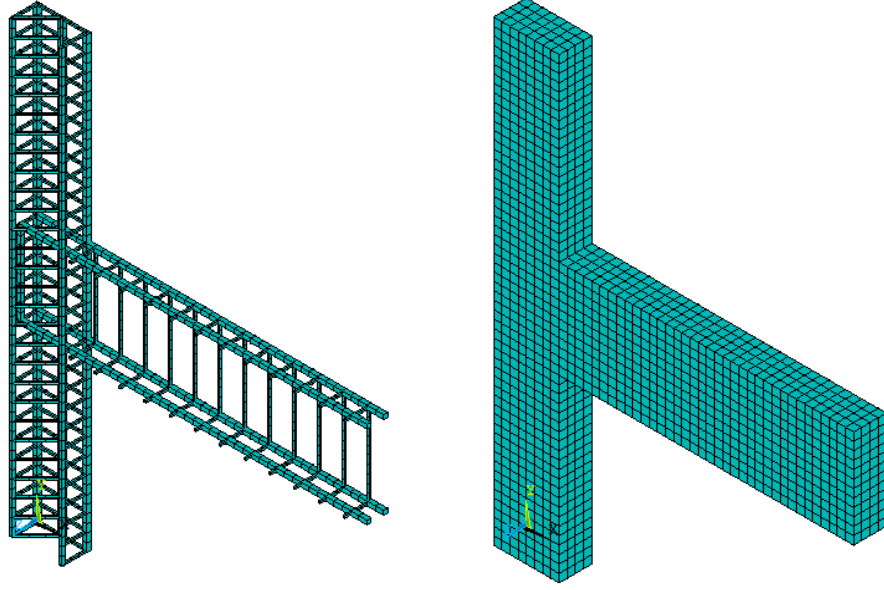
Hasarı ve yerleşmeyi engelleyecek parametreler birbirlerine bağlıdır ve bunların hiçbiri ayrıca malzeme özelliği olarak kabul edilemez. Bazant ve Jirasek [9] herhangi bir $m \geq 2,5$ (yerel karşılıklarıyla kaç kat değişeceğini belirleyen düzenleme parametresi) durumunun düzenli bir çözüm için geçerli olduğunu ve ayrıca Kaliske ve Zreid [20] c'nin (değişimin hangi alana yayılacağını belirleyen parametre) literatürde ki herhangi bir çalışmadan doğrudan alınamayacağını çünkü boyut etkisinin (size effect) kontrol edilen etkileşim aralığı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu belirlemiştir. Ancak gerçek göçme durumlarındaki hasar aşamaları gözlemlenerek bu parametre için kabaca tahmin yapılır. Hasar başlanğıcı için γ_0 bir eşiktir, çekmedeki ani hasarı temsil eder, basınç için büyük bir sınır tanımlanırken γ_{t0} sıfır olarak tanımlanır. β sabitleri mikro-düzlem eşdeğer gerilmeleri ile d_c^{mic} ,

d_t^{mic} arasındaki ilişki baz alınarak tanımlanır. Analizlerde kullanılan hasar ve yerelleşmemeye (non-lokalizasyona) ait kullanılan parametreler Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3 Beton elemanlar için mikro-düzlem hasar ve yerelleşmeme değişkenleri

Mikro-düzlem hasar parametreleri				Yerelleşmeme parametreleri	
γ_{co} (mm/mm)	γ_{to} (mm/mm)	β_t	β_c	c	m
2×10^{-4}	0	1500	2250	625	2,5

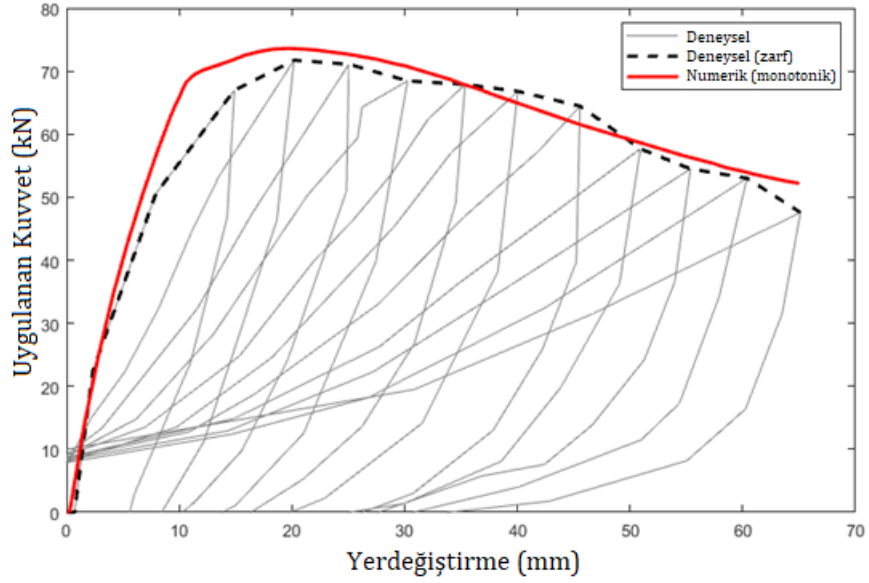
Betonarme eleman ve donatı elemanları arasında etkileşim paylaşılan düğüm noktalarıyla sağlanır. Bu nedenle tam aderans olduğu kabul edilmektedir. Sonlu elemanlar modelinde düşey eksen üzerinde simetri özelliği kullanılmıştır ve bu sayede modelin sadece yarısı oluşturulmuş, enine dönmeler sınırlandırılmıştır. Kolun üst ve alt yüzeyinde, dönmeler sadece kolon ortasındaki eksen boyunca sınırlandırılmış, moment düzleminde dönmelere izin vermekte ve her iki uçta da basit mesnet vardır. Yükleme iki aşamalı yapılmıştır. Kolon üst yüzeyine sabit 200 kN’a karşılık gelen 0,56 mm yerdeğiştirme tanımlanmaktadır. İkinci yükleme kısmında düşey yükleme kiriş ucunda monotonik artan bir yerdeğiştirme olarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar boyutu 25 mm seçilmiştir. Toplamda 4949 sonlu elemandan ve 21740 adet düğüm noktası içermektedir. Sonlu elemanlar modelinin donatı ve betonuna ait görsel Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5 Donatı ve betona ait sonlu elemanlar ağı

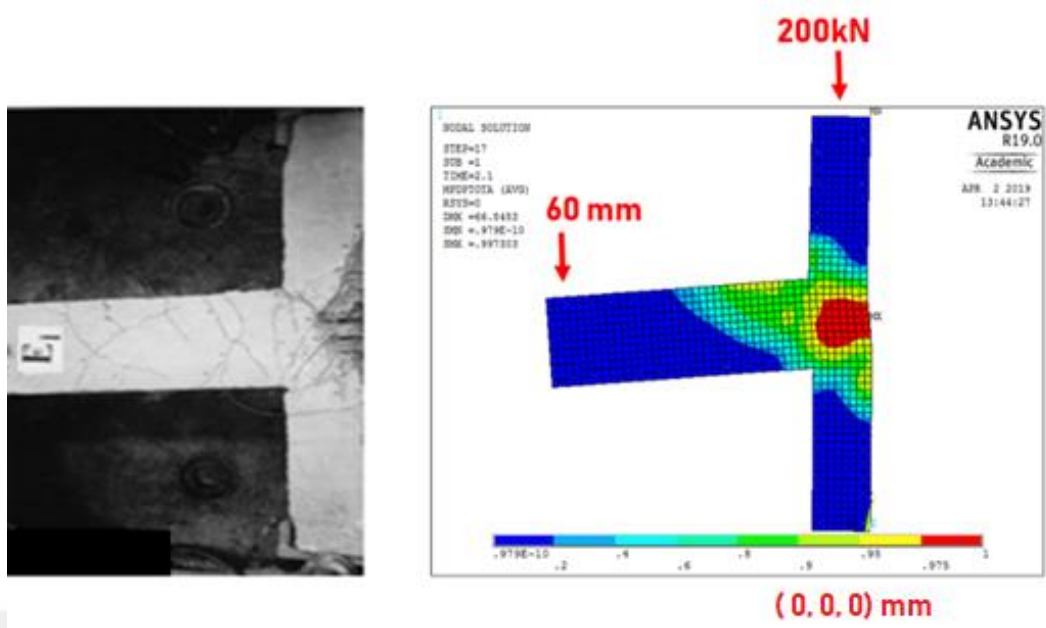
Birinci yükleme adımı 10 alt basamağa, ikinci yükleme adımı 100 alt basamağa bölünerek analiz yapılmıştır. Ayrıca birleşim bölgesinde dönme oluşmasını engellemek için kiriş bitimine 0,28 mm yerdeğiştirme uygulanmıştır. Kolon alt noktası ankastre (fixed) mesnet olarak kabul edildiği için tüm yönlerde sıfır (0, 0, 0) yerdeğiştirme uygulanmıştır.

Kabul edilen malzemeye ait varsayımları ve Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'de verilen malzeme parametrelerine sahip sonlu elemanlar modelinin kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi ve deneysel çalışmaya ait çevrimsel yükleme altındaki dayanım kaybını gösteren grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Sonuçlar örtük (implicit) çözümlü modelleme kullanılarak yapılmıştır ve bu analiz Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @2.80GHz 8,00GB RAM (64 bit) işlemcili bir bilgisayarda yaklaşık 1 saatte hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.6 Deneysel çalışma [21] ve mikro-düzlem ile birleştirilmiş plastisite hasar modelinin kuvvet- yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Sayısal model monotonik bir yükleme altında gerçekleştirilirken, deneysel model çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilmiştir ve bu yüzden hasar miktarı ve lokasyonu hakkında bir takım farklılıklar olacağı düşünülmektedir. Ancak sayısal çalışmaya ait sonuçlar bu yöntem kullanılarak iyi bir hasar tahmininde bulunabileceğini göstermiştir. Hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda kiriş-kolon arka birleşim bölgelerinde ciddi basınç hasarı gözlenirken kiriş ucu bölgesinde ise gerilme çatlakları görülmüştür. Deneysel hasar gözlemiyle kiriş-kolon birleşim bölgesi boyunca hasar dağılımı arasındaki karşılaştırılma Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 E1 Numunesi üzerinde hasar dağılımı [21] ve 65 mm monotonik yükleme altında sayısal modelde toplam hasar dağılımı

Sonlu elemanlar modelinin gerçekçi yük-yerdeğiştirme davranışını sergileyebildiğini ve plastik gerilme-hasar davranışına yönelik makul bir davranış üretebildiği Şekil 4.7’de görülmektedir. Bu tür bir metodoloji araştırmacılara kiriş-kolon birleşim bölgelerinin karmaşık üç eksenli gerilme davranışı hakkında ve tasarım aşamasında bilgi sağlamak için yardımcı olabilmektedir. Mevcut metodolojinin tasarım hakkında bilgilendirmesinden yararlanabildiğinin göstermek için referans model üzerinden Tablo 4.4’de gösterilen 9 farklı sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Bu modeller üzerinde kolon etriye aralığı, kiriş boyuna donatıların çapları ve kiriş etriyelerinin çapları parametre olarak seçilmiştir. Bunlar üzerinden yük kapasitesi, yumuşama ve süneklik durumları; ayrıca plastik mafsall oluşumları, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumları incelenecektir.

Tablo 4.4 Kullanılan modeller ve tasarım değerleri

Model Adı	Kolon Etriye Aralığı	Boyuna Donatı apı	Etriye Donatısı apı
R	50 mm	Ø14	Ø6
C1	100 mm	Ø14	Ø6
C2	150 mm	Ø14	Ø6
C3	200 mm	Ø14	Ø6
L1	50 mm	Ø12	Ø6
L2	50 mm	Ø16	Ø6
L3	50 mm	Ø18	Ø6
T1	50 mm	Ø14	Ø8
T2	50 mm	Ø14	Ø10
T3	50 mm	Ø14	Ø12

4.1.1 Kiriş-kolon Birleşim Bölgesi Modellerinin Analiz Sonuçları

Tablo 4.4'de tarif edilen modellerin analizleri yapılmıştır. Akma kiriş-kolon birleşim bölgelerinde plastikleşme sürecinin başlangıcı olarak değerlendirilmiştir. Süneklik yorumlanırken ANSYS Workbench'ten elde edilen Moment ve dönme verileriyle bir grafik oluşturulmuştur. Daha sonra bu grafik üzerinde elastik olmayan bölgenin başlangıcındaki dayanım kapasitesine eşit dayanımda elde edilen cevabın, elastik bölgenin sonunda elde edilen cevaba oranı Denklem 4.1'de ki gibi formüle edilmiş ve sonuçlar her modele ait diğer bilgilerle birlikte Tablo 4.5'de sunulmuştur.

$$R_{\theta} = (\theta_s - \theta_y) / \theta_y \quad (4.1)$$

Tablo 4.5 Modellere ait akmanın gerçekleştiği moment, süneklik oranı ve kapasite ön değerlendirme tablosu

Model Adı	ρ	M_y (kNm)	θ_y (rad)	θ_s (rad)	R_θ	Süneklik oranı	$\frac{N_d}{f_{ck}A_c}$	$\frac{V_e}{V_c}$	$\frac{M_{kol}}{M_{kir}}$	Hasarın beklendiği yer	Beklentinin karşılanma durumu
R	%0,8	65.64	0.0117	0.0358	2,06	%100	%30	>1	1,12	BB*	✓
C1	%0,8	63.74	0.0112	0.0248	1,23	%59	%30	>1	1,12	BB	✓
C2	%0,8	63.27	0.0112	0.0194	0,74	%36	%30	>1	1,14	BB	✓
C3	%0,8	62.98	0.0111	0.0180	0,62	%30	%30	>1	1,16	BB	✓
L1	%0,6	50.92	0.0098	0.0676	5,88	%285	%30	>1	1,22	BB	✓
L2	%1	72.39	0.0112	0.0281	1,52	%74	%30	>1	1,07	BB	✓
L3	%1,2	78.09	0.0111	0.0235	1,11	%54	%30	>1	1,09	BB	✓
T1	%0,8	65.83	0.0112	0.0494	3,42	%166	%30	>1	1,18	BB	✓
T2	%0,8	66.69	0.0112	0.0651	4,83	%234	%30	>1	1,18	BB	✓
T3	%0,8	67.92	0.0117	>0.07	4,99	%242	%30	>1	1,18	BB	✓

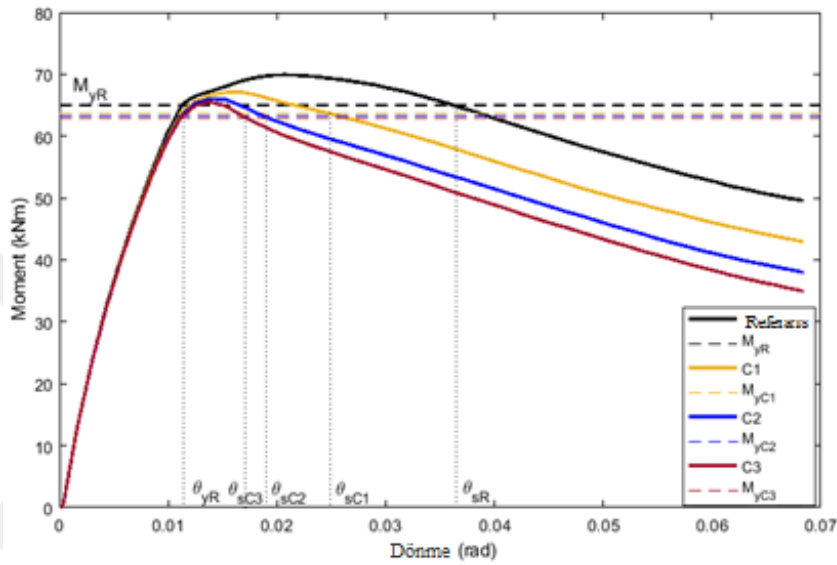
BB Birleşim bölgesi*

Yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi birleşim bölgelerinde kesme hasarı görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme modellerin karşılıklı etki diyagramları üzerinde normal kuvvet değerleri 200 kN'a karşılık gelen momentlerin oranı referans modeli için 1,12 kNm hesaplanmaktadır. Tsonos [21], M_{kol}/M_{kir} oranını yaptığı deneysel çalışma için 2,60 kNm olarak bulduğunu ifade etmektedir. Kesme hasarı için TDY'ye göre yapılan hesaplamalar ile ön görülen birleşim bölgesi hasarının oluşma durumu, her model için sağlanmıştır.

Bu çalışmalar kapsamında oluşturulan modellere ait moment-dönme grafikleri Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10'da her bir parametre grubu için verilmektedir. Değiştirilen

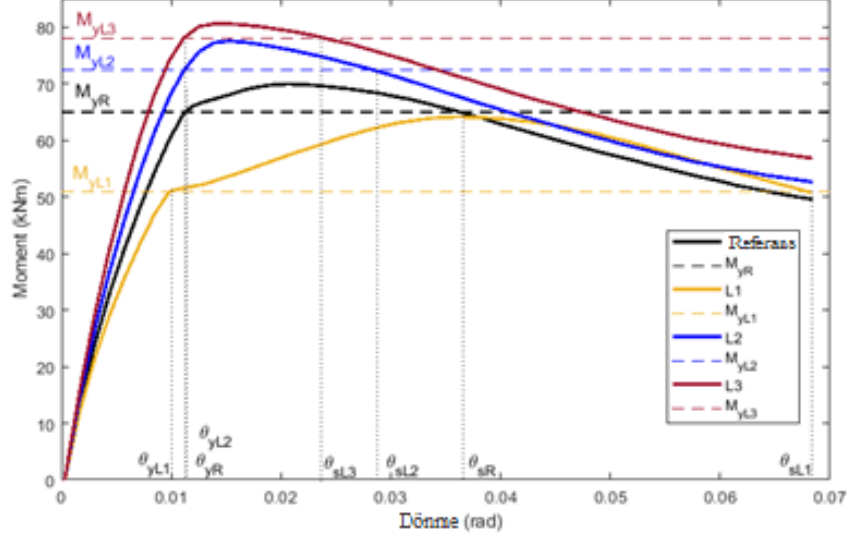
parametreler ve grafikler üzerinden yorumlanacaktır. Kolon etriye aralıkları 50, 100, 150 ve 200 mm olarak seçilmiş ve aralıkların artmasıyla da etriye adetleri azalmıştır. Yapılan bu değişimin yük taşıma kapasitesinde etkisinin anlamlı düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Yumuşama eğrisi ve süneklik azalması üzerinde önemli bir etkisinin olduğu açıkça gözlemlenmektedir.

Burada etriyenin çevreleme etkisinin sünekliğe olan etkisi görülmektedir. Etriye miktarı sargılama etkisinden dolayı süneklik üzerinde etki oluşturuyor.



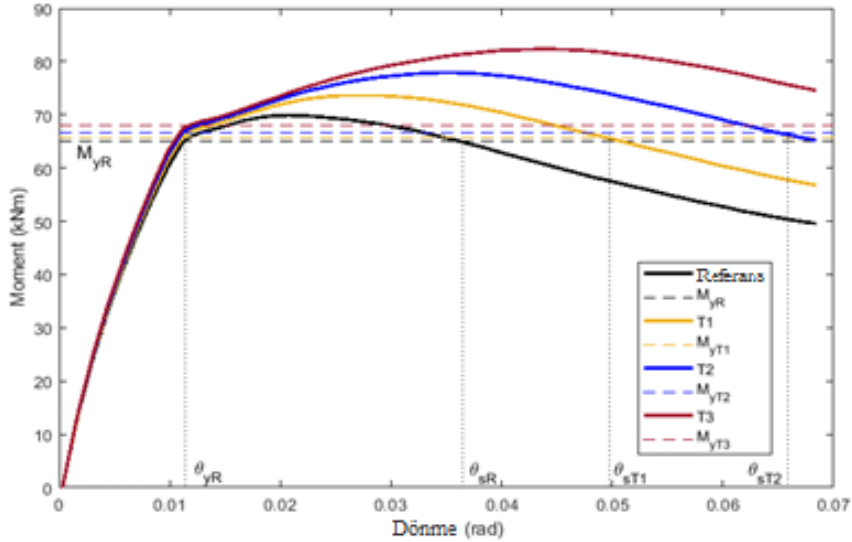
Şekil 4.8 Kolon etriye aralığının artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri

Şekil 4.9'a bakıldığında kolon ve kiriş boyuna donatılarının çapları $\emptyset 12$, $\emptyset 14$, $\emptyset 16$ ve $\emptyset 18$ olarak değiştirilmesi analizlerin sonucunda boyuna donatılardaki bu değişimin yük taşıma kapasitesini önemli derecede etkilediği görülmektedir. Ancak boyuna donatı çaplarındaki bu değişiminin yumuşamaya etkisinin anlamlı düzeyde olmadığı görülmektedir. Burada boyuna donatı alanı arttırıldığında düşey yükün sabit kalması durumunda sünekliğin düşmesi ilk bakışta beklenen bir durum değildir. Donatı miktarı arttıkça betona düşen düşey kuvvetin azalması dolayısıyla sünekliğin azalması sargılama etkisinin yeterli düşey basınç olmadığı için sağlanamadığı düşünülebilir.



Şekil 4.9 Boyuna donatıların çaplarının artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri

Şekil 4.10'a bakıldığında etriye donatısının çapları $\emptyset 6$, $\emptyset 8$, $\emptyset 10$ ve $\emptyset 12$ olarak değiştirilerek oluşturulan modellerin analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları etriye donatısının çaplarındaki değişimin taşıma yüküne etkisi çok sınırlı düzeyde olduğu ancak yumuşamaya ve dolayısıyla sünekliliğe etkisi önemli düzeyde fazla olduğu görülmektedir. Burada C1, C2, C3 örneklerinde de olduğu gibi sayı veya alan olarak etriye miktarının değişimi süneklilik üzerinde anlamlı etki oluşturmamıştır.



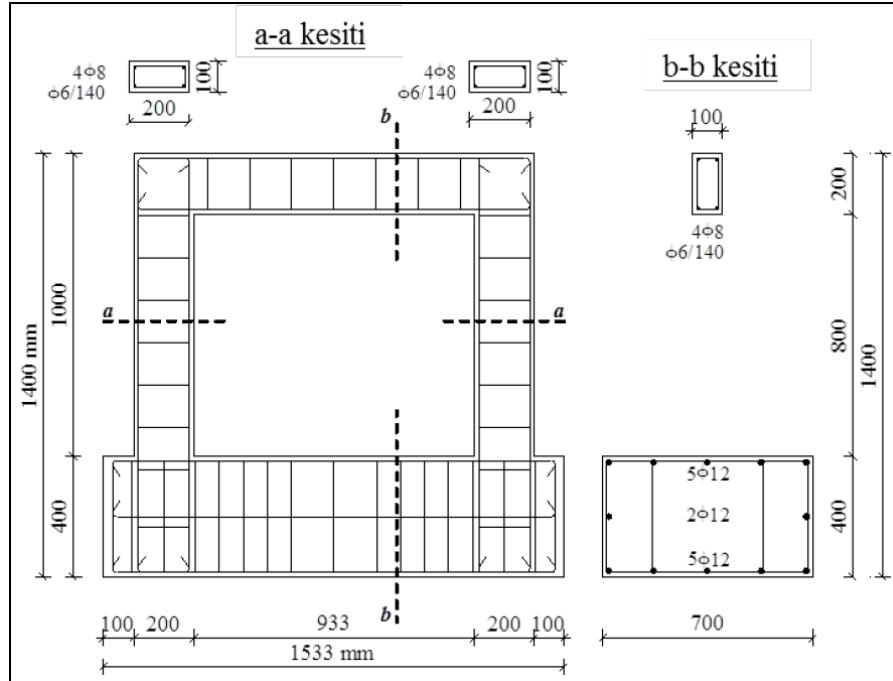
Şekil 4.10 Etriye çaplarının artmasıyla oluşturulan modellere ait moment-dönme eğrileri

4.2 Portal Çerçeve Sistem Modelleri

Bir önceki alt bölümde, tekil kiriş-kolon birleşim bölgesi modeli üzerinde kullanılan ve elde edilen sonuçların doğruluğunun kabul edilebilir olduğu görüldükten sonra aynı malzeme modeli farklı deneysel çalışmalar üzerinde kullanılacaktır.

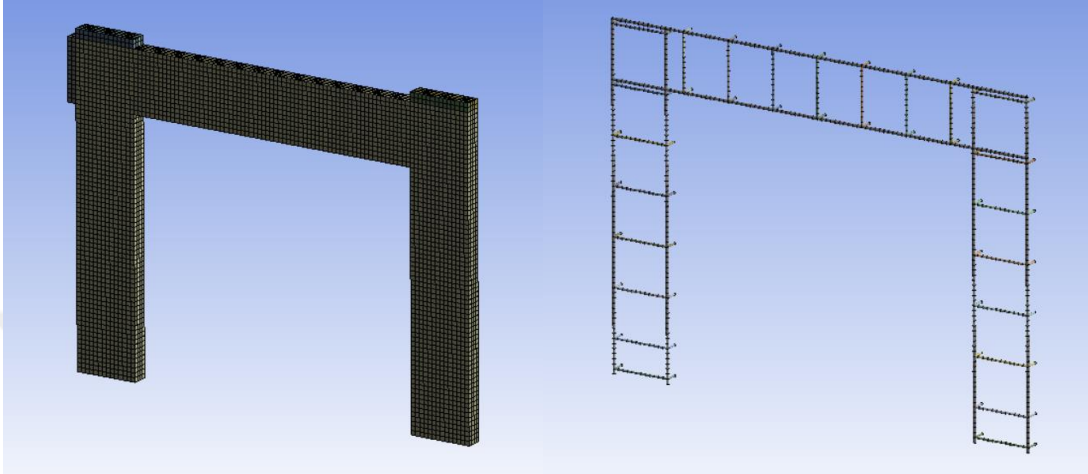
Bu amaçla, Ökten [40], 8 adet 1/3 ölçekli dolgu duvar kullanarak dolgu duvarların davranışı üzerine yapmış olduğu çalışmadaki betonarme ve duvarsız olan fiziksel modeli ele alınacaktır. Öncelikle deneysel sonuçları elde edilmiş olan bu örneğin sayısal modeli analiz edilecek ve sonuçlar kıyaslanacaktır. Doğruluğu kabul edilebilir olan model üzerinden parametrik olarak yeni portal çerçeve sistemler modellenecektir. Bu modellerin ANSYS Workbench'de monotonik yüklemeler altında plastik mafsallık durumu, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu, süneklikleri ve taşıma kapasiteleri incelenecektir.

Bu tez kapsamında 3. Bölümde anlatılan modelleme süreci ve malzeme metodolojisi başlıklarında gösterilen adımlar takip edilerek portal çerçeve model oluşturulmuştur. Ökten [40] kullandığı deneysel çalışmaya ait fiziki model Şekil 4.12'de verilmektedir. Düşey eksen üzerinde simetri özelliği kullanılarak Şekil 4.12'de verilen geometrinin düşey ekseninde sadece yarısı oluşturulmuştur.



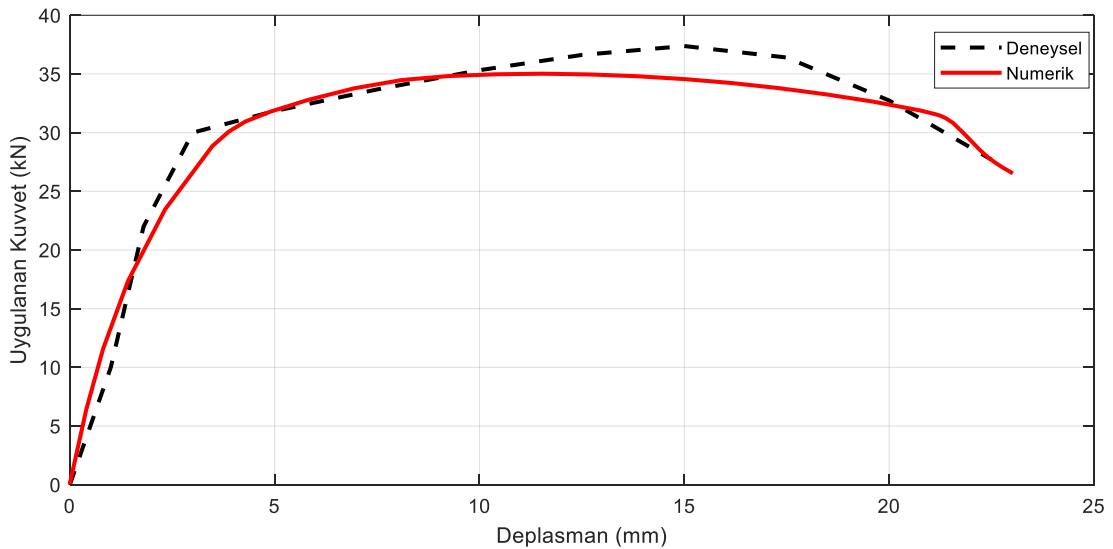
Şekil 4.12 Fiziki geometri, Ökten [40]

Beton için CPT215 elemanı, donatı için ise LINK180 elemanı kullanarak oluşturulan modelin 12828 adet eleman sayısı vardır. Bu analizler Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @2.80GHz 8,00GB RAM(64 bit) özelliklere sahip bilgisayarda yapılmıştır. Ortalama olarak bir analiz 1 saatlik sürede tamamlanmaktadır. Bu çerçeve modele ait beton ve donatılar üzerindeki sonlu elemanlar ağı Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 Referans modeline ait sonlu elemanlar ağı

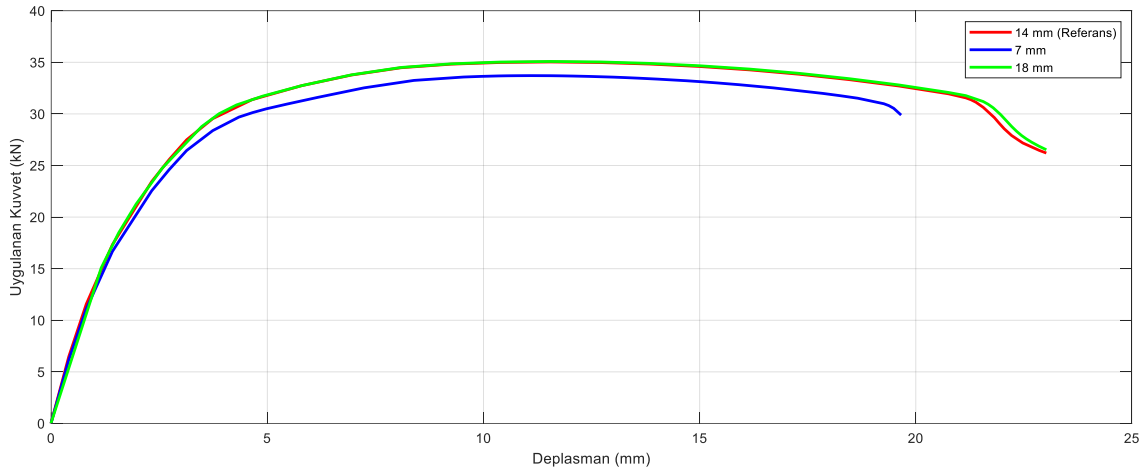
Analizde yerdeğiştirme kontrolü kullanılmıştır. Analiz sonucunda kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri sayısal ve deneysel çalışmalar için Şekil 4.14’de gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Deneysel çalışma Ökten [40] ve mikro-düzlem ile birleştirilmiş plastisite hasar modelinin kuvvet- yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

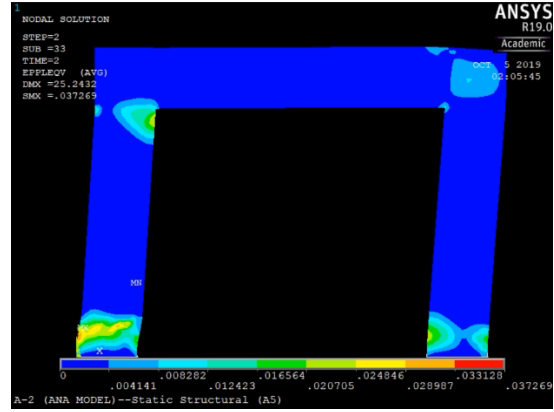
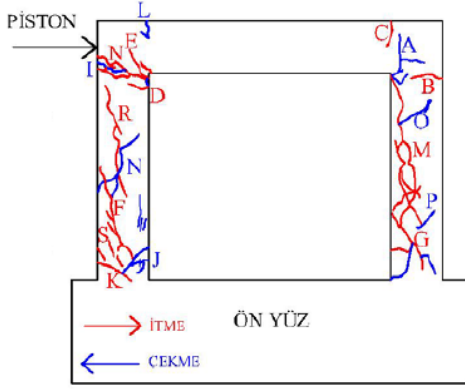
Şekil 4.14'e bakıldığından başlangıç rijitliği deneysel çalışmaya göre daha fazla elde edilirken donatının akma anına karşılık gelen moment kapasitesi hemen hemen aynı bulunmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlarda ulaşılan maksimum kapasitenin sayısal analizde bir miktar az bulunmasına rağmen kapasiteye ait sonuçların kabul edilebilir bir miktarda tüm yerdeğiştirme durumları için yakın olduğu görülmektedir.

Sonlu eleman yakınsama çalışması yapılarak elde edilen ve dikkate alınan her bir sonlu eleman ağına ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.15'de verilmektedir. Analiz süresini kısaltabilmek ve analizi çözdürüp programdan sonuç alabilmek adına eleman sayısı çok önemlidir. Bu nedenle 12828 elemanı olan sonlu eleman ağı değişen sonlu eleman boyutlarıyla kıyaslanarak Şekil 4.15 üzerinden seçilmiştir. Sonlu eleman sayısının artmasının sonuç üzerinde anlamlı etkiler oluşturmayacağı optimum düzeyde sonlu eleman sayısı seçilmelidir.



Şekil 4.15 Sonlu eleman ağı duyarlılık grafiği

Seçilen sonlu eleman ağına sahip modelde yapılan analizler sonucunda hasar durumları Şekil 4.16'da verilmektedir. Hasar başlangıç bölgesi ve oluşan çatlaklar arasında belli bir uyum sağlandığı görülmektedir. Sayısal çalışmaya ait son durum ve deneysel çalışmadan elde edilerek işaretlenmiş çatlak haritasından görüldüğü üzere çekme ve basınç çatlakları paralellik göstermektedir.



Şekil 4.16 Deneysel çalışma Ökten [40], çatlak haritası ve model hasarına ait son durum.

ANSYS Workbenchte oluşturulan Ökten Modeli [40] , referans modeli (KOLGEN2) olarak kabul edilecektir. Referans modeli üzerinde yapılan 22 adet parametrik inceleme Tablo 4.6 'da verilmektedir.

Tablo 4.6 Modellere ait parametrik değerler ve kapasite ön değerlendirilme tablosu

Model İsmi	ρ	Kolon (mm)		Kiriş (mm)		Etriye (adet)		Etriye (\emptyset , mm)		N (kN)	$\frac{N_d}{f_{ck}A_c}$	$\frac{V_e}{V_c}$	$\frac{M_{kol}}{M_{kir}}$	Hasırın beklendiği yer
		Genişliği	Derinliği	Genişliği	Kiriş	Kolon	Kiriş	Kolon						
KOLGEN1	%1,436	140	196	50	7	8	6	6	12,5	%13,3	<1	0,57	<1,2	Kol
KOLGEN2	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1,5	>1,2	Kir
KOLGEN3	%0,718	280	196	50	7	8	6	6	12,5	%6,6	<1	2	>1,2	Kir
KOLGEN4	%0,574	350	196	50	7	8	6	6	12,5	%5,3	<1	2	>1,2	Kir
KİRDER1	%1,196	196	168	50	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1,25	>1,2	Kir
KİRDER2	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRDER3	%0,898	196	224	50	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1,01	<1,2	Kol
KİRDER4	%0,798	196	252	50	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	0,73	<1,2	Kol

Tablo 4.6 Modellere ait parametrik değerler ve kapasite ön değerlendirilme tablosu
(devamı)

KİRGEN1	%1,251	196	196	<u>41</u>	7	8	6	6	12,5	%11	<1	1	<1,2	Kol
KİRGEN2	%1,026	196	196	<u>50</u>	7	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRGEN3	%0,869	196	196	<u>59</u>	7	8	6	6	12,5	%8	<1	1	<1,2	Kol
KİRGEN4	%0,754	196	196	<u>68</u>	7	8	6	6	12,5	%7	<1	1	<1,2	Kol
KİRET1	%1,026	196	196	50	<u>4</u>	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRET2	%1,026	196	196	50	<u>7</u>	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRET3	%1,026	196	196	50	<u>16</u>	8	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLET1	%1,026	196	196	50	7	<u>6</u>	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLET2	%1,026	196	196	50	7	<u>8</u>	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLET3	%1,026	196	196	50	7	<u>14</u>	6	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRETCAP1	%1,026	196	196	50	7	8	<u>6</u>	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRETCAP2	%1,026	196	196	50	7	8	<u>8</u>	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KİRETCAP3	%1,026	196	196	50	7	8	<u>10</u>	6	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLETCAP1	%1,026	196	196	50	7	8	6	<u>4</u>	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLETCAP2	%1,026	196	196	50	7	8	6	<u>6</u>	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLETCAP3	%1,026	196	196	50	7	8	6	<u>8</u>	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
KOLETCAP4	%1,026	196	196	50	7	8	6	<u>10</u>	12,5	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
N1	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	<u>6,25</u>	%4,7	<1	1	<1,2	Kol
N2	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	<u>12,5</u>	%9,5	<1	1	<1,2	Kol
N3	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	<u>18,7</u>	%14	<1	1	<1,2	Kol
N4	%1,026	196	196	50	7	8	6	6	<u>25</u>	%19	<1	1	<1,2	Kol

4.2.1 Portal Çerçeve Sistem Modellerinin Analiz Sonuçları

Oluşturulan modellere ait sonuçlar, incelendiği parametrelere ait başlıklara göre; kolon genişliği, kiriş derinliği ve genişliği, kiriş ve kolon etriye sayıları, kiriş ve kolon etriye çapları ve sabit yüklemenin değişimine göre sınıflandırılarak açıklanacaktır. Yapılacak analizlerde portal çerçeve sistem üzerinde sistemin sünekliği, taşıma gücündeki farklılık ve kiriş-kolon birleşim bölgelerindeki hasar durumları incelenecektir. Bu hasar durumları incelenirken ANSYS WB'den Mechanical APDL'e yazılan bir kod aracılığıyla oluşturulan videolardan izlenerek belirlenmiştir (Şekil 4.17).

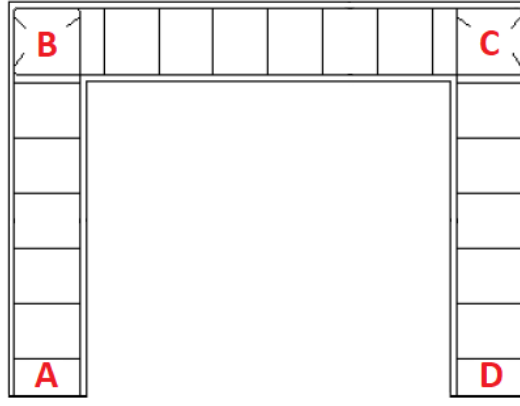
```
/post1
set, last
esel, s, mat,,1
/gline,1,-1
plnsol, eppl, eqv
antime, 100, 0.2, , 1,2, 1, 2
/anfile, save, conc, avi

esel, s, mat,,3
plnsol, eppl, eqv
/eshape,1
antime,100,0.2,,1,2,1,2
/anfile, save, steel, avi

finish
```

Şekil 4.17 APDL'de kullanılan kod

Analizlere ait videolardan incelenerek yapılan yorumlar, her analizin son adımına ait görselle desteklenecek aynı zamanda sonuçlara ait uygulanan kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri sunulacak ve her parametrik çalışmanın taşıma gücü ve sünekliklerinde ki değişim grafik ile desteklenerek açıklanacaktır. Her modelde oluşan hasar durumları yorumlanırken lokasyonların daha kolay izah edilebilmesi açısından portal çerçeve sistem Şekil 4.18'deki gibi bölgelere bölünmüştür.



Şekil 4.18 Portal çerçeve sistem bölgeleri

4.2.1.1 Kolon Genişliğinin Parametrik Değişimi

KOLGEN1 Modeli: Referans modelde 196 mm genişliğe sahip olan kolonlar, 140 mm genişliğe düşürülerek KOLGEN1 modeli oluşturulmuş ve davranışı incelenmiştir. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar durumu Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

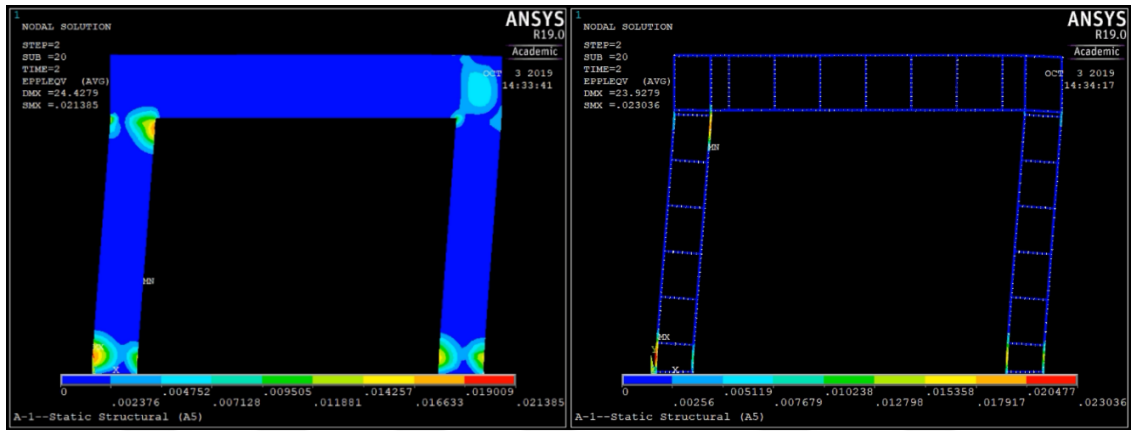
Tablo 4.7 KOLGEN1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar
KOLGEN1	Görelî ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,8	%0,85	%0,85	%2
	Hasar bölgesi	Beton-A	Donatı-A	Beton-B, D	Donatı- B	Donatı- A	Donatı-D, B
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Çekme, basınç	Basınç	Basınç	Çekme

Sistem %0,6 görelî öteleme miktarı, 21 kN yanal yük seviyesine ulaştığı anda kolon ayaklarında A bölgesinde ilk çekme çatlaklarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. %0,8 tepe noktası görelî öteleme miktarına ulaşıldığında B ve D bölgelerinde çekme ve basınç çatlakları oluşumu başlamıştır.

21 kN altında oluşan %0,7 görelî öteleme miktarında A bölgesindeki çekme donatısında akma başlamıştır. %0,85 görelî öteleme miktarı altında ise B bölgesinde

basınç donatısında A bölgesinde ise çekme donatısında akma başlamıştır. %2 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesi hariç tüm bölgelerde çekme ve basınca çalışan donatılarda akma olmuştur. D bölgesinde ise sadece çekme donatısında akma gözlemlenmiştir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLGEN1 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.19'da verilmiştir. Tablo 4.7 ve Şekil 4.19'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.19 KOLGEN1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

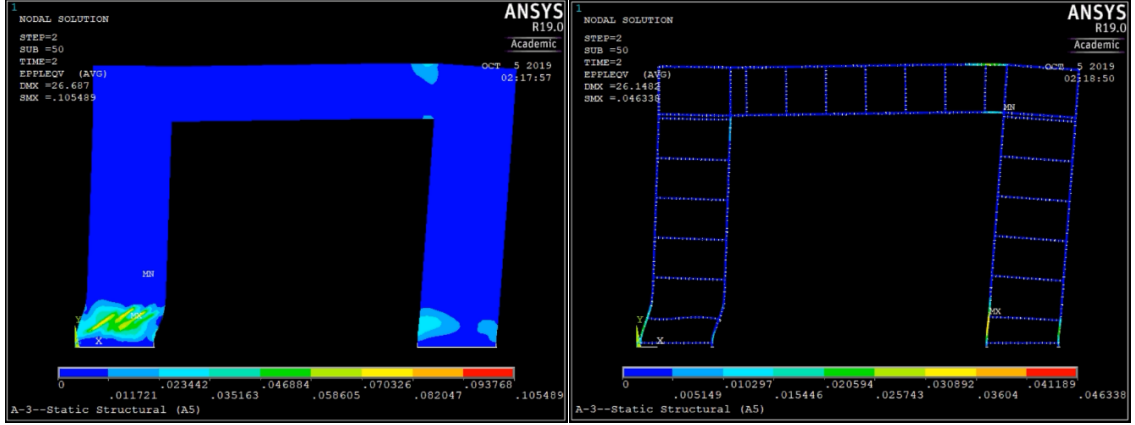
KOLGEN3 Modeli: Referans modeldeki 196 mm olan kolon genişliği arttırılarak 280 mm yapılmıştır. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kirişte beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8 KOLGEN3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar
KOLGEN3	Görel. ötel. mikt.	%1	%1	%1,2	%1,5	%1,7
	Hasar bölgesi	Beton-A	Donatı-A, C	Donatı-C	Beton- D	Beton-C
	Hasar cinsi	Kesme	Çekme	Çekme, basınç	Kesme	Çekme

Oluşturulan yeni geometrik özelliği sahip olan bu modelde analiz yapıldığında ilk çatlak A bölgesinde kesme çatlağı olarak oluşmuştur. İlk çatlağın meydana geldiği noktada bir değişiklik olmamış ancak öngörüldüğü gibi çatlak oluşumu daha yüksek görelî öteleme miktarı altında (%1) ortaya çıkmıştır. %1,5 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesinde kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. %1,7 C bölgesinde ise kiriş uçlarında hasar oluşmaya başlamıştır.

Donatılarda ise %1 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde çekme donatısında ve C bölgesinde kiriş ucunda üstteki boyuna donatıda akma başlamıştır. %1,2 görelî öteleme miktarı durumuna geldiğinde D bölgesinde çekme ve basınç donatısında akma başlamıştır. Sistem analiz sonuçlarında çizdirilen grafiğe göre %1,2 görelî öteleme miktarında taşıma gücünü kaybetmiştir. Bu görelî öteleme miktarı A bölgesinde ki donatının aktığı ve betonda çatlakların görüldüğü değere karşılık gelmektedir. Dolayısıyla A bölgesinde plastik mafsall oluşumuyla sistem taşıma gücünü kaybetmiştir diyebiliriz. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLGEN3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.20'de verilmiştir. Tablo 4.8 ve Şekil 4. 20'de görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce plastik mafsallaşma kirişlerde görülmesi gerekirken kolonlarda görülmektedir. Birleşim bölgesinde kesme hasarı beklenmemektedir ve modelde birleşim bölgesinde hasar oluşmamaktadır.



Şekil 4.20 KOLGEN3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişimler

KOLGEN4 Modeli: Referans modelde 196 mm olan kolon genişliği arttırılmış ve 350 mm'lik yeni bir model oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kirişte beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.9'da gösterilmiştir.

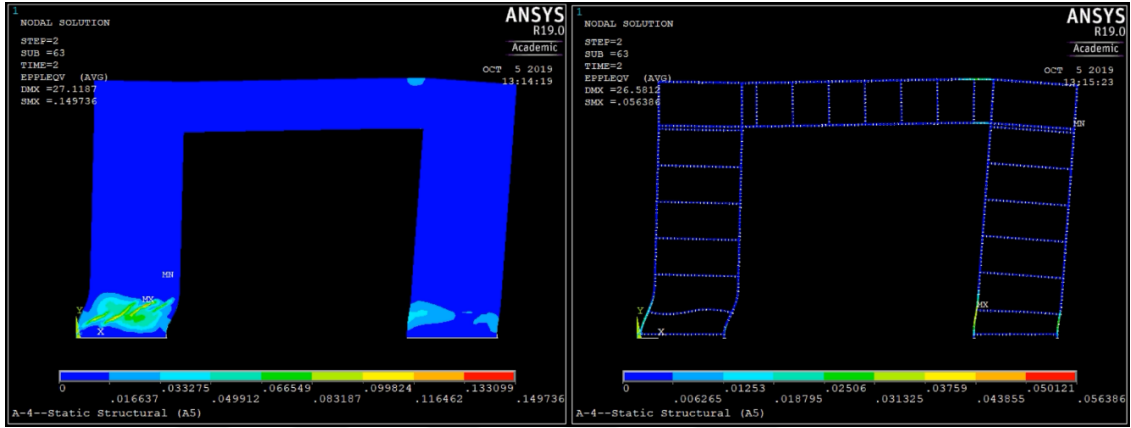
Tablo 4.9 KOLGEN4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar
KOLGEN4	Görel. ötel. mikt.	%0,5	%1	%1,1	%1,5	%2,1
	Hasar bölgesi	Donatı- A, D	Donatı- C	Beton-A	Beton- B	Beton- C
	Hasar cinsi	Çekme	Basınç	Kesme	Kesme	Kesme

Betonda %1,1 görel öteleme miktarı altında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %1,5 görel öteleme miktarı altında ise B bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %2,1 görel öteleme miktarı altında C bölgesinde kiriş uçlarında çatlak oluşumu gözlemlenmiştir.

%0,5 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgesinde çekme donatısında akma başlamıştır. %1 görel öteleme miktarı altında C bölgesindeki kiriş ucunda akma başlamıştır. Sistem %1,1 mm görel öteleme miktarından sonra taşıma gücünü kaybetmiştir. Bu durum A ve D bölgelerinde plastik mafsal oluşumunun başladığı

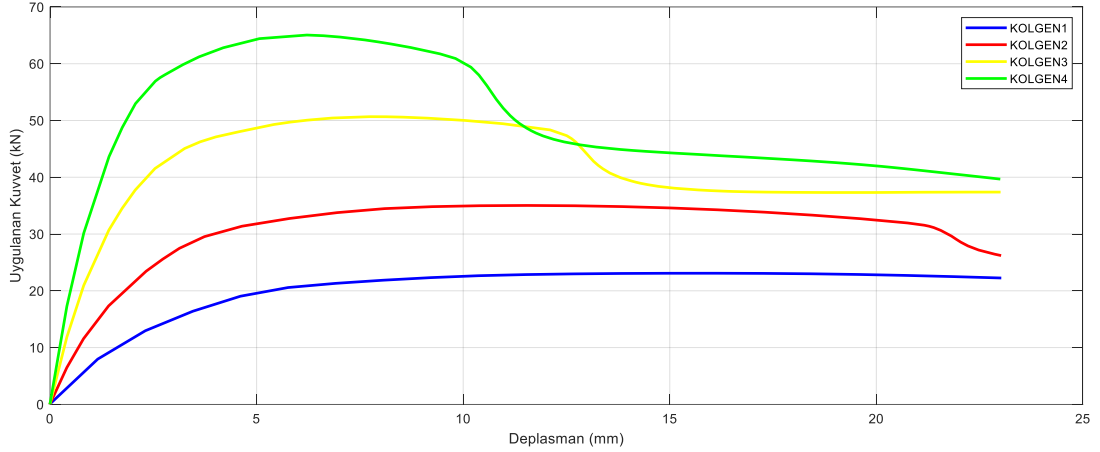
anlara denk gelmektedir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLGEN4 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.20’de verilmiştir. Tablo 4.9 ve Şekil 4.21’de görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi plastik mafsallaşma kirişlerde değil kolonlarda görülmektedir. Birleşim bölgesinde kesme hasarı beklenmemektedir ve modelde birleşim bölgesinde hasar oluşmamaktadır.



Şekil 4.21 KOLGEN4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeşirmeler

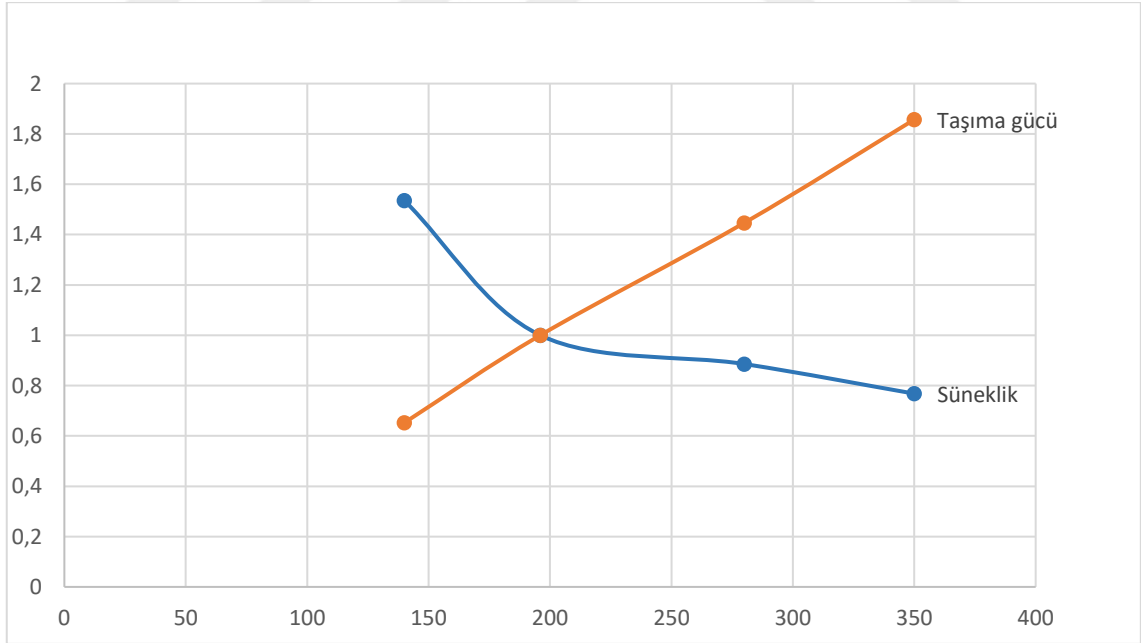
Kolon genişliği adına oluşturulmuş bu dört modelin uygulanan kuvvet altında gösterdikleri görelî öteleme miktarları Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Önceki grafiklerdeki taşıma güçlerinde ki kayıplara ait görelî öteleme miktarı verileri bu eğriler üzerinden alınmıştır. Ani rijitlik kaybının görüldüğü bölgeler veya böyle bir durum söz konusu değilse de elastik kısımda ki hareketin bittiği seviyeye geri dönülen an taşıma gücünün kaybolduğu an olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.22’de ki eğrilerden de görüldüğü gibi kolon genişliklerinin artması modelin taşıma gücünü artırırken, sünekliklerini azaltmıştır. Kolon boyutlarının değişmesiyle boyuna donatı oranını da değiştirmiş oldu. Kolon genişliği arttıkça boyuna donatı oranı azalmıştır. Ancak kolon genişliğinin artması ile başlangıç rijitlikleri ise artmaktadır.



Şekil 4.22 Kolon genişliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

Taşıma gücü ve süneklik değişimleri Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Karşılaştırma Şekil 4.23'de ki grafiklerin tepe noktaları üzerinden yapılırken, süneklik ise Denklem 3.15'e göre belirlenerek kıyaslanmıştır. Şekil 4.23'de taşıma gücü ve süneklik değerleri referans modelin ilgili değerlerine göre normalize edilmiştir. Şekil 4.23'de görüldüğü gibi, taşıma gücünde doğrusala yakın bir artış oluşurken süneklikte eğimi azalan bir azalış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.23 Kolon genişliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim

4.2.1.2 Kiriş Derinliğinin Parametrik Değişimi

Şekil 4.24'de gösterilen KİRDER1 Modeli: Referans modelde 196 mm olan kiriş derinliği azaltılarak 168 mm yapılmıştır. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kirişte beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

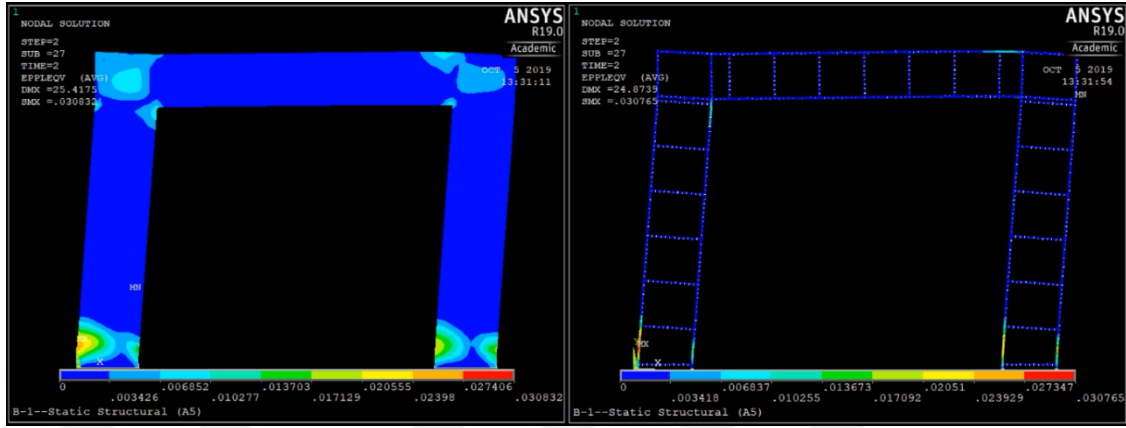
Tablo 4.10 KİRDER1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KİRDER1	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,7	%1,1	%1,2	%1,5	%2,2
	Hasar bölgesi	Beton- A	Donatı- A	Beton- D	Donatı- D	Donatı- C	Donatı- D, A	Beton- B	Beton- C
	Hasar cinsi	Eğilme	Çekme	Eğilme	Çekme	Çekme, basınç	Çekme, basınç	Kesme	Kesme

%0,6 görel. öteleme miktarı altında A bölgesinde eğilme çatlakları oluşumu başlamıştır. %0,7 görel. öteleme miktarı altında aynı şekilde D bölgesinde eğilme çatlakları görülmeye başlamıştır. Sonrasında B bölgesine denk gelen kolun uç bölgesinde çatlak oluşumu başlamıştır ve devamında da C bölgesindeki kiriş uçlarında çatlaklar başlamıştır. %1,5mm görel. öteleme miktarı altında B bölgesinde birleşim bölgesinde hasar oluşumu başlamıştır. %2,2mm görel. öteleme miktarı altında ise C bölgesi birleşim bölgesinde hasar görülmeye başlamıştır.

Donatılarda ise %0,6 görel. öteleme miktarı altında A bölgesi çekme donatısında akma başlamıştır. %0,7 görel. öteleme miktarı altında da D Bölgesi çekme donatısında akma başlamıştır. %0,7 görel. öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kolun uçlarındaki çekme donatısında da akma başlamıştır. %1,1 görel. öteleme miktarı altında C bölgesinde ki kiriş uçlarında üst donatılarda akma başlamıştır. %1,2 görel. öteleme miktarı altında önce D sonra A bölgesinde basınç donatılarında akma gözlemlenmiştir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRDER1 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.24'de

verilmiştir. Tablo 4.10 ve Şekil 4. 24'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan plastik mafsallaşma kolonlarda beklenirken, kirişlerde görülmektedir. Beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda A ve C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı da oluşmaktadır.



Şekil 4.24 KİRDER1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

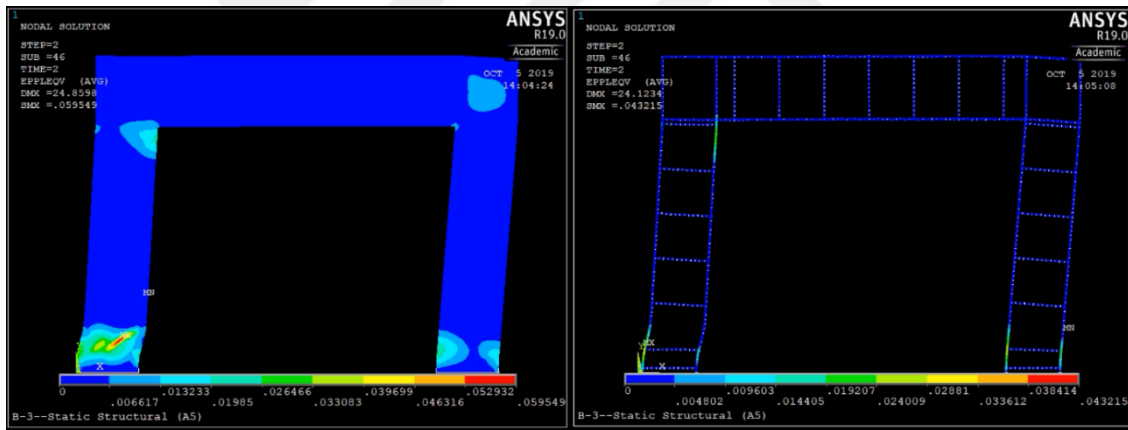
Şekil 4.25'de gösterilen KİRDER3 Modeli: Referans modelde 196 mm olan kiriş genişliği 224 mm'ye çıkarılarak yeni bir model oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.11'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11 KİRDER3 modelinin hasar süreci

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KİRDER3	Görelî ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,7	%0,9	%1,1	%1,1	%1,5	%2,3
	Hasar bölgesi	Donatı-A	Donatı-D	Donatı-B	Beton-A, D	Beton-B	Donatı-D	Donatı-A	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Çekme	Kesme	Basınç	Basınç	Basınç	Kesme

Bu modelin %0,9 görelî öteleme miktarında A ve D bölgesinde kesme çatlakları, B bölgesindeyse kolon uç kısmında basınç kırılmaları görülmeye başlamıştır. %2,3 görelî öteleme miktarı altındaysa C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı başlamıştır.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarında A bölgesinde, %0,7 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesinde çekme donatısında akma başlamıştır. %0,7 görelî öteleme miktarında B bölgesinde betonda hasar oluşan donatılarda akma görülmüştür. D bölgesi basınç donatısında %1,1 ve A bölgesinde ki basınç donatısında %1,5 görelî öteleme miktarında akma görülmüştür. Taşıma gücünü kaybettiği görelî öteleme miktarı %1,9 olarak belirlenmiştir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRDER3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.25'de verilmiştir. Tablo 4.11 ve Şekil 4. 25'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.25 KİRDER3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

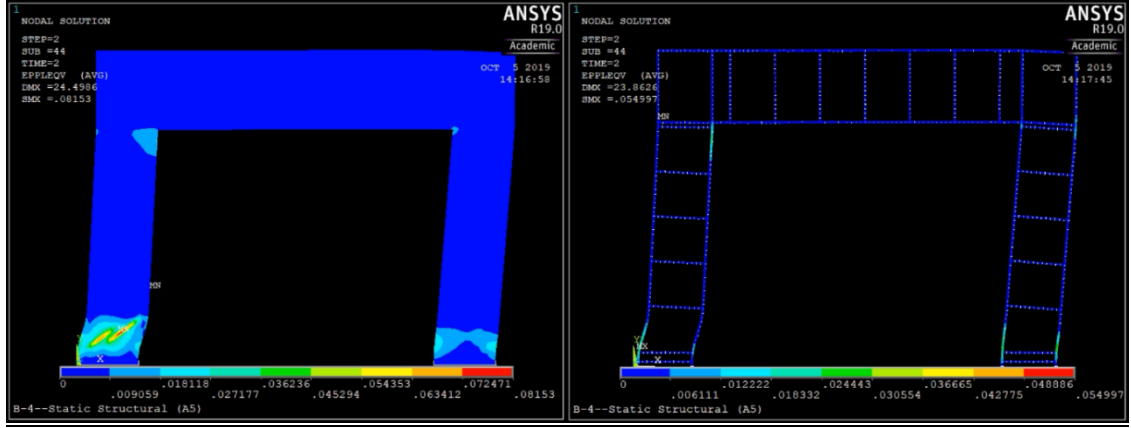
Şekil 4.26'da gösterilen KİRDER4 Modeli: Kiriş derinliği 196 mm olan referans modeli 252 mm'ye çıkarılarak yeni bir model oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.12'de gösterilmiştir.

Tablo 4.12 KİRDER4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar
KİRDER4	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,8	%1	%1,1	%1,1	%1,2
	Hasar bölgesi	Donatı-A	Donatı-D	Donatı-B	Beton-A	Donatı-D	Beton-D	Beton-D
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Çekme	Kesme	Basınç	Basınç	Çekme

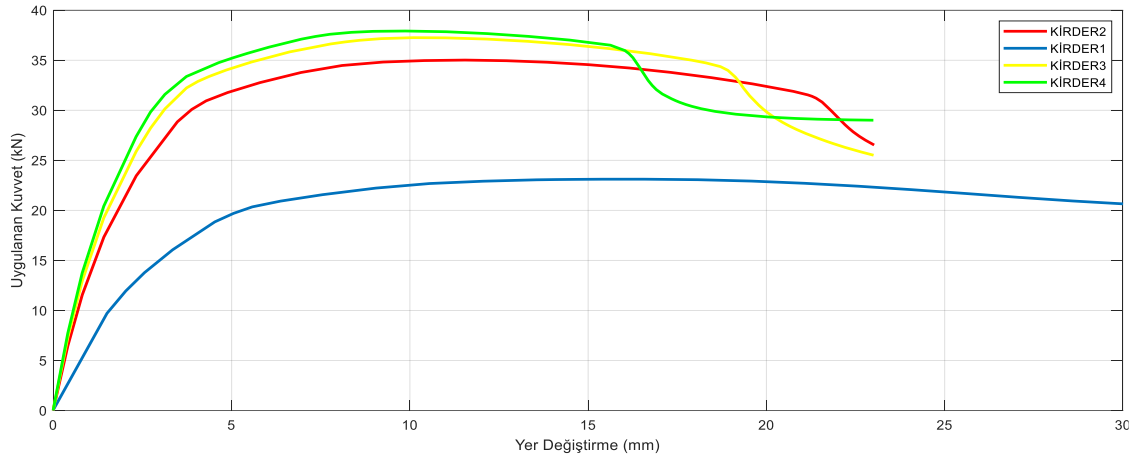
%1 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %1,1 görelî öteleme miktarında B bölgesine denk gelen kolon uçlarında hasar oluşumu başlamıştır. %1,2 görelî öteleme miktarı altında D bölgesinde beton çekme bölgesinde hasar oluşumu başlamıştır. Kirişlerde hiç hasar gözlemlenmemiştir. Bunun sebebi de kirişin kesitinin kolondan büyük olması ve sistemin güçlü kolon-zayıf kirişine aykırı bir tasarıma sahip olmasıdır.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarında A bölgesinde çekme donatısında akma başlarken, %0,7 görelî öteleme miktarı altında da D bölgesinde çekme donatısında akma başlamıştır. %0,8'de B bölgesine denk gelen kolon uçlarındaki donatıda akma başlamış ve sonrasında %1,1 görelî öteleme miktarı altında da D bölgesindeki basınç donatılarında akma gerçekleşmiştir. Son duruma ait görsel Şekil 4.26'da verilmiştir. Sistemin taşıma gücündeki kayıp %1,6 görelî öteleme miktarı altında başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRDER4 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.26'da verilmiştir. Tablo 4.12 ve Şekil 4.26'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Öngörüldüğü gibi yükleme bittiği anda birleşim bölgeleri içerisinde kesme hasarı oluşmamaktadır.



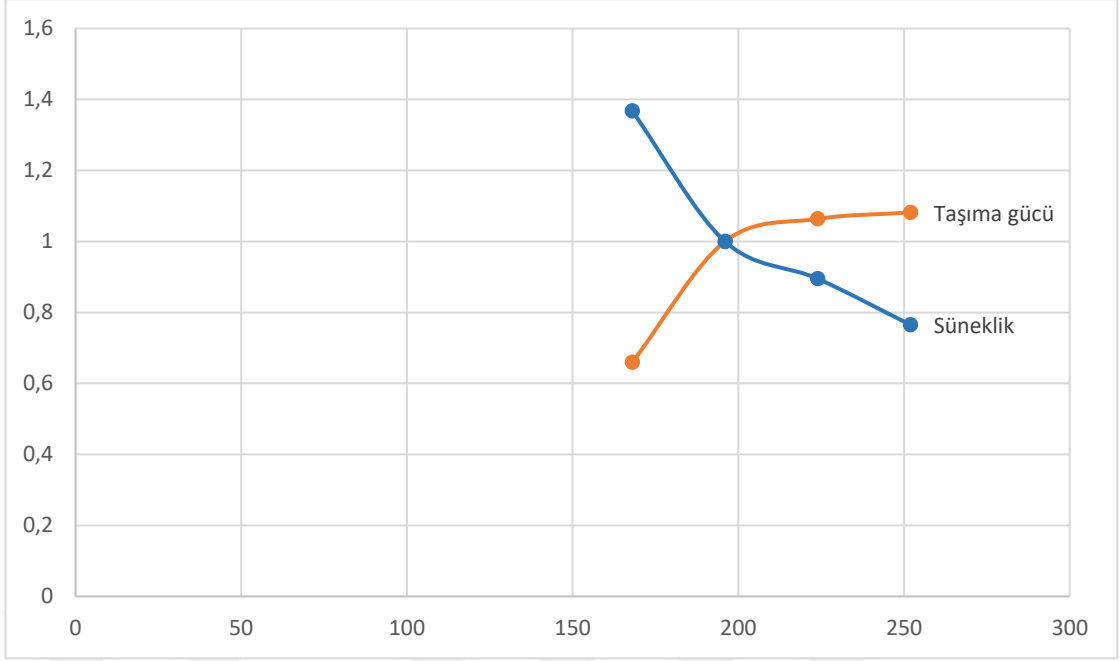
Şekil 4.26 KİRDER4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişiklikler

Taşıma güçleri Şekil 4.27’de ki eğrilerden de görüldüğü gibi kiriş derinliklerinin artması sistemin başlangıç rijitliği ve moment taşıma kapasitesini arttırırken, sünekliklerini ise azaltmıştır. Taşıma güçlerinin kaybolduğu görece öteleme miktarları belirtilirken ani rijitlik kaybı olan bölgelerdeki görece öteleme miktarı değerleri okunmuştur.



Şekil 4.27 Kiriş derinliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

Taşıma gücü ve süneklik değişimleri Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Karşılaştırma Şekil 4.27’de ki grafiklerin tepe noktaları üzerinden yapılırken, süneklik ise Denklem 3.15’e göre belirlenerek kıyaslanmıştır. Şekil 4.28’de taşıma gücü ve süneklik değerleri referans modelin ilgili değerlerine göre normalize edilmiştir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi, taşıma gücünde eğimi azalan bir artış oluşurken süneklikte ise azalış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.28 Kiriş derinliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim

4.2.1.3 Kiriş Genişliğinin Parametrik Değişimi

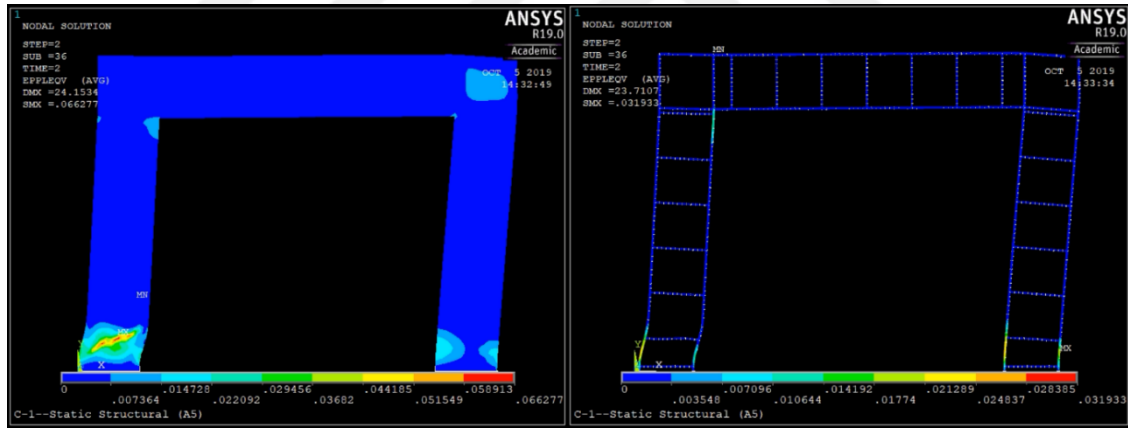
KİRGEN1 Modeli: Referans modelde 50 mm olan kiriş genişliği düşürülüp 41 mm yapılarak yeni bir model oluşturuldu. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.13'de gösterilmiştir.

Tablo 4.13 KİRGEN1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KİRGEN1	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,7	%0,9	%1,1	%1,1	%1,3	%2,1
	Hasar bölgesi	Donatı-A	Donatı-D	Donatı-B	Beton-A	Beton-D, B	Donatı-D	Donatı-A	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Çekme	Kesme	Basınç	Basınç	Basınç	Kesme

Bu modelin betonunda %0,9 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %1,1 görelî ötelemede hem D bölgesi hemde B bölgesinde çatlak oluşumu başlamıştır. %2,1 görelî öteleme miktarında ise C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı görülmüştür.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde çekme donatısında akma, %0,7 görelî öteleme miktarında da D bölgesinde çekme donatısında akma görülmüştür. %0,7 görelî öteleme miktarı altında B bölgesinde kolon ucunda betonun hasar aldığı bölgede akma başlamıştır. %1,1'de D bölgesinde basınç donatısında ve %1,3'de ise A bölgesinde basınç donatısında akma meydana gelmiştir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRGEN1 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.29'da verilmiştir. Tablo 4.13 ve Şekil 4.29'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.29 KİRGEN1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişirmeler

KİRGEN3 Modeli: Referans modelde 50mm olan kiriş genişliği 59mm'ye çıkarılarak yeni bir model oluşturulmuştur. Modelin hasar süreci Tablo 4.14'de gösterilmiştir.

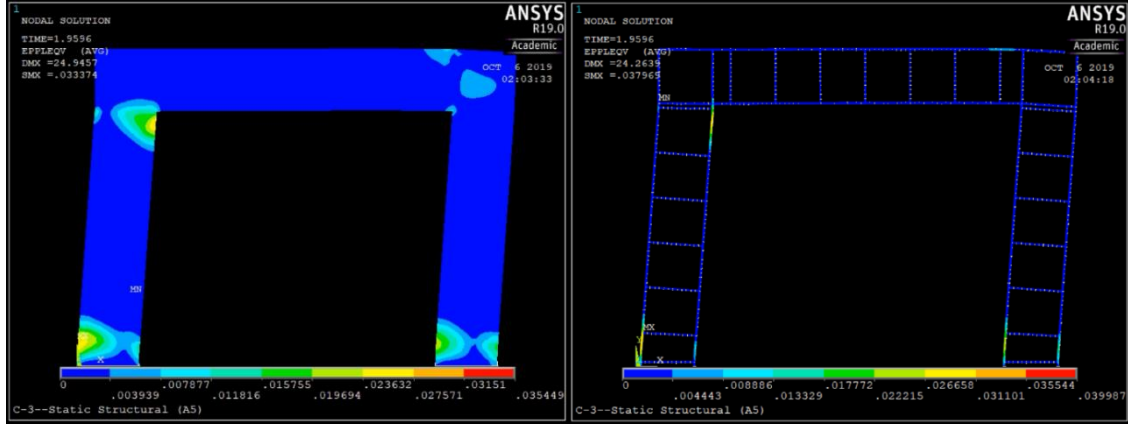
Tablo 4.14 KİRGEN3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KİRGEN3	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,7	%0,7	%0,7	%0,9	%1,3	%2,2
	Hasar bölgesi	Donatı-A	Donatı-D	Donatı-B	Beton-A, D	Beton-B	Beton-D, A	Beton-C	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Basınç	Çekme	Kesme

Görelî öteleme miktarı altında takip edilen plastik şekildeğiştirme davranışından görüldüğü üzere beton elamanlarda A ve D bölgesinde %0,7 görelî öteleme miktarı altında çekme bölgesinde eğilme çatlakları oluşmuştur. Aynı zamanda %0,7 görelî öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kolon uçlarında da hasar oluşumu başlamıştır. Önce %0,9 görelî öteleme miktarında D bölgesinde basınç çatlakları başlamışken daha sonra A bölgesinde basınç çatlakları görülmeye başlamıştır. Artan görelî öteleme miktarları sonucunda %1,3 görelî öteleme miktarında C bölgesine denk gelen kiriş uçlarında hasar oluşumu başlamış ve %2,2 görelî öteleme miktarında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı oluşmuştur.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarı altında A bölgesi çekme donatılarında, %0,7 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesi çekme donatılarında akma meydana gelmiştir. %0,7 görelî öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kolon uç bölgesindeki hasarın oluştuğu alandaki donatılarda da akma meydana gelmiştir. %1,4 görelî öteleme miktarı altında sırasıyla A, D bölgelerindeki basınç donatılarında ve C bölgesindeki kiriş uçlarındaki donatılarda akma meydana gelmiştir. Bu gözlemler A ve D bölgesinde plastik mafsallı oluştuğunu ifade etmektedir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRGEN3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.30'da verilmiştir. Tablo 4.14 ve Şekil 4.30'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen

şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.30 KİRGEN3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

KİRGEN4 Modeli: Referans modelde 50 mm olan kiriş genişlikleri arttırılarak 68 mm yapılmış ve yeni model oluşturulmuştur. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.15’de gösterilmiştir.

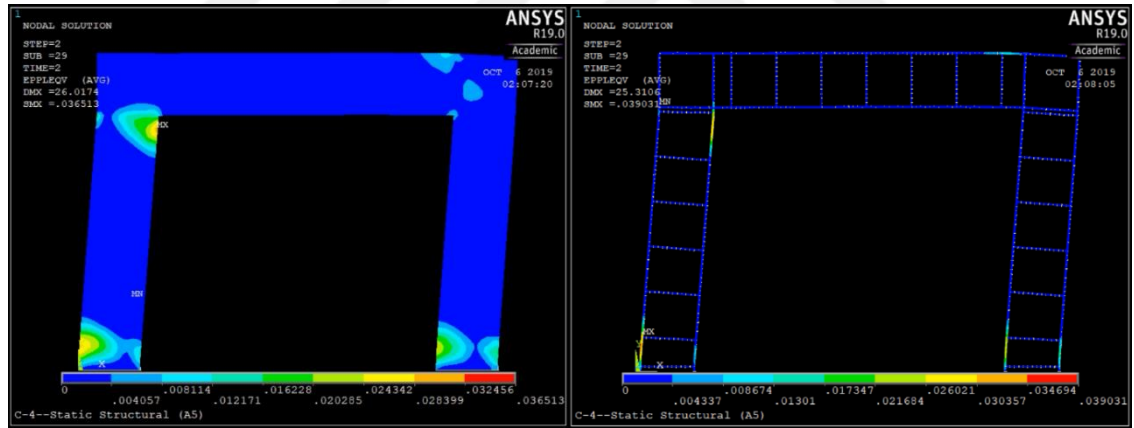
Tablo 4.15 KİRGEN4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar	9. Hasar
KİRGEN4	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,7	%0,7	%1,1	%1,2	%2	%2,4
	Hasar bölgesi	Donat-A	Beton-A, D	Beton-B	Donat-D	Beton-C	Beton-A, D, C	Donat-C, D	Donat-A	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Kesme

Betonda %0,6 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgelerinde çekme çatlakları oluşmaya başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altında B bölgesinde denk gelen kolon uçlarında çatlak oluşmu başlamıştır. %1,1 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgelerinde basınçtan dolayı ezilmeler oluşmaya ve aynı zamanda C bölgesine

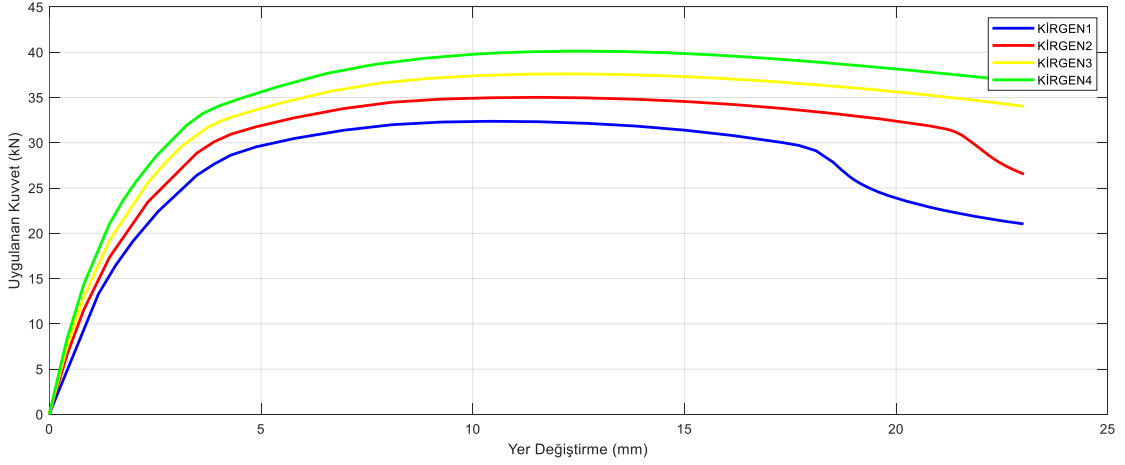
denk gelen kiriş uç bölgelerinde de çatlak oluşumu başlamıştır. Artan görelî öteleme miktarları sonucu %2,4 görelî ötelemede C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı görülmüştür.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarında A bölgesi çekme donatısında, %0,7 görelî öteleme miktarında D bölgesi çekme donatısında akma başlamıştır. %0,7 görelî öteleme miktarı altında B bölgesi kolon uçlarında betonda hasarın oluştuğu bölgedeki donatıda akma başlamıştır. %1,2 görelî öteleme miktarında C bölgesi kiriş uçlarındaki üst donatılarda akma başlamıştır. Sonrasında %1,4 görelî öteleme miktarı altında önce D bölgesinde basınç donatılarında ve %2 görelî öteleme miktarında A bölgesinde basınç donatılarında akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRGEN4 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.31'de verilmiştir. Tablo 4.15 ve Şekil 4.31'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmak üzeredir.



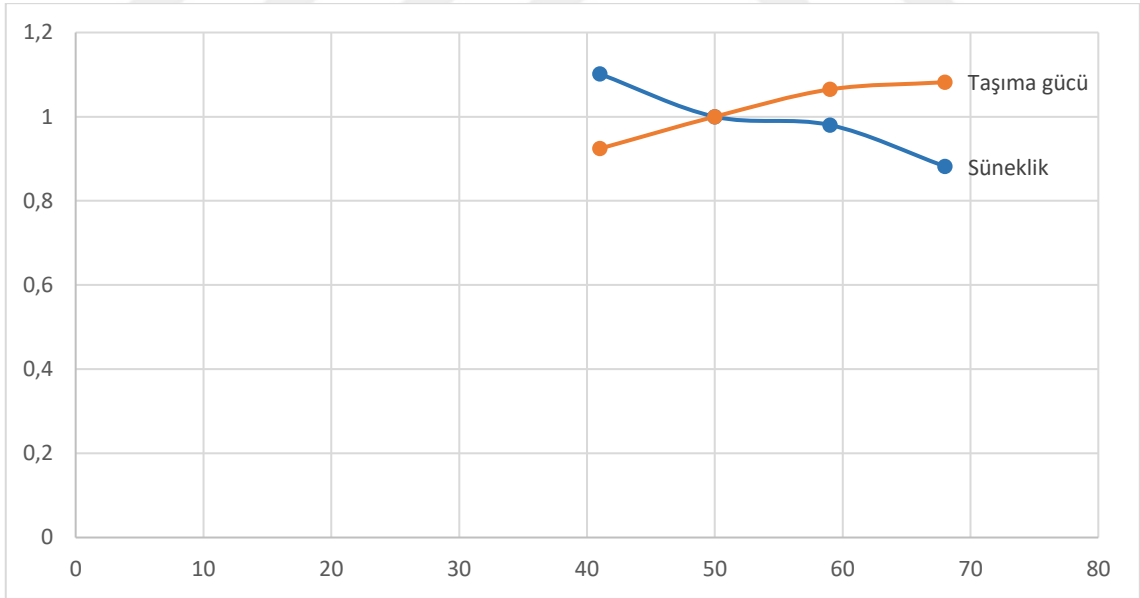
Şekil 4.31 KİRGEN4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişirmeler

Taşıma güçleri Şekil 4.32'de ki eğrilerden de görüldüğü gibi kiriş genişliklerinin artması modelin taşıma gücünü arttırırken, sünekliklerini ise azaltmıştır. Taşıma güçlerinin kaybolduğu görelî öteleme miktarları belirtilirken ani rijitlik kaybı olan bölgelerdeki görelî öteleme değerleri okunmuştur.



Şekil 4.32 Kiriş genişliklerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

Taşıma gücü ve süneklik değişimleri Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Karşılaştırma Şekil 4.32'de ki grafiklerin tepe noktaları üzerinden yapılırken, süneklik ise Denklem 3.15'e göre belirlenerek kıyaslanmıştır. Şekil 4.33'de taşıma gücü ve süneklik değerleri referans modelin ilgili değerlerine göre normalize edilmiştir. Şekil 4.33'de görüldüğü gibi, taşıma gücünde doğrusala yakın bir artış oluşurken süneklikte benzer paralellikte bir azalma gözlemlenmektedir.



Şekil 4.33 Kiriş derinliklerinin artmasıyla süneklik ve taşıma gücü değişimi

4.2.1.4 Kirişlerde Etriye Adedinin Parametrik Değişimi

KİRET1 Modeli: Referans modelde 7 adet etriyeden oluşan kirişlerde etriye sayısı 4 adete düşürülmüş ve yeni bir model oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.16'da gösterilmiştir.

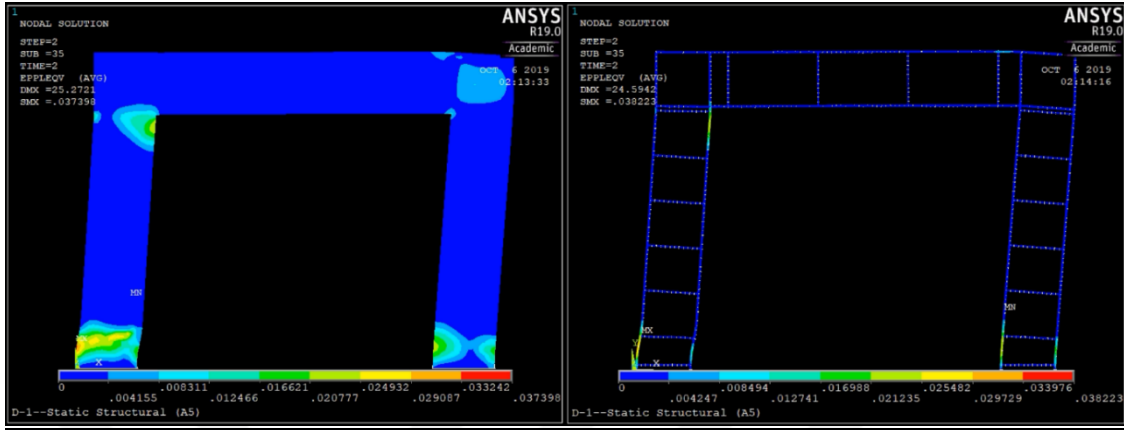
Tablo 4.16 KİRET1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar	9. Hasar
KİRET1	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,8	%0,9	%1,1	%1,5	%1,5	%2
	Hasar bölgesi	Donat-A	Beton-A	Donat-D	Beton-D, B	Beton-A, D	Donat-D	Donat-A, C	Beton-C	Beton-C
	Hasar cinsi	Kesme	Çekme	Kesme	Çekme	Basınç	Basınç	Basınç	Basınç	Kesme

Bu modelde betonda %0,6 görel öteleme miktarı altında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,8 görel öteleme miktarı altında ise hem D bölgesinde eğilme çatlakları başlamış hemde B bölgesine denk gelen kolon uçlarında hasar oluşumu başlamıştır. %0,9 görel öteleme miktarı altında A ve D basınç bölgelerindeki çatlakların oluşumu başlamış. Artan görel öteleme miktarları sonucu %1,5 görel öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen kiriş uçlarında hasar başlamış ve daha sonrasında %2 görel öteleme miktarında da C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı görülmüştür.

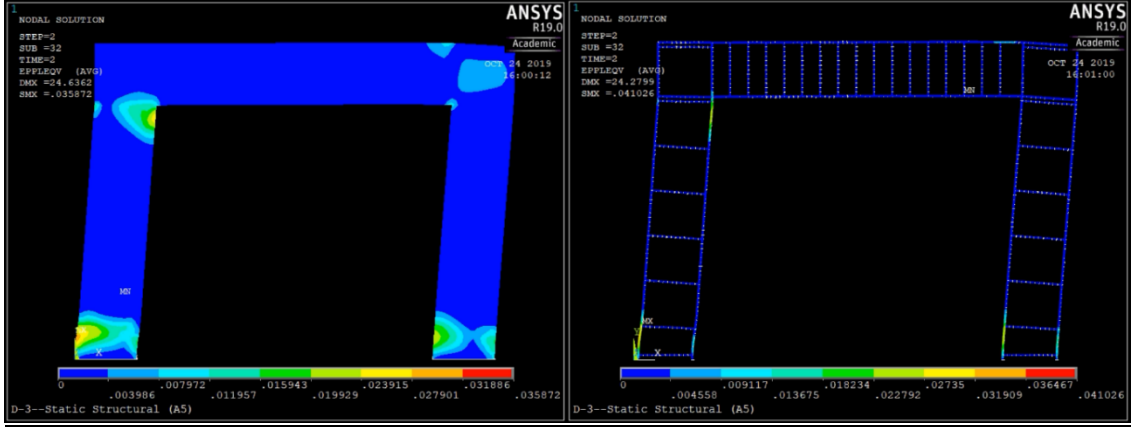
Donatılarda ise %0,6 görel öteleme miktarında A, %0,7 görel öteleme miktarı altında da D çekme bölgesindeki donatılarda akma başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kolon uç bölgelerinde akma başlamıştır. %1,1 görel öteleme miktarı altında D bölgesi, %1,5 görel öteleme miktarı altında ise A bölgesi basınç donatılarında akma başlamıştır. %1,5 görel öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen kiriş ucunda üst donatıda akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRET1 modelinin yükleme bittiği andaki

hasar durumu Şekil 4.34'de verilmiştir. Tablo 4.16 ve Şekil 4.34'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



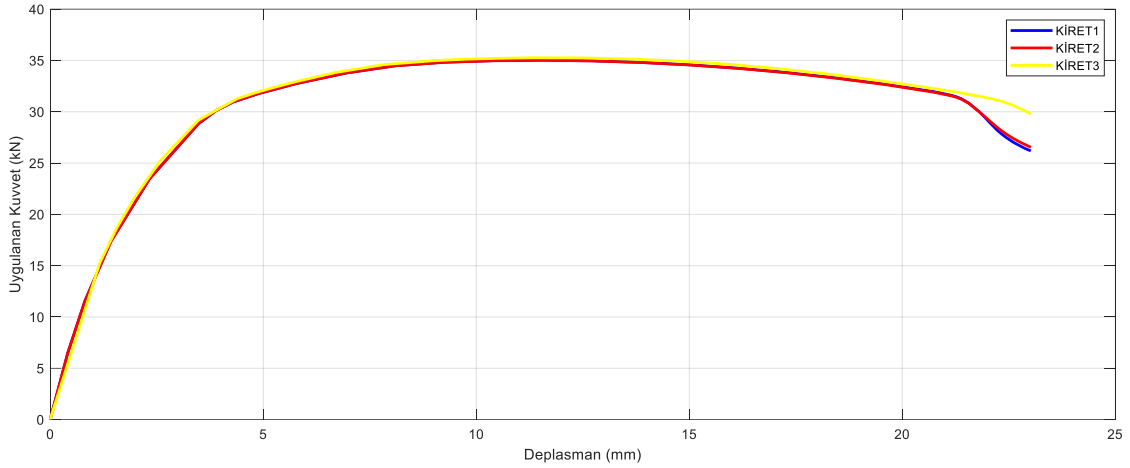
Şekil 4.34 KİRET1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

KİRET3 Modeli: Referans modelde kirişte 7 etriyeye sahip olan modelde etriye sayısı 16'ya çıkarılarak yeni bir model oluşturulmuştur. Ancak sistemde kirişle kolonun rijitliği hem elastik aşamada hemde elastik olmayan aşamada aynıdır. Referans modelde kirişte hiçbir hasar yoktur. Bu yüzden kirişte yapılmış olan etriye değişimleri analiz sonucunda bir farklılık yaratmamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRET3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.35'de verilmiştir. Şekil 4.35'den de görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.35 KİRET3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişimler

Taşıma güçleri Şekil 4.36'da ki eğrilerden de görüldüğü gibi kirişte etriye donatısının artması modelin taşıma gücüne veya sünekliklerin üzerinde bir etki oluşturamamıştır. Taşıma güçlerinin bittiği kısımdan sonraki eğriler arasında bir fark görülmektedir.



Şekil 4.36 Kiriş etriye adetlerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

4.2.1.5 Kolonlarda Etriye Adedinin Parametrik Değişimi

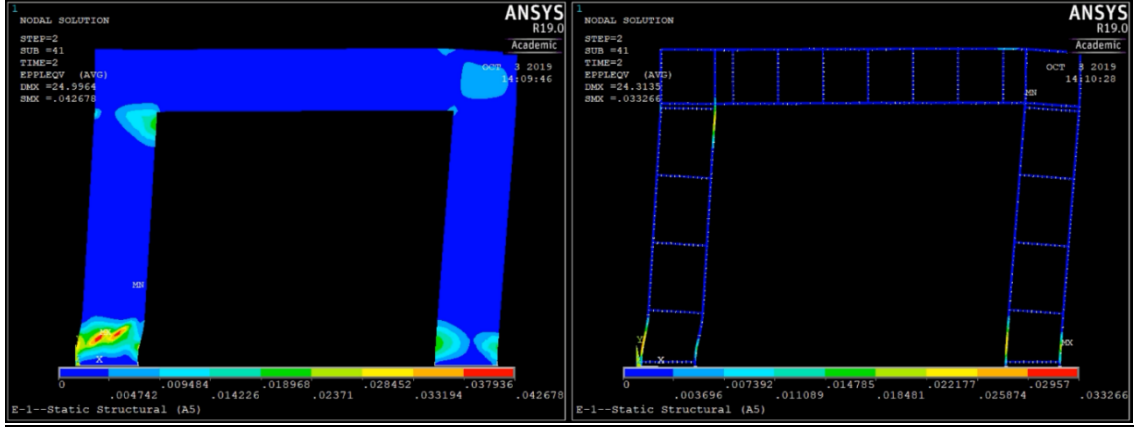
KOLET1 Modeli: Referans modelde 8 adet etriye bulunan kolonlarda ki etriye sayısı 6 adete düşürülerek yeni bir model oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.17'de gösterilmiştir.

Tablo 4.17 KOLET1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KOLET1	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,7	%0,8	%1,3	%1,4	%2
	Hasar bölgesi	Beton-A	Donatı-A, D	Beton-D	Donatı-B	Beton-B	Donatı-C	Donatı-A, D	Beton-C
	Hasar cinsi	Kesme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Kesme

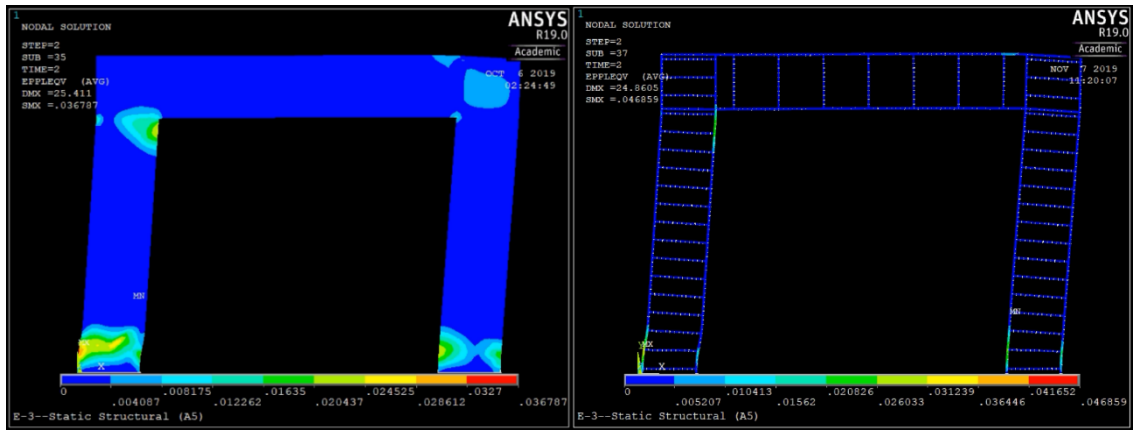
Bu model betonunda %0,6 görel öteleme miktarında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altındaysa D bölgesinde eğilme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,8 görel öteleme miktarında ise B bölgesinde kolon uçlarında çatlak oluşumu başlamıştır. Artan görel öteleme miktarı altında C bölgesi kiriş uçlarında çatlak oluşumu başlamış ve %2 görel öteleme miktarında ise C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı gözlemlenmiştir.

Donatılarda ise %0,6 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgelerinde çekme donatılarında akma başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altında B bölgesinde akma başlamıştır. Görel öteleme miktarı %1,3 durumuna geldiğinde ise C bölgesine denk gelen kirişin üst donatısında akma başlamıştır. %1,4 görel öteleme miktarında A ve D bölgesi basınç donatılarında akma başlamıştır. Sistemin taşıma gücünü kaybettiği görel öteleme miktarı yaklaşık %2 olarak grafikten okunabilir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLET1 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.37'de verilmiştir. Şekil 4.37'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



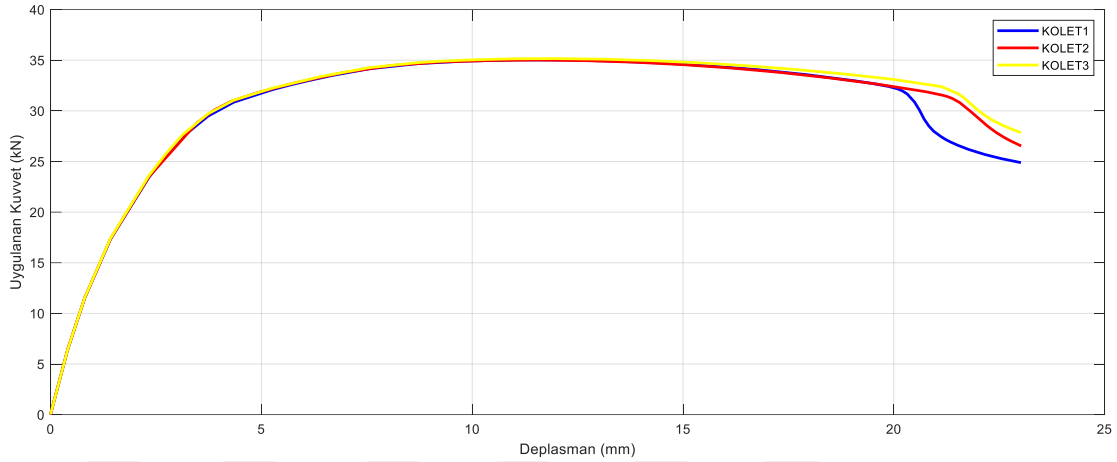
Şekil 4.37 KOLET1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

KOLET3 Modeli: Referans modelde 8 etriyeli olan kolonlar 14 adet etriyeye çıkarılmış ve yeni model oluşturulmuştur. Kolodaki etriyelerin artış veya azalışı hiçbir şeyi etkilememiştir. Bunu sebebi kolonun “S” şeklinde bir hareket yapmamasından kaynaklanmaktadır. Donatılarda bir burkulma görülmediği yani etriyeler çalışmadığı için adetlerinin değişmiş olması sistem davranışında bir değişikliğe sebep olmamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLET3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.29’da verilmiştir. Şekil 4.29’dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.38 KOLET3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

Taşıma güçleri Şekil 4.39’da ki eğrilerden de görüldüğü gibi kolonda etriye donatı adedinin artması veya azalması modelin taşıma gücünü veya süneklik düzeyine etki etmemiştir. Yalnızca taşıma güçlerinin bittiği kısımdan sonraki eğriler arasında bir fark görülmektedir.



Şekil 4.39 Kolon etriye adetlerinin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

4.2.1.6 Kirişlerde Etriye Çapının Parametrik Değişimi

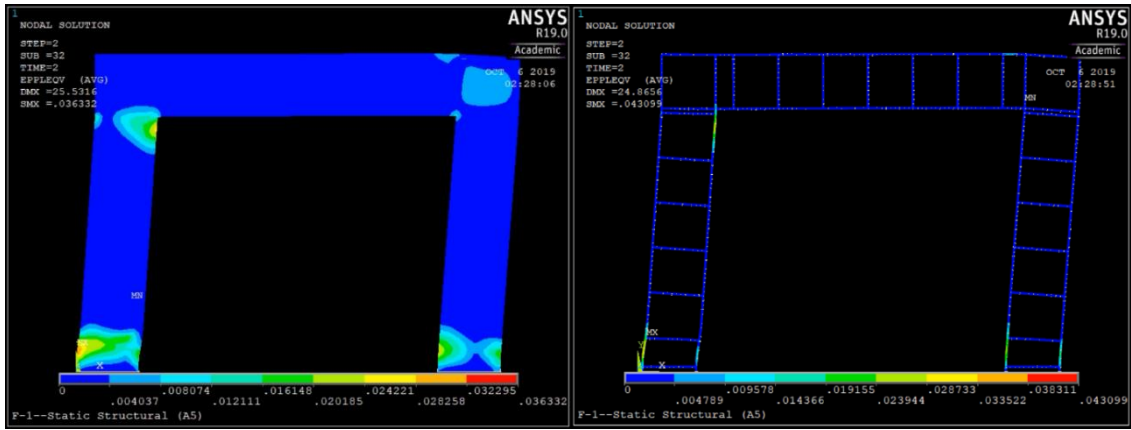
Şekil 4.40’da gösterilen KİRETCAP2 Modeli: Referans modelde Ø6’lık etriyelerden oluşan kiriş etriyeleri Ø8’e yükselttilerek oluşturulmuştur. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.18’de gösterilmiştir.

Tablo 4.18 KİRETCAP2 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KİRETCAP3	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,8	%1	%1,2	%1,6	%2
	Hasar bölgesi	Donatı- A, D	Beton- A	Beton- D, B	Donatı- B	Beton- A, D	Donatı- D	Donatı- A, C	Beton- C
	Hasar cinsi	Çekme	Kesme	Çekme	Çekme	Kesme	Basınç	Basınç	Kesme

Bu model betonunda %0,6 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde ilk kesme çatlağı başlamıştır. %0,7 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesinde eğilme çatlağı, B bölgesinde ise kolon uçlarında çatlak oluşumu başlamıştır. %1 görelî öteleme miktarı altında A ve D basınç bölgelerinde çatlak oluşumu başlamıştır. %1,5 görelî öteleme miktarında C bölgesinde kiriş uçlarında çatlak oluşumu başlamıştır. Artan görelî öteleme miktarı miktarıyla birlikte %2 görelî öteleme miktarı altında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı oluşmuştur.

Donatıda ise %0,6 görelî öteleme miktarı altında A ve D bölgesinde çekme donatılarında akma meydana gelmiştir. %0,8 görelî öteleme miktarında B bölgesine denk gelen kolon ucunda akma başlamıştır. %1,2 görelî öteleme miktarında D bölgesinde basınç donatısı, %1,6 görelî öteleme miktarında da A bölgesinde basınç donatısı akmıştır. %1,6 görelî öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen kiriş ucundaki üst donatıda akma başlamıştır. Grafikten %2,1 görelî ötelemeye sistemin taşıma gücünü kaybettiği görülmektedir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRETCAP2 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.40'da verilmiştir. Tablo 4.18 ve Şekil 4.40'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.40 KİRETCAP2 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğıştirmeler

Şekil 4.41'de gösterilen KİRETCAP3 Modeli: Referans modelde Ø6'lık etriyelerden oluşan kiriş etriyeleri Ø10'a yükseltilerek oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü

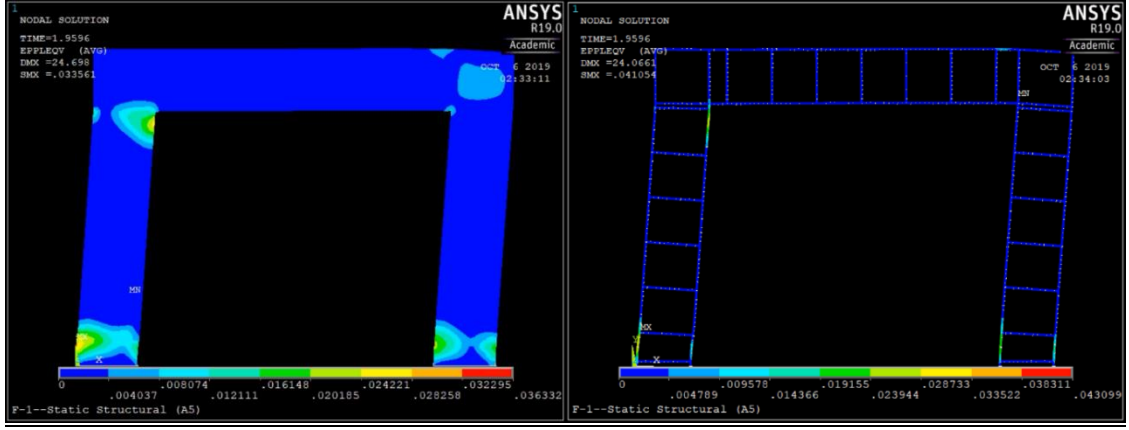
gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.19'da gösterilmiştir.

Tablo 4.19 KİRETCAP3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar	9. Hasar
KİRETCAP 4	Görelî ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,8	%1	%1,2	%1,3	%1,7	%2
	Hasar bölgesi	Beton-A, D	Donat-A	Beton-B	Donat-B	Beton-A, D	Donat-D	Beton-C	Donat-A	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Basınç	Basınç	Basınç	Kesme

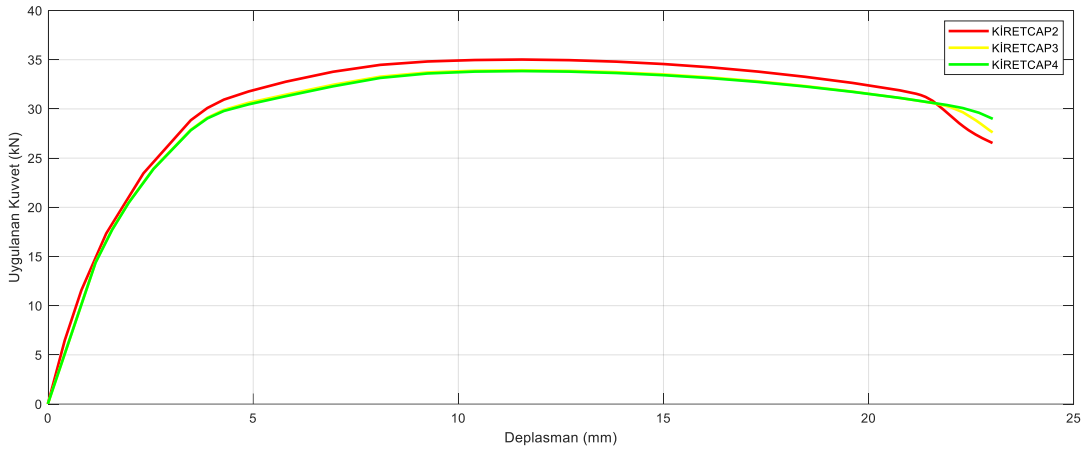
%0,6 görelî öteleme miktarı altında A ve D bölgelerinde eğilme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,7 görelî öteleme miktarı altında B bölgesinde kolon ucularında çatlak oluşumu başlamıştır. %1 görelî öteleme miktarında A ve D bölgesinde basınç ezilmelerinden çatlak oluşumu başlamıştır. %1,3 görelî öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen giriş ucunda çatlak oluşumu başlamıştır. %2 görelî öteleme miktarı altında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı oluşmuştur.

Donatılarda ise A bölgesinde çekme donatısı %0,6 görelî öteleme miktarı altında akmaya başlamış ve sonrasında %0,8 görelî öteleme miktarı altında D bölgesinde çekme donatısında akma gerçekleşmiştir. %0,8'de B bölgesine denk gelen kolon ucunda da akma başlamıştır. %1,2 de D bölgesi basınç donatısında %1,7 de A bölgesi basınç donatısında akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KİRETCAP3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.41'de verilmiştir. Tablo 4.19 ve Şekil 4.41'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklenildiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.41 KİRETCAP3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişimler

Taşıma güçleri Şekil 4.42’de ki eğrilerden de görüldüğü gibi kolonda etriye donatı çapının artması anlamlı bir etki oluşturmamıştır. Eğriler modelin taşıma gücünü çok az bir miktar azaldığını sünekliğin de aynı şekilde çok az düzeyde arttığını göstermektedir. Gözlemlenen bu durum bir sonuç çıkarmak için yeterli olmamıştır.



Şekil 4.42 Kiriş etriye çaplarının değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

4.2.1.7 Kolonlarda Etriye Çapının Parametrik Değişimi

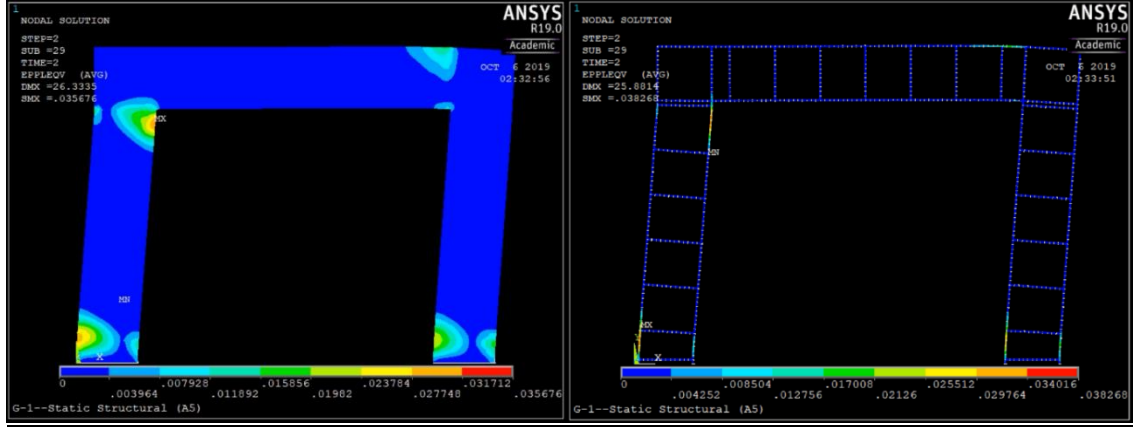
Şekil 4.43’de gösterilen KOLETAP1 Modeli: Referans modelde Ø6’lık etriyelerden oluşan kolon etriyeleri Ø4’e düşürülerek oluşturulmuştur. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.20’de gösterilmiştir.

Tablo 4.20 KOLETAP1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar
KOLETAP1	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,7	%0,7	%0,9	%1	%1	%1,5
	Hasar bölgesi	Beton-A, D	Beton-B	Donatı-A, D, B	Beton-C	Beton-A, D	Donatı-C	Donatı-A, D
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Kesme	Kesme	Basınç	Kesme	Basınç

Bu model betonunda %0,6 görel öteleme miktarı altında A bölgesinde ve D bölgesinde eğilme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kiriş uçlarında hasar oluşumu başlamıştır. %0,9 görel öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen kiriş uçlarında hasar başlamıştır. %1 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgesinde basınç ezilmelerinden dolayı çatlaklar başlamıştır.

Donatılarda ise %0,7 görel öteleme miktarı altında A ve D bölgesinde eğilme donatılarında akma ve B bölgesine denk gelen kiriş ucundaki donatıda akma başlamıştır. %1 görel öteleme miktarı altında C bölgesine denk gelen kiriş ucunda akma başlamıştır. Artan görel öteleme miktarı ile %1,5 altına A ve D bölgesinde basınç donatılarında akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLETAP2 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.43'de verilmiştir. Tablo 4.20 ve Şekil 4.43'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Öngörüldüğü gibi birleşim bölgelerinde kesme hasarı oluşmamıştır.



Şekil 4.43 KOLETAP1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişiklikler

Şekil 4.44’de gösterilen KOLETAP3 Modeli: Referans modelde Ø6’lık etriyelerden oluşan kolon etriyeleri Ø8’e yükseltilerek oluşturulmuştur. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.21’de gösterilmiştir.

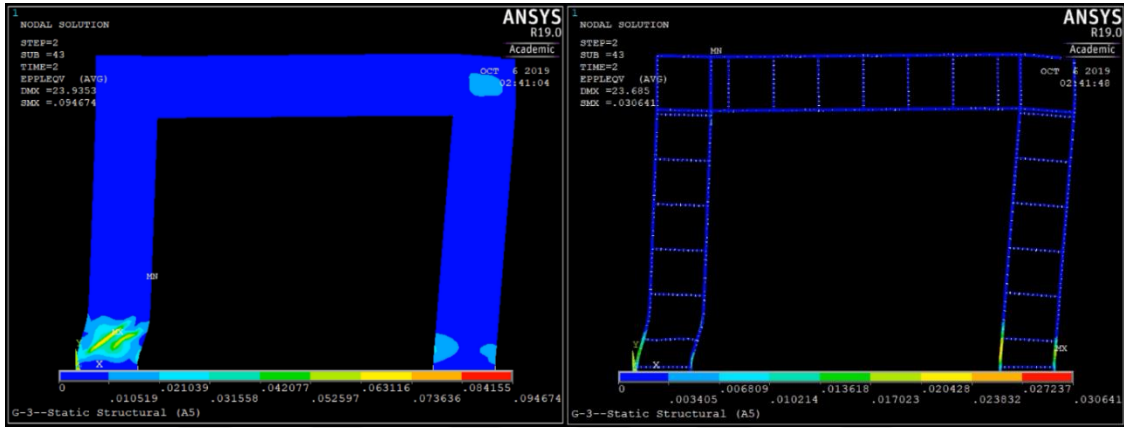
Tablo 4.21 KOLETAP3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar
KOLETAP3	Görelî ötel. mikt.	%0,6	%0,8	%1,2	%1,4	%1,4	%1,8	%2,2
	Hasar bölgesi	Donatı-A	Donatı-D	Beton-A	Beton-D	Beton-A	Beton-D	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Kesme	Çekme	Basınç	Basınç	Kesme

Bu modelde betonda ilk kesme çatlağı %1,2 görelî öteleme miktarı altında görülmüştür. %1,4 görelî öteleme miktarı altında D bölgesinde eğilme çatlağı oluşumu başlamıştır. Hemen sonrasında A bölgesindeki kesme çatlağı ilerleyerek basınç bölgesine kadar ulaşmıştır. Artan deplasmanlarla %1,8 görelî öteleme miktarında D bölgesinde basınç bölgesinde hasar oluşumu başlamıştır. %2,2 görelî öteleme miktarı altında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı oluşmuştur.

Donatılarda ise A bölgesinde %0,6 görelî öteleme miktarı altında çekme donatısında akma başlamıştır. %0,8 görelî öteleme miktarı altında ise D bölgesi çekme

donatısında akma başlamıştır. Artan görelî öteleme miktarına rağmen başka hiçbir donatıda akma görülmemiştir. Sistemin taşıma gücünü %1,4 görelî öteleme miktarında kaybettiği grafikten okunmaktadır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLETCAP3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.44'de verilmiştir. Tablo 4.21 ve Şekil 4.44'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaya başlamaktadır.



Şekil 4.44 KOLETCAP3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

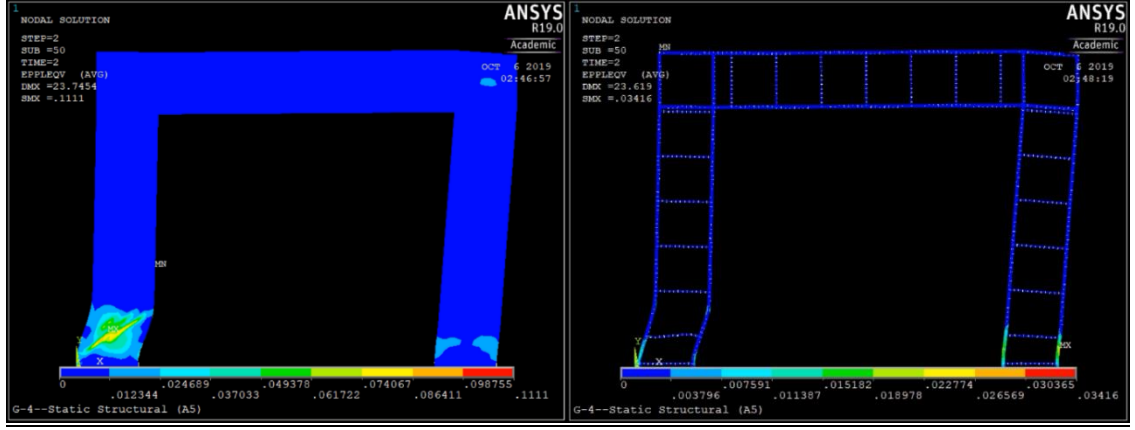
Şekil 4.45'de gösterilen KOLETCAP4 Modeli: Referans modelde Ø6'lık etriyelerden oluşan kolon etriyeleri Ø10'a yükseltılarak oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.22'de gösterilmiştir.

Tablo 4.22 KOLETAP4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar
KOLETAP4	Görelî ötel. mikt.	%0,7	%0,9	%1,1	%1,7	%1,7	%2,4
	Hasar bölgesi	Donatı- A	Donatı- D	Beton-A	Beton- D	Beton- D	Beton- C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Kesme

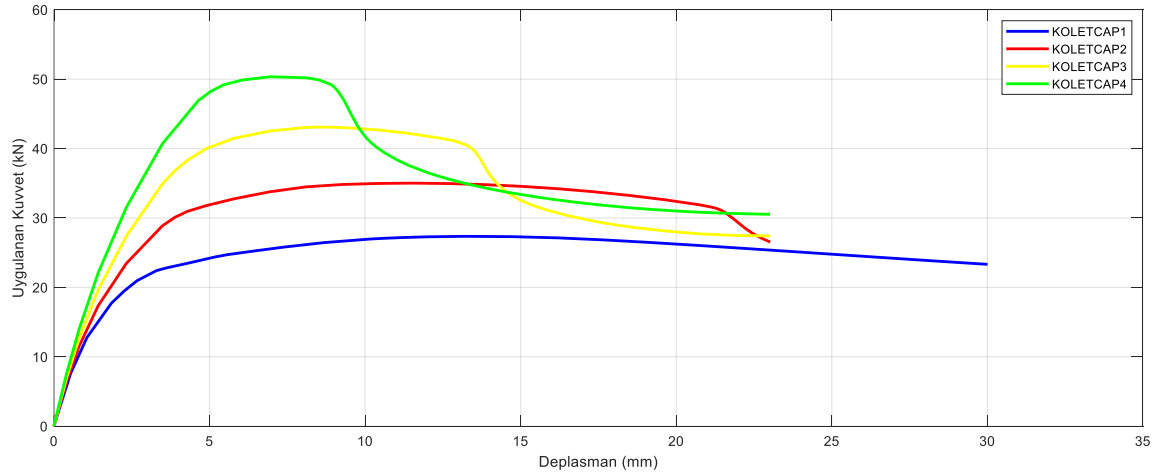
Bu model betonunda ilk hasar A bölgesinde kolon ortasında oluşarak başlamıştır. Sonrasında artan görelî öteleme miktarlarıyla kolon dış yüzeylerine doğru genişlemiştir. %1,7 görelî öteleme miktarı altında D bölgesi çekme ve basınç bölgelerinde hasar oluşumu başlamıştır. %2,4 görelî öteleme miktarı kadar başka bölgede hasar gözlemlenmemiş en son C bölgesinde birleşim hasar oluşumu başlamıştır.

Donatılarda ise %0,7 görelî öteleme miktarında A çekme bölgesinde, %0,9 görelî öteleme miktarı altında D çekme bölgesinde akma başlamıştır. %1,1 görelî öteleme miktarında D basınç bölgesinde hasar başlamıştır. Sistemin taşıma gücünü kaybettiği an grafikten %0,9 olarak okunmaktadır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı KOLETAP4 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.29'da verilmiştir. Tablo 4.13 ve Şekil 4.29'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Öngörüldüğü şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmamaktadır.



Şekil 4.45 KOLETAP4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişimler

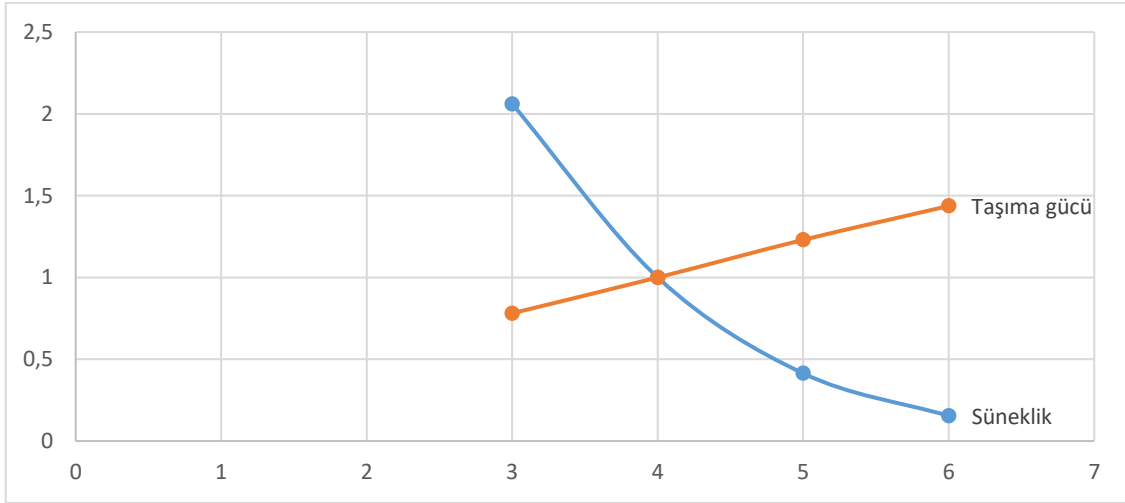
Taşıma güçleri Şekil 4.46'da ki eğrilerden de görüldüğü gibi kolon etriye çaplarının artması modelin taşıma gücünü arttırırken, sünekliklerini ise azaltmıştır. Taşıma güçlerinin kaybolduğu görelî öteleme miktarları belirtilirken ani rijitlik kaybı olan bölgelerdeki görelî öteleme değerleri okunmuştur. Kirişte etriye aralığı ve etriye çapı değişimi sistem davranışını etkilemezken, kolondaki etriye çapı değişimi etkilemiştir.



Şekil 4.46 Kolon etriye çaplarının değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

Taşıma gücü ve süneklik değişimleri Şekil 4.47'de gösterilmiştir. Karşılaştırma Şekil 4.23'de ki grafiklerin tepe noktaları üzerinden yapılırken, süneklik ise Denklem 3.15'e göre belirlenerek kıyaslanmıştır. Şekil 4.47'de kolon etriye çaplarının sırasıyla Ø4-6-8-10 şeklinde artmasıyla değişen taşıma gücü ve süneklik değerleri referans modelin ilgili değerlerine göre normalize edilmiştir. Şekil 4.47'de

görüldüğü gibi, taşıma gücünde doğrusala yakın bir artış oluşurken süneklikte eğimi artan bir azalış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.47 Kolon etriye çaplarının artmasıyla süneklik ve taşıma gücü değişimi

4.2.1.8 Sabit Yüklemin Parametrik Değişimi

Şekil 4.48’de gösterilen N1 Modeli: Referans modelde A ve B bölgesi üst yüzeylerine bir plaka ile uygulanan 12,5 kN yük azaltılıp 6,25 kN yapılarak oluşturulmuştur. Tablo 4.6’da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.23’de gösterilmiştir.

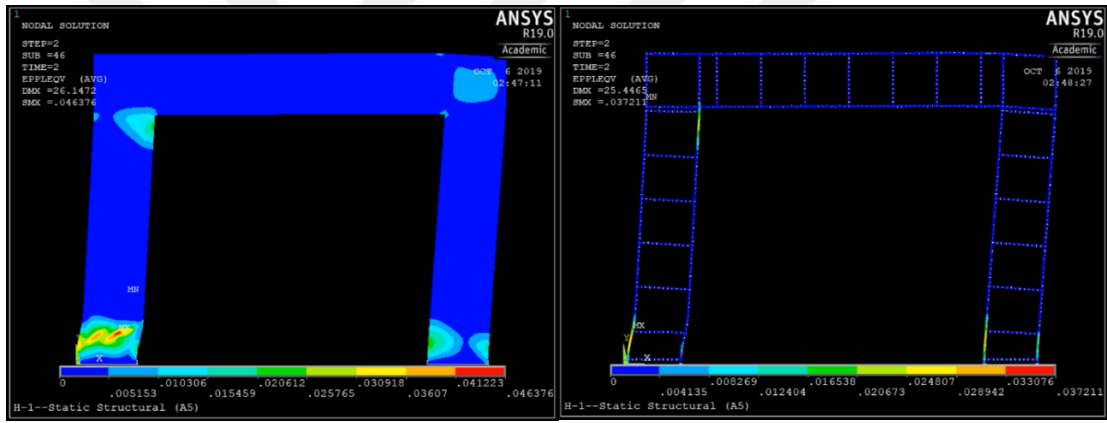
Tablo 4.23 N1 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar
KOLGEN3	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,8	%0,8	%0,8	%1,3	%1,3	%2	%2
	Hasar bölgesi	Donatı- A, D	Donatı- B	Beton- A	Beton- D	Beton- A, D	Donatı- D	Beton- C	Donatı- A
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Kesme	Kesme	Basınç	Basınç	Kesme	Basınç

Bu model betonunda %0,8 görelî öteleme miktarı altında A bölgesinde kesme çatlaklarının oluşumu, D çekme bölgesinde eğilme hasarı ve B bölgesine denk gelen kiriş ucunda hasar başlangıcı gözlemlenmiştir. Artan görelî öteleme miktarı altında

%1,3'de A ve D basınç bölgesinde hasar oluşmaya başlamıştır. %2 görelî öteleme miktarı altında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı oluşmuştur.

Donatılarda ise %0,6 görelî öteleme miktarında A ve D bölgesinde çekme donatılarında akma başlamıştır. %0,8 görelî öteleme miktarı altında B bölgesine denk gelen kolon ucunca akma başlamıştır. %1,3 görelî öteleme miktarı altında D bölgesi, %2 görelî öteleme miktarı altında A bölgesi basınç donatılarında akma başlamıştır. Sistemin taşıma gücünü %1,9'da kaybettiği grafikten görülmektedir. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı N1 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.48'de verilmiştir. Tablo 4.23 ve Şekil 4.48'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.48 N1 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişiklikler

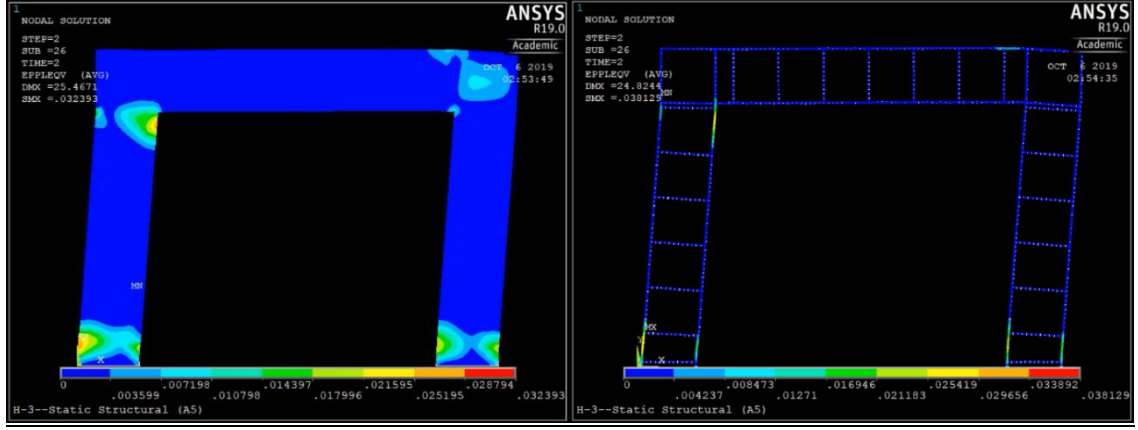
Şekil 4.49'da gösterilen N3 Modeli: Referans modelde A ve B bölgesi üst yüzeylerine bir plaka ile uygulanan 12,5 kN yük artırılıp 18,75 kN yapılarak oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.24'de gösterilmiştir.

Tablo 4.24 N3 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar	8. Hasar	9. Hasar
N3	Görel. ötel. mikt.	%0,6	%0,6	%0,7	%0,7	%0,8	%1	%1,1	%1,3	%2
	Hasar bölgesi	Donat-A	Beton-A	Beton-D, B	Donat-D, B	Beton-A, D	Donat-D	Beton-C	Donat-A, C	Beton-C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Basınç	Basınç	Basınç	Kesme

Bu model betonunda %0,6 görel öteleme altında A çekme bölgesinde, %0,7'de D çekme bölgesinde eğilme çatlağı başlamıştır. %0,7 görel ötelemde aynı zamanda B bölgesine denk gelen kiriş ucunda hasar oluşumu gözlenmiştir. %0,8 görel öteleme miktarında A ve D basınç bölgesi hasarı başlamıştır. %1,1 görel öteleme miktarında C bölgesine denk gelen kiriş ucunda hasar başlamış ve %2 görel öteleme miktarı altında C bölgesinde birleşim bölgesi hasarı gözlemlenmiştir.

Donatılarda ise %0,6 görel öteleme miktarı altında A çekme donatısında,%0,7 görel öteleme miktarında da D bölgesi çekme donatısında akma başlamıştır. Aynı görel öteleme miktarında B bölgesine denk gelen kolon ucunda akma başlamıştır. Artan görel öteleme miktarıyla %1'de D basınç bölgesinde akma görülmüştür. Daha sonra %1,3 görel öteleme miktarında ise A basınç bölgesinde ve C bölgesine denk gelen kiriş ucunda akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı N3 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.49'da verilmiştir. Tablo 4.24 ve Şekil 4.49'dan görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda, yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



Şekil 4.49 N3 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğişiklikler

Şekil 4.50'de gösterilen N4 Modeli: Referans modelde A ve B bölgesi üst yüzeylerine bir plaka ile uygulanan 12,5 kN yük artırılıp 25 kN yapılarak oluşturulmuştur. Tablo 4.6'da görüldüğü gibi bu modelde ilk hasar kolonda beklenilmekte olup birleşimde kesme hasarı beklenmemektedir. Modelin hasar süreci Tablo 4.25'de gösterilmiştir.

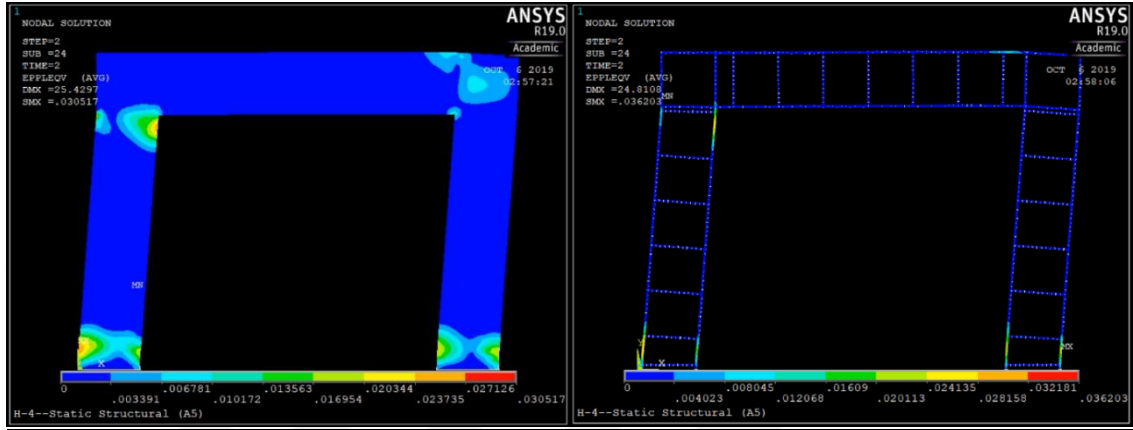
Tablo 4.25 N4 modelinin yanal yük altında adım adım hasar gözlemi

Numune adı		1. Hasar	2. Hasar	3. Hasar	4. Hasar	5. Hasar	6. Hasar	7. Hasar
N4	Görel. ötel. mikt.	%0,5	%0,6	%0,7	%0,7	%0,7	%0,7	%1,2
	Hasar bölgesi	Beton- A	Donatı- A	Donatı- D, B	Beton- A	Beton- D	Beton- B	Beton- C
	Hasar cinsi	Çekme	Çekme	Çekme	Basınç	Basınç, çekme	Çekme	Kesme

Bu model betonunda %0,5 görel öteleme miktarı altında A çekme bölgesinde eğilme çatlaklarının oluşumu başlamıştır. %0,7 görel öteleme miktarı altında ise A bölgesinde basınç ezilmelerinden oluşan çatlaklar, D basınç ve çekme bölgesinde hasar ve B bölgesine denk gelen kolon ucunda hasar oluşumu başlamıştır.

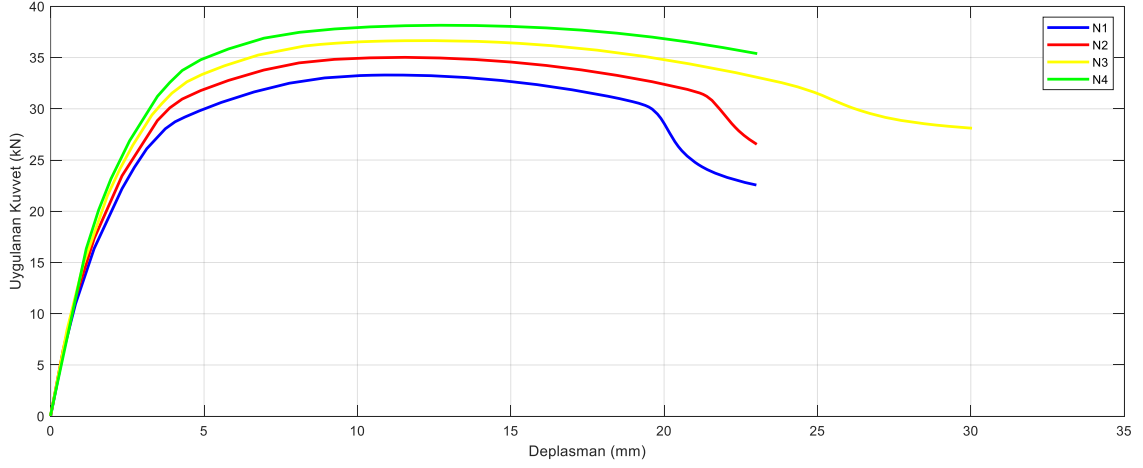
Donatılarda ise %0,6'da A çekme bölgesinde ve %0,7 görel öteleme miktarında da D çekme bölgesinde akma başlamıştır. B bölgesine denk gelen kolon ucunda ise %0,7 görel öteleme miktarı altında akma başlamıştır. Artan görel öteleme miktarı

miktariyla %1,2'de C bölgesi kiriş ucunda akma başlamıştır. Beton ve donatılara ait bu çıkarımların yapıldığı N4 modelinin yükleme bittiği andaki hasar durumu Şekil 4.50'de verilmiştir. Tablo 4.25 ve Şekil 4.50'den görüldüğü gibi yüklemenin bittiği anda yükleme başlamadan önce beklendiği gibi kolonlarda plastik mafsallaşma görülmektedir. Ancak beklenmeyen şekilde yükleme bittiği anda C bölgesinde birleşim içerisinde kesme hasarı oluşmaktadır.



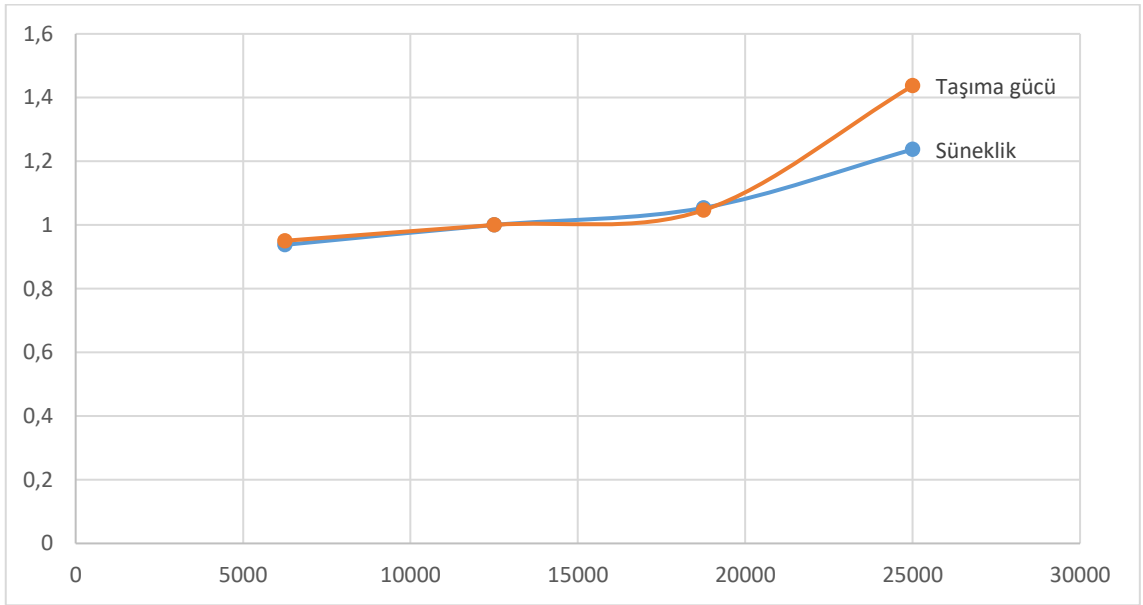
Şekil 4.50 N4 Son yükleme adımında beton ve donatıdaki eşdeğer plastik şekildeğiştirmeler

Taşıma güçleri Şekil 4.51'de ki eğrilerden de görüldüğü gibi yapılan sabit yüklemenin artmasıyla aksenal normal kuvvetin kesit kapasitesine oranı %4'den %19'a çıkarılmıştır. Bu durum modellerin hem taşıma gücü hemde sünekliklerini arttırmıştır.



Şekil 4.51 Sabit yüklerin değişmesiyle oluşturulmuş modellere ait uygulanan yük-yerdeğiştirme grafiği

Taşıma gücü ve süneklik değişimleri Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Karşılaştırma Şekil 4.51’de ki grafiklerin tepe noktaları üzerinden yapılırken, süneklik ise Denklem 3.15’e göre belirlenerek kıyaslanmıştır. Şekil 4.51’de sabit yüklemenin sırasıyla 6,25-12,5-18,75-25 kN şeklinde artmasıyla oluşan taşıma gücündeki ve süneklikteki değişim referans modelin ilgili değerlerine göre normalize edilmiştir. Şekil 4.23’de görüldüğü gibi, sabit yüklemenin artmasıyla taşıma gücünde hemde süneklikte bir artış gözlemlenmektedir.



Şekil 4.52 Sabit yüklemenin artmasıyla süneklik ve taşıma gücünde oluşan değişim

Tablo 4.26'da modellerin beklenen kapasite durumları ile gözlemlenen kapasite durumları özetlenmektedir. Tablo 4.26'dan görüldüğü gibi beklenen kapasite durumları 22 modelden 19 adedinde gerçekleşmiş olup, 3 adedinde beklenilmeyen hasar durumları gözlemlenmiştir. Beklenilmeyen bu hasar durumlarının nedeni kesme ve eğilme kapasitesinden bağımsız olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.26 Modellerin kapasite ve hasar değerlendirme tablosu

Model İsmi	$\frac{N_d}{f_{ck}A_c}$	$\frac{V_e}{V_c}$	$\frac{M_{kol}}{M_{kir}}$	Hasarın beklendiği yer	İlk Hasarın oluştuğu yer	Kesme Hasarı	Beklentinin karşılanma durumu	
KOLGEN1	%13,	<1	0,5	<1,2	Kolon	Kolon (eğilme)	BB	✓
KOLGEN2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon (eğilme)	BB, kolon	✓
KOLGEN3	%6,6	<1	1,5	>1,2	Kiriş	Kolon(eğilme)	Yok	×
KOLGEN4	%5,3	<1	2	>1,2	Kiriş	Kolon(eğilme)	Yok	×
KİRDER1	%9,5	<1	1,3	>1,2	Kiriş	Kolon(eğilme)	BB	×
KİRDER2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRDER3	%9,5	<1	1,0	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRDER4	%9,5	<1	0,7	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	Yok	✓
KİRGEN1	%11	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRGEN2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRGEN3	%8	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB	✓
KİRGEN4	%7	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB	✓
KİRET1	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRET2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRET3	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB	✓

Tablo 4.26 Modellerin kapasite ve hasar değerlendirme tablosu (devamı)

KOLET1	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KOLET2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KOLET3	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRETCAP1	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRETCAP2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KİRETCAP3	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KOLETCAP1	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	Yok	✓
KOLETCAP2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KOLETCAP3	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
KOLETCAP4	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	Kolon	✓
N1	%4,7	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
N2	%9,5	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB, kolon	✓
N3	%14	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB	✓
N4	%19	<1	1	<1,2	Kolon	Kolon(eğilme)	BB	✓

Bu tez kapsamında betonarme moment çerçevesinde kiriş-kolon birleşim bölgesinin tekil olarak ve portal çerçeve sistem içerisinde parametrik olarak sayısal analiz ile performansları değerlendirilmiştir. Bu anlamda literatürde deneysel çalışması yapılmış mevcut sistemlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ANSYS programı ile yapılmıştır. Sayısal analizlerde doğrusal olmayan malzeme ve geometri dikkate alınmıştır. Malzeme modeli olarak mikro düzlem tabanlı bir yaklaşım kullanılarak pekleşme ve yumuşama bölgeleri de dikkate alınmıştır. Sayısal modelde boyuna donatılar ve etriye donatıları aksenal eleman, beton ise hacimsel eleman ile ayrıklaştırılmış olup donatı ve betonun tam bağlı olduğu düşünülmüştür. Mevcut deneysel modeller doğrulandıktan sonra parametrik olarak sayısal modeller kurulmuştur. Kiriş-kolon birleşim bölgesine ait modelin etriye miktarını azaltarak, boyuna donatı çapını arttırarak ve etriye donatısının çaplarını arttırarak 9 farklı model oluşturulmuştur. Portal çerçeve sisteme ait modelde ise kolon genişliği, kiriş derinliği, kiriş genişliği, kirişteki etriye sayısı, kolonlarda etriye sayısı, kirişlerde etriye çapı, kolonlarda etriye çapı ve sabit yükleme miktarının değiştirilerek 22 farklı model oluşturulmuştur. Sistemlerin plastik mafsallık, kiriş-kolon bölgesi hasar oluşumu, süneklikleri, taşıma kapasiteleri karşılaştırılarak betonarme kiriş-kolon birleşimlerinin davranışı irdelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Tekil kiriş-kolon birleşimi için kurulan tüm sayısal modellerde analiz öncesi beklenen hasar durumu sonrasında beklendiği gibi gerçekleşmiştir.
- Tekil kiriş-kolon birleşiminde etriye adedindeki değişim, taşıma gücünde anlamlı bir etkisinin olmadığı, ancak süneklikte doğru orantılı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Tekil kiriş-kolon birleşiminde boyuna donatı çapının hem kolon hem de kirişte artışının yük taşıma kapasitesini arttırdığı, ancak sünekliği azalttığı

görülmüştür. Boyuna donatı oranlarının kesitte olması gerekenden fazla olması durumuna çoğunlukla aderans aktarım bölgelerinde rastlanmaktadır. Örneğin, kolonların boyuna ekleri, kat döşemesi seviyesinde yapılmaktadır. TDBY-2018 yönetmeliğinde bu ek yeri kolon ortasına taşınmış olması, sistemin sünekliğini artıracığı bu irdelemede de görülmüştür.

- Tekil giriş-kolon birleşiminde etriye donatsının çaplarındaki artışın taşıma gücüne etkisinin sınırlı düzeyde olduğu, ancak süneklikte doğru orantılı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Portal çerçeve sistemde kolon genişliğindeki artışı, dolaylı olarak boyuna donatı oranının azalışı, modeller arasında taşıma gücünü arttırırken sünekliklerini azaltmıştır. Bu artışa bağlı olarak birleşim bölgelerinde oluşan hasarlar kaybolmuş ve hasar sadece kolonlarda oluşmaya başlamıştır. TDBY-2018 yönetmeliğinde kolon ek yerlerinin kolon ortasına taşınmış olmasının burda da görüldüğü gibi sistemin sünekliğini artıracığı anlaşılmaktadır.
- Portal çerçeve sistemde giriş derinliğindeki artış taşıma gücünü arttırmış ve sünekliği azaltmıştır. Bu artışa bağlı olarak birleşim bölgelerinde oluşan hasarlar kaybolmaya başlamıştır.
- Portal çerçeve sistemde giriş genişliğinin artmasıyla birlikte taşıma gücü artmış, süneklik ise azalmıştır. Yapılan bu değişikliklerde hasar yerlerinde bir değişim oluşmamış ancak miktarı ve hasar tipinde değişimler oluşmuştur.
- Portal çerçeve sistemde girişlerde etriye adetlerinin ve çaplarının değişimi; taşıma gücü, süneklik ve hasar durumu üzerinde bir etki yaratmamıştır. Bu durumun sebebi etriyelerde plastik şekil değiştirme oluşmamasıdır.
- Portal çerçeve sistemde kolon etriye adetlerinin değişimi; taşıma gücü, süneklik ve hasar durumu üzerinde bir etki yaratmamıştır. Bu durumun sebebi etriyelerde plastik şekil değiştirme oluşmamasıdır. Ancak kolon etriye çaplarının artmasıyla taşıma gücünde artış, süneklikte ise azalış söz konusudur. Bu artış B ve D bölgelerinde oluşan hasarlarını yok etmiştir.
- Portal çerçeve sistemde kolonlardaki düşey yükün değişimi; modellerde normal kuvvetin kesit kapasitesine oranı %4'den %19'a çıkarılmıştır. Bu durum sistemin taşıma gücünü arttırırken sünekliklerini de arttırmıştır.

- Portal çerçeve sistemde oluşturulan 22 farklı modelde analiz yapılmadan önce öngörülen hasar yerleri 19 model için beklentiyi karşılarken 3 modelde beklenilenden farklı sonuç elde edilmiştir.

Bu tez kapsamında yapılacak ileri çalışmalarda kurulacak olan model üzerinde çevrimsel yükleme altında sonuçlar alınabilir. Ayrıca deneysel çalışma ile uyum yakalarken kurulan malzeme modelindeki parametreler deneme-yanılma yoluyla bulunmuştur. Yük-görelî öteleme miktarı grafiğini doğru oluşturabilmek için ileri çalışmalarda optimizasyon çalışması başlığı altında daha kesin sonuçlarla verilebilir.



- [1] Topçu, Ahmet. "Tarihçe: Çimento/ Beton/ Betonarme/ Betonarme Yapılar/ İnşaat Mühendisliği." Eskişehir Osmangazi Üniversitesi ders notu, 2006-2014.
- [2] Enstitüsü, Devlet İstatistik. "Genel Nüfus Sayımı Nüfusun Sosyal ve Ekonomik Nitelikleri." Devlet İstatistik Enstitüsü Matbaası. Yayın 2759 (2000).
- [3] J. Akıncıtürk, Nilüfer. "Yapı Tasarımında Mimarın Deprem Bilinci." Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fak. Yayını 8 (2003).
- [4] Amani, Aminullah, and Abdul Qudus Niyazi. "Türkiye’de Prefabrik Yapı Sektörünün Hızlı Gelişimi." Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 6.3 (2018): 487-494.
- [5] Alyamaç, Kürşat Esat, and Ali Sayıl Erdoğan. "Geçmişten günümüze afet yönetmelikleri ve uygulamada karşılaşılan tasarım hataları." Deprem Sempozyumu (2005): 707-715.
- [6] Eyyubov, Cemal, Aydan ŞAHİN, and Yaşar Uğur. "Yıkıcı Depremler Süresince Betonarme Binaların Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Davranışlarının İncelenmesi." (İMO, 2002).
- [7] Feenstra PH, De Borst R. (1995). Constitutive model for reinforced concrete. Journal of engineering mechanics, 121.5: 587-595.
- [8] Feenstra, P. H., & De Borst, R. (1996). A composite plasticity model for concrete. International Journal of Solids and Structures, 33.5, 707-730.
- [9] Jirásek, M.; Bazant, Z. P. Models for localization of softening and size effect. Inelastic Analysis of Structures. Chichester: John Wiley and Sons, 2002, 517-39.
- [10] Ottosen, N. S. (1977). A failure criterion for concrete. American Society of Civil Engineers. Engineering Mechanics Division. Journal, 103.4: 527-535.
- [11] Hsieh, S. S., Ting, E. C. ve Chen, W. F. (1979). An elastic-fracture model for concrete, Proc. 3rd engineering mechanics Div. Spec. Conf. ASCE, Austin, Texas, USA, April 19-23.
- [12] Imran, I., & Pantazopoulou, S. J. (2001). Plasticity model for concrete under triaxial compression. Journal of engineering mechanics, 127.3: 281-290.
- [13] Willam, K. J. (1975). Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete. Proc. Intl. Assoc. Bridge Structl. Engrs, 19, 1-30.
- [14] Etse, G., & Willam, K. (1994). Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete. Journal of engineering mechanics, 120.9: 1983-2011.
- [15] Menetrey, P. H. Ve William, K.J. (1995) Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. ACI Structural Journal. Vol. 92, no. 3, 311-317.
- [16] Červenka, J., & Papanikolaou, V. K. (2008). Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete. International journal of plasticity, 24.12: 2192-2220.

- [17] Lale, E. (2011). Betonarme Elemanların Plastisite Ve Hasar Mekanikliği Esasları Kullanılarak Doğrusal Olmayan Analizi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [18] Bažant, Z. P., & Oh, B. H. (1985). Microplane model for progressive fracture of concrete and rock. *Journal of Engineering Mechanics*, 111.4: 559-582.
- [19] Ozbolt, J., Li, Y. J., & Eligehausen, R. (1998). 3D Cyclic Fracture Analysis Of Beam-Column Connections. In *Third International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FRAMCOS-3)* (pp. 1523-1536).
- [20] Zreid, I., & Kaliske, M. (2018). A gradient enhanced plasticity–damage microplane model for concrete. *Computational Mechanics*, 62.5: 1239-1257.
- [21] K. N. Rao, "A novel class imbalance learning method using subset filtering," 2012. Vol.3, No:7.
- [21] Tsonos, A. G. (2007). Cyclic load behaviour of reinforced concrete beam-column subassemblages of modern structures. *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 4.
- [22] Sivri, Mustafa. Betonarme güçlendirme perdelerinin doğrusal olmayan davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Diss. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [23] Darılmaz, Kutlu. "Betonarme Sistemlerin Performansını Tasarım Aşamasında Etkileyen Faktörler"(2015- İMO).
- [24] Yüksel, İsa. "Betonarme binalarda sistem sünekliğinin belirlenmesi." Tez (Doktora) - Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [25] Ergun, Sefa. Betonarme yapılar için periyot, süneklik ve deprem yükü azaltma katsayıları ilişkilerinin değerlendirilmesi. MS thesis. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [26] Işık, Ercan, and Mesut Özdemir. "Betonarme Yapılarda Güçlü Kiriş–Zayıf Kolon Durumunun Yapı Performansına Etkisi." *International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, 26-28 Ekim, 2016, Adana/Türkiye.
- [27] Lowes, Laura N., Nilanjan Mitra, and Arash Altoontash. "A beam-column joint model for simulating the earthquake response of reinforced concrete frames." (2003). ANSYS 19.0 Element Reference.
- [28] T.C Resmi Gazete, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 18.03.2018, (30364).
- [29] Unal, M., & Burak, B. (2012). Joint shear strength prediction for reinforced concrete beam-to-column connections. *Structural Engineering and Mechanics*, 41.3: 421-440.
- [30] ACI-ASCE Committee 352 (2002), "Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI 352R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- [31] ANSYS 19.0, Material Reference.
- [32] Sfer, D., Carol, I., Gettu, R. ve Etse, G. (2002). Study of the behavior of concrete under triaxial compression. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 128, no. 2, 156-163.

- [33] Grassl, P. (2004). Modelling of dilation of concrete and its effect in triaxial compression. *International Finite Element in Analysis and Design*. Vol. 40, no. 9-10, 1021-1033.
- [34] Jirasek, M., & Bazant, Z. P. (2001). *Inelastic analysis of structures*. John Wiley & Sons.
- [35] Yılmaz, Orkun. DBYBHY-2007'deki moment aktaran çelik birleşimlerin sonlu eleman analizleri (2015).
- [36] ANSYS 19.0, Material Reference, Chapter 2: Material Model Element Support
- [37] Cen1991, European prestandart ENV 1992-1: Eurocode 2: design of concrete structures-part 1: general rules and rules for buildings. Comite Europeen de Normalisation, Brussels.
- [38] Cen, Comite europeen de normalisation (1995).
- [39] Acı, American Concrete Institute (2005).
- [40] Ökten, Mehmet Selim. Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerle Güçlendirilmiş Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Deneysel İncelenmesi. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [41] Bazant Z. P. (1976) Instability, ductility and size effect in strain-softening solids. *Journal of Engineering Mechanics Division ASCE* 102:331-344.

İletişim Bilgisi: atdemirbag@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. Mehmet Ozan YILMAZ, Alperen Taha DEMİRBAĞ, Serkan BEKİROĞLU. "Investigation Of Reinforced Concrete Beam-Column Joint Behaviour Through Numerical Simulations" (2019). International Civil Engineering and Architecture Conference, ss.1519-1528.

