

**DİK DÖRTGEN KESİTLİ OLMAYAN
PERDELERİN DAVRANIŞI VE
TASARIM ESASLARI**

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Doç. Dr. İlker KAZAZ**

2014

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ OLMAYAN PERDELERİN DAVRANIŞI
VE TASARIM ESASLARI**

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

DİKDÖRTGEN KESİTLİ OLMAYAN PERDELERİN DAVRANIŞI VE TASARIM
ESASLARI

Doç. Dr. İlker KAZAZ danışmanlığında, Halit Erdem ÇOLAKOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 17/04/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İmza :

Üye : Doç. Dr. İlker KAZAZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsmail SOLMUŞ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 24.04.2014 tarih ve 17/550 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEYOĞLU
Enstitü Müdürü

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİKDÖRTGEN KESİTLİ OLMAYAN PERDELERİN DAVRANIŞI VE TASARIM ESASLARI

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker KAZAZ

Betonarme perdeler yatay yük etkisi altında kat yer değiştirmelerinin sınırlandırılması bakımından oldukça önemli bir yere sahiptir. Özellikle deprem bölgelerinde hem yapının güvenliğini sağlamak hem de yer değiştirmeleri sınırlandırarak yapısal olmayan elemanlarda oluşacak hasarları azaltması açısından etkili davrandıkları belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, DBYBHY (2007)'ye göre tasarımı yapılan, U ve H şekilli betonarme perdelerin farklı yatay yükleme ve burulma etkileri altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan davranışı, sonlu eleman metodunu kullanan ANSYS yazılımı ile incelenmiştir. Bunun için öncelikle, ANSYS programı kullanılarak betonarme elemanların nasıl modelleneceği, malzeme davranışına ilişkin kabuller ile modellemede dikkat edilmesi gereken bazı önemli noktalar belirtilmiştir. Bu amaçla laboratuvar ortamında denenmiş H şekilli betonarme perde verileri kullanılarak oluşturulan modelin, ANSYS yazılımı ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında U şekilli betonarme perde, farklı yön ve değerlerdeki yatay yük etkileri altında analiz edilmiş, perdeye ait deformasyon şekilleri, yük-deplasman eğrileri ve moment-eğrilik ilişkileri verilerek dikdörtgen kesitli olmayan betonarme perdelerin inelastik davranışı açıklanmıştır.

2014, 177 sayfa

Anahtar Kelimeler: H ve U şekilli perde, Burulma, Eğilme, ANSYS, Sonlu eleman analizi, Modelleme, Kayma merkezi

ABSTRACT

Master Thesis

BEHAVIOR AND DESIGN FUNDAMENTALS OF NON-RECTANGULAR SHEAR WALLS

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker KAZAZ

Reinforced shear walls with the effect of lateral load have an importance with regards to restrictions of floor displacement. It has been determined the efficiency of reinforced shear walls in providing the construction safety, decreasing the displacement and the damage of non-structured elements in seismic zones.

In this study, linear and non-linear behavior of H and U shaped walls (designed according to DBYBHY, 2007) under the effects of different horizontal load and torsion were evaluated. This behavior was analysed by ANSYS software using finite element analysis. Fundamentals of modeling, behavior of the materials and how to model the reinforced shear walls have been clarified using ANSYS software. For this purpose; linear and non-linear analysis of the modeling designed from the data of H shaped reinforced walls in laboratory was performed. Analysing the U shaped walls under the lateral loads in different directions; deformations, load-displacement and moment-curvature diagrams of the walls were obtained as well. In conclusion, inelastic behavior of non-rectangular shear walls presented.

2014, 177 pages

Keywords: H and U shaped wall, Torsion, Bending ANSYS, Finite element analysis, Modeling, Shear centre.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezinin her aŐamasında çalıŐmalarına yön veren, bilgisini, ilgi ve desteğini esirgemeyen, fikirlerinden ve dokümanlarından yararlandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. İlker KAZAZ'a teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ailemin bütün bireyelerine minnet ve Őükranlarımı sunarım.

Halit Erdem OLAKOğLU

Nisan 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Beton ve Betonarme İçin Matematiksel Modeller	10
2.1.1. Sargılı ve sargısız beton için malzeme modelleri.....	10
2.1.1.a. Hognestad modeli	11
2.1.1.b. Geliştirilmiş Kent and Park modeli	12
2.1.1.c. Mander modeli.....	15
2.1.1.d. Saatçioğlu ve Razvi modeli	18
2.2. ANSYS’de Kullanılan Betonarme Malzeme Modelleri.....	20
2.2.1. Willam-Warnke göçme kriteri.....	21
2.2.2. Von-Mises akma kriteri.....	25
2.2.3. Drucker-Prager plastisite modeli.....	26
2.2.4. Multilineer pekleşme plastisitesi modeli (MISO, MKIN ve KINH).....	30
2.2.5. Birleştirilmiş malzeme modeli	31
2.3. ANSYS’de Kullanılan Sonlu Elemanların Tanıtılması.....	32
2.3.1. SOLİD65 elemanı.....	32
2.3.1.a. Kesme gerilmesi ve yerdeğiştirme	33
2.3.1.b. Varsayımlar ve sınırlamalar	36
2.3.2. LİNK8 (çubuk) elemanı	42
2.4. Farklı Modelleme Kriterleri Kullanılarak H Şekilli Betonarme Perde Duvarların Performansının İncelenmesi.....	43
2.4.1. Alt ve üst levhaların rijitliklerinin performansa etkisi	43
2.4.2. Üst levhanın ağırlığının hesaba katılmasının performansa etkisi.....	44

2.4.3. K7 faktörünün etkisi	46
2.4.4. K1 faktörünün etkisi	47
2.4.5. Modelin sonlu eleman ağı farklılıklarının performansa etkisi	47
2.4.6. Ayrık ve yayılmış modelleme tekniğinin performansa etkisi	48
2.5. Kesme Kuvveti ve Burulma Etkisi Altında H Şekli Betonarme Perde Duvarların Performansının İncelenmesi	52
2.5.1. Örnekler ve test yöntemi	53
2.5.2. Test sonuçları	57
2.5.3. ANSYS sonlu elemanlar metodu ve doğrusal olmayan analiz.....	58
2.5.4. HW25,50 ve 75 perdelerinin eğilme momenti-yanal deplasman ilişkisi	73
2.5.5. HS25,50 ve 75 perdelerinin eğilme momenti-yanal deplasman ilişkisi	74
2.5.6. Perdelerin flanş ve gövde kısımlarının taşıdıkları yükler.....	79
2.5.7. Perdelerin çatlama akma ve ezilme anlarındaki moment değerleri.....	81
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	84
3.1. Materyal.....	84
3.1.1. U kesitli perdenin modellenmesi	88
3.1.2. Sargılı ve sargısız beton modelleri	89
3.1.3. Beton ve donatı özellikleri	90
3.2. Yöntem	92
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	94
4.1. U Kesitli Betonarme Perdede Oluşacak Mekanizmanın Belirlenmesi.....	94
4.1.1. Model 1 yük-deplasman ilişkisi	97
4.1.2. Model 2 yük-deplasman ilişkisi	105
4.1.3. Model 6 yük-deplasman ilişkisi	112
4.1.4. Model 4 ve Model 9 yük-deplasman ilişkileri.....	120
4.1.5. Model 5 ve Model 10 yük-deplasman ilişkileri.....	131
4.1.6. Model 3 yük-deplasman ilişkisi	142
4.1.7. Model 8 yük-deplasman ilişkisi	149
4.1.8. Model 7 yük-deplasman ilişkisi	156
4.2. Dikdörtgen Kesitli Olmayan Perde Duvarların Kayma Merkezi	163
4.2.1. U kesitli perde elemanlarında kayma merkezinin teorik hesabı.....	164
4.2.2. U kesitli perdelerin farklı yükleme durumlarındaki kayma merkezi	166

5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	170
KAYNAKLAR	176
ÖZGEÇMİŞ	178

SİMGELER DİZİNİ

A_0	Etkin yer ivme katsayısı
A_{shx}	X yönünde uzanan toplam enine donatı kesit alanı
A_{shy}	Y yönünde uzanan toplam enine donatı kesit alanı
$A(T)$	Spektral ivme katsayısı
b_k	Etriyenin dışından dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu
e	Kayma merkezine olan mesafe
f_c	Sargısız betonun basınç dayanımı
f_{cc}	Sargılı betonun basınç dayanımı
f_{c2max}	Yumuşatılmış pik basınç dayanımı
f_{su}	Akma sonrası teğet modülü
f_{sy}	Çelik donatı akma dayanımı
f_{ywk}	Sargı donatısının minimum akma dayanımı
f_1	Ortalama yanal sargı basıncı
f_{1e}	Efektif yanal sargı basıncı
f_{1x}	X yönünde oluşan sargı basıncı
f_{1y}	Y yönünde oluşan sargı basıncı
h_k	Etriyenin dışından dışına ölçülen çekirdek beton alanının büyük boyutu
I	Bina önem katsayısı
I_x	X eksenine göre atalet momenti
K	Eğrilik
k_3	Betonun özelliğine bağlı katsayı
k_e	Sargılamanın etkinliği ile ilgili katsayı
M	Eğilme momenti
M_{KM}	Kayma merkezine göre hesaplanan moment
N_i	Enterpolasyon şekil fonksiyonu
R	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_a	Deprem yükü azaltma katsayısı
s	Sargı donatısı aralığı
s'	Enine donatı net aralığı

$S(T)$	Spektrum katsayısı
T	Burulma momenti
T_1	Doğal titreşim periyodu
V_t	Toplam eşdeğer deprem yükü
Z_u	Sargısız betonda gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin boyutsuz eğimi
Z_c	Sargılı betonda gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin boyutsuz eğimi
ω	Burulma açısı
ϵ_{coc}	Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon
ϵ_{co}	Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon
ϵ_{cc}	Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim şekil değiştirme
ϵ_{cu}	Betonun nihai basınç birim şekil değiştirmesi
ϵ_{su}	Enine donatı nihai çekme birim şekil değiştirme değeri
ρ_s	Sargı donatısı kesit alanı
γ_R	Yatay deplasman
ρ_{dik}	Boyuna donatı hacimsel oranı
ρ_{yatay}	Enine donatı hacimsel oranı
μ	Genişlik azaltma faktörü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hognestad malzeme modelinde $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi	12
Şekil 2.2. Geliştirilmiş kent and park malzeme modelinde $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi.....	13
Şekil 2.3. Mander sargılı beton modeli.....	16
Şekil 2.4. Saatçioğlu ve razvi sargılı beton modeli.....	18
Şekil 2.5. Üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme eğrisi	22
Şekil 2.6. ANSYS’de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu.....	24
Şekil 2.7. Drucker-Prager kriterinin göçme yüzeyine eşlenmesi.....	27
Şekil 2.8. Deviatorik gerilme vb. durumunda meridyenlerin gösterimi	27
Şekil 2.9. Willam-Warnke, Drucker-Prager ve Von-Mises malzeme modelleri	31
Şekil 2.10. SOLİD65 elemanı geometrisi (ANSYS kullanım kılavuzu)	33
Şekil 2.11. Eğilme momenti etkisindeki elemanda şekil değiştirme	34
Şekil 2.12. SOLİD65 elemanın eğilme momenti etkisinde şekil değiştirmesi	34
Şekil 2.13. Sonlu eleman yer değiştirme modları	36
Şekil 2.14. Donatı doğrultusu	38
Şekil 2.15. Betonun çekme davranışı.....	39
Şekil 2.16. Link8 (çubuk) eleman geometrisi	42
Şekil 2.17. Modellemede temel alınan ölçüler.....	43
Şekil 2.18. Alt ve üst levha rijitliklerine bağlı yük-deplasman ilişkisi.....	44
Şekil 2.19. Sonlu eleman modeli ve donatıların gösterimi	45
Şekil 2.20. Aksenal yükün artırılması sonucu oluşan yük-deplasman ilişkisi	45
Şekil 2.21. K7 (Stress Relax After Cracking) faktörünün etkisi	46
Şekil 2.22. K1 (Extra displacement shapes) faktörünün etkisi	47
Şekil 2.23. İki ve üç sonlu elemana bölünen betonarme perde duvar	47
Şekil 2.24. Sonlu eleman ağı yoğunluğuna bağlı yük-deplasman ilişkisi.....	48
Şekil 2.25. θ ve ϕ ’nin belirlenmesi	49
Şekil 2.26. Ayrık ve yayılmış modellemenin karşılaştırılması	49
Şekil 2.27. Perdenin X yönünde yaptığı ötelenmeler	51
Şekil 2.28. Z yönündeki birim şekil değiştirme (Model 7).....	51
Şekil 2.29. XZ düzlemindeki kayma şekil değiştirmeler.....	52

Şekil 2.30. Test numunelerinin boyutları ve donatı yerleşimi	54
Şekil 2.31. Test numunelerinin varsayılan moment dağılımları	54
Şekil 2.32. Test düzeneği	56
Şekil 2.33. Eğilme momenti-deplasman eğrileri	57
Şekil 2.34. Temel alınan perdenin sonlu eleman modeli	60
Şekil 2.35. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve çok doğrulu hali	61
Şekil 2.36. Yüklerin uygulanma biçimleri	62
Şekil 2.37. Çatlamış beton için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.....	63
Şekil 2.38. Yatay yük ve burulma etkisinde H şekilli perdede oluşacak etki	64
Şekil 2.39. HW25 perdesi Z yönündeki birim şekil değiştirme.....	65
Şekil 2.40. HW50 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme.....	66
Şekil 2.41. HW75 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme.....	67
Şekil 2.42. HS25 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme	68
Şekil 2.43. HS50 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme	69
Şekil 2.44. HS75 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme	70
Şekil 2.45. HW25,50 ve 75 Perdeleri kayma birim şekil değiştirme.....	71
Şekil 2.46. HS25,50 ve 75 perdeleri kayma birim şekil değiştirme	72
Şekil 2.47. Eğilme momenti-yanal deplasman eğrileri (HW25 ve HW50)	73
Şekil 2.48. Eğilme momenti-yanal deplasman eğrisi (HW75)	74
Şekil 2.49. Eğilme momenti-yanal deplasman eğrisi (HS25, HS50 ve HS75).....	74
Şekil 2.50. Kuvvet ve momentin pozitif yönlerinin gösterilmesi	83
Şekil 3.1. Bina kat planı	84
Şekil 3.2. Taban kesme kuvvetinin bina kat seviyelerine dağıtılması	86
Şekil 3.3. Kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik ilişkisi	87
Şekil 3.4. U kesitli perdenin donatı planı.....	88
Şekil 3.5. U kesitli perdenin boyutları ve sonlu eleman modeli	89
Şekil 3.6. Sargılı ve sargısız beton modelleri	90
Şekil 3.7. Çelik için kullanılan malzeme modeli	91
Şekil 3.8. Kesme kuvvetleri ve yerlerinin gösterilmesi	93
Şekil 4.1. U kesitli perde üzerinde burulma yükünün genel etkisi	95
Şekil 4.2. U kesitli perde flanşında yanal eğilme gerilmelerinin değişimi	96
Şekil 4.3. Model 1 yük-deplasman eğrisi	97

Şekil 4.4. Birim şekil değiştirmeler (Model 1)	98
Şekil 4.5. Birim şekil değiştirme pozitif ve negatif yön kabulü	99
Şekil 4.6. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 1).....	99
Şekil 4.7. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 1)	100
Şekil 4.8. Normal gerilme dağılımları (Model 1)	100
Şekil 4.9. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 1)	101
Şekil 4.10. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 1)	103
Şekil 4.11. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 1)	104
Şekil 4.12. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 1).....	104
Şekil 4.13. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 1).....	104
Şekil 4.14. Model 2 yük-deplasman eğrisi	105
Şekil 4.15. Birim şekil değiştirmeler (Model 2)	106
Şekil 4.16. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 2).....	107
Şekil 4.17. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 2)	107
Şekil 4.18. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 2)	109
Şekil 4.19. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 2)	110
Şekil 4.20. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 2)	111
Şekil 4.21. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 2).....	111
Şekil 4.22. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 2).....	111
Şekil 4.23. Model 6 yük-deplasman eğrisi	112
Şekil 4.24. Birim şekil değiştirmeler (Model 6)	113
Şekil 4.25. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 6).....	114
Şekil 4.26. Kesit analizi ile birim şekil değiştirme diyagramı (Model 6).....	114
Şekil 4.27. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 6)	116
Şekil 4.28. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 6)	118
Şekil 4.29. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 6)	118
Şekil 4.30. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 6).....	119
Şekil 4.31. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 6).....	119
Şekil 4.32. Model 4 ve model 9 yük-deplasman eğrileri.....	120
Şekil 4.33. Birim şekil değiştirmeler (Model 4)	121
Şekil 4.34. Birim şekil değiştirmeler (Model 9)	122
Şekil 4.35. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 4).....	123

Şekil 4.36. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 9).....	123
Şekil 4.37. Kesit analizi ile birim şekil değiştirme diyagramı (Model 4).....	124
Şekil 4.38. Kesit analizi ile birim şekil değiştirme diyagramı (Model 9).....	124
Şekil 4.39. Normal gerilme dağılımları (Model 4 ve Model 9).....	125
Şekil 4.40. Y doğrultusunda deplasman ve deformasyon (Model 4 ve Model 9)	125
Şekil 4.41. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 4 ve Model 9).....	128
Şekil 4.42. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 4)	128
Şekil 4.43. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 4).....	129
Şekil 4.44. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 4).....	129
Şekil 4.45. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 9)	129
Şekil 4.46. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 9).....	130
Şekil 4.47. P2 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 9).....	130
Şekil 4.48. Model 5 ve Model 10 yük-deplasman eğrileri.....	131
Şekil 4.49. Birim şekil değiştirmeler (Model 5)	132
Şekil 4.50. Birim şekil değiştirmeler (Model 10)	133
Şekil 4.51. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 5).....	134
Şekil 4.52. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 10).....	134
Şekil 4.53. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 5)	135
Şekil 4.54. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 10)	135
Şekil 4.55. Normal gerilme dağılımları (Model 5)	136
Şekil 4.56. Normal gerilme dağılımları (Model 10)	136
Şekil 4.57. Y doğrultusundaki deplasman ve deformasyon (Model 5 ve Model 10) ...	137
Şekil 4.58. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 5 ve Model 10).....	139
Şekil 4.59. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 5)	140
Şekil 4.60. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 5).....	140
Şekil 4.61. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 5).....	140
Şekil 4.62. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 10)	141
Şekil 4.63. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 10).....	141
Şekil 4.64. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 10).....	141
Şekil 4.65. Model 3 yük-deplasman eğrisi	142
Şekil 4.66. Birim şekil değiştirmeler (Model 3)	143
Şekil 4.67. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 3).....	144

Şekil 4.68. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 3)	145
Şekil 4.69. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 3)	146
Şekil 4.70. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 3)	147
Şekil 4.71. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 3)	148
Şekil 4.72. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 3)	148
Şekil 4.73. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 3)	148
Şekil 4.74. Model 8 yük-deplasman eğrisi	149
Şekil 4.75. Birim şekil değiştirmeler (Model 8)	150
Şekil 4.76. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 8).....	151
Şekil 4.77. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 8)	152
Şekil 4.78. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 8)	153
Şekil 4.79. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 8)	154
Şekil 4.80. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 8)	155
Şekil 4.81. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 8)	155
Şekil 4.82. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 8)	155
Şekil 4.83. Model 7 yük-deplasman eğrisi	156
Şekil 4.84. Birim şekil değiştirmeler (Model 7)	157
Şekil 4.85. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 7).....	158
Şekil 4.86. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 7)	159
Şekil 4.87. Y doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 7)	160
Şekil 4.88. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 7)	161
Şekil 4.89. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 7)	162
Şekil 4.90. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 7)	162
Şekil 4.91. P2 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 7)	162
Şekil 4.92. (a) Yük Kayma merkezi dışında (b) Yük kayma merkezinde	163
Şekil 4.93. (a) İki simetri eksenli kesitler (b) Tek simetri eksenli kesitler	164
Şekil 4.94. U kesitli betonarme perde ve serbest cisim diyagramı	165
Şekil 4.95. Kayma merkezi yerinin belirlenmesi.....	165
Şekil 4.96. Kayma merkezi hesabında kullanılan serbest cisim diyagramı.....	167

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Beton malzeme tanım çizelgesi	23
Çizelge 2.2. Drucker-Prager modeli parametrelerinin hesaplanması	29
Çizelge 2.3. Model 7 donatı konumları ve hacimsel oranlar	49
Çizelge 2.4. Test örnekleri listesi.....	53
Çizelge 2.5. H şekilli betonarme perdeler için beton malzeme özellikleri	55
Çizelge 2.6. Modele ait çelik donatı malzeme özellikleri.....	55
Çizelge 2.7. Uygulanan maksimum eğilme ve burulma momenti değerleri.....	56
Çizelge 2.8. Temel alınan modele ait donatı yerleşimi ve hacimsel oranlar	60
Çizelge 2.9. Model perdeye ait beton malzeme özellikleri.....	61
Çizelge 2.10. Modele ait çelik donatı malzeme özellikleri.....	61
Çizelge 2.11. Perdeler için uygulanan maksimum eğilme ve burulma momenti değerleri .	62
Çizelge 2.12. Perde üzerine etkiyen toplam kesme kuvvetleri (Nonlinear)	75
Çizelge 2.13. Eğilme etkisinde perdelerin toplam kesme kuvvetleri (Nonlinear).....	76
Çizelge 2.14. Perde üzerine etkiyen toplam kesme kuvvetleri (Lineer)	77
Çizelge 2.15. Eğilme etkisinde perdelerin toplam kesme kuvvetleri (Lineer)	78
Çizelge 2.16. Perdelerin Y yönünde aldıkları yükün dağılımı (Nonlinear).....	79
Çizelge 2.17. Perdelerin X yönünde aldıkları yükün dağılımı (Nonlinear).....	79
Çizelge 2.18. Perdelerin Y yönünde aldıkları yükün dağılımı (Lineer)	80
Çizelge 2.19. Perdelerin X yönünde aldıkları yükün dağılımı (Lineer)	80
Çizelge 2.20. Çatlama anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear)	81
Çizelge 2.21. Akma anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear).....	82
Çizelge 2.22. Ezilme anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear)	82
Çizelge 2.23. Ezilme anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Lineer).....	83
Çizelge 3.1. Bina tasarımında kullanılacak veriler	85
Çizelge 3.2. Toplam eşdeğer deprem yükü hesap verileri	86
Çizelge 3.3. Perde tabanında oluşan kuvvet ve momentler	87
Çizelge 3.4. Donatıların hacimsel oranları ve yerleşim şekilleri	91
Çizelge 3.5. Değişik yükleme durumları	92
Çizelge 4.1. Genişlik azaltma faktörü.....	96

Çizelge 4.2. Model 1'e ait burulma açıları	101
Çizelge 4.3. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 1)	102
Çizelge 4.4. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 1)	102
Çizelge 4.5. Model 2'ye ait burulma açıları	108
Çizelge 4.6. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 2)	109
Çizelge 4.7. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 2)	110
Çizelge 4.8. Model 6'ya ait burulma açıları	115
Çizelge 4.9. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 6)	116
Çizelge 4.10. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 6)	117
Çizelge 4.11. Model 4 ve Model 9'a ait burulma açıları	126
Çizelge 4.12. Flanş ve gövdedeki toplam kesme kuvvetleri (Model 4 ve Model 9)	126
Çizelge 4.13. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 4 ve Model 9).....	127
Çizelge 4.14. Model 5 ve Model 10'a ait burulma açıları	137
Çizelge 4.15. Flanş ve gövdedeki toplam kesme kuvvetleri (Model 5 ve Model 10) ..	138
Çizelge 4.16. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 5 ve Model 10).....	138
Çizelge 4.17. Model 3'e ait burulma açıları	145
Çizelge 4.18. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 3)	146
Çizelge 4.19. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 3)	147
Çizelge 4.20. Model 8'e ait burulma açıları	152
Çizelge 4.21. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 8)	153
Çizelge 4.22. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 8)	153
Çizelge 4.23. Model 7'ye ait burulma açıları	159
Çizelge 4.24. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 7)	160
Çizelge 4.25. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 7)	161
Çizelge 4.26. Kayma merkezinin hesabında kullanılan yöntem.....	167
Çizelge 4.27. U kesitli perdelerde kayma merkezinin nonlineer değişimi	169
Çizelge 5.1. Perdelerin M/T oranının karşılaştırılması.....	173
Çizelge 5.2. Perdelerin eğrilik değerlerinin karşılaştırılması.....	173
Çizelge 5.3. Perdelerin ötelenme oranlarının karşılaştırılması.....	173

1. GİRİŞ

Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde, yapı elemanlarının sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi oldukça yaygın hale gelmiştir. Bilindiği gibi, sonlu elemanlar metodu, yapıların sonlu sayıda elemanlara ayrılması ve bu elemanların birbirlerine bağlandığı düğüm noktalarında kuvvetler dengesi ve deplasman sürekliliğinin sağlanması ilkelerine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde problemin büyüklüğü sınırlanmamıştır.

Yapı elemanları ve yapı sistemlerinin çeşitli yüklemeler altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel çalışmaların gerekliliği tartışılmazdır. Ancak, deneysel çalışmalara ait bilgisayar modellerinin oluşturulması ve model analizinden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla yapılan deneylerin tahkik edilmesi de sık sık karşımıza çıkmaktadır.

Deneysel çalışmalar başlamadan önce, deney düzeneğinin bir bilgisayar modelinin oluşturulması çeşitli faydalar sağlar. Deney düzeneğine ve deney numunelerine ait en uygun ölçü ve parametrelerin belirlenmesi, deney sırasında verilerin toplanacağı kritik noktaların tespiti ve deney sırasında ölçümü çok zor veya mümkün olmayan verilerin analiz yoluyla araştırılması v.b. konular, sonlu eleman modellemeleri ve bu modellerin çözümlenmeleri ile gerçekleştirilebilir.

Sonlu eleman metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar sadece pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen birçok yapısal elemanın kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkün olabilmiştir.

Bu tez çalışmasında, dikdörtgen kesitli olmayan betonarme perdelerin sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi yapılarak, aksenal ve kesme kuvveti ile burulma momenti etkileri altında nonlineer davranışları araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan analizlerde

değişken olarak farklı yükleme durumları kullanılırken, perde boyutları, düşey ve yatay donatı çapı gibi modellemede kullanılan diğer tüm özellikler sabit tutulmuştur. Betonun nonlinear davranışlarının modellenmesi önemli derecede plastisite ve sonlu eleman analizi bilgisi gerektirir. Betonarmenin sonlu eleman modeli için ABAQUS ve ANSYS en yaygın olarak kullanılan paket programlardandır. Bunlardan ANSYS'in güçlü bir grafik kullanıcı ara yüzüne (Graphical User Interface) sahip olmasından dolayı, bu çalışmada ANSYS programı tercih edilmiştir. ANSYS programı ile betonarme elemanların modellenmesinin nasıl yapılacağı, kullanılacak parametreler ve modelleme sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar, ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Beton modeli için, literatürde mevcut olan matematiksel malzeme modellerinden faydalanılmıştır. Mevcut literatürde deneysel olarak incelenmiş olan betonarme perde elemanlarına ait boyut, malzeme ve yükleme verilerinin kullanılmasıyla ANSYS modeli oluşturularak nonlinear sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel sonuçlar ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması mümkün hale gelmiştir. İncelenen betonarme perde elemanlarının yüklemeye bağlı olarak gösterdiği gerilme, deformasyon ve çatlama davranışları, yüklemenin çeşitli aşamalarında belirlenerek davranış geçmişi elde edilmiştir.

Çalışma beş ana bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde konuyla ilgili hazırlayıcı bilgiler verilerek çalışmanın kapsamı belirtilmiş, konuyla ilgili yapılmış olan önceki çalışmalar kısaca özetlenmiştir. İkinci bölüm Kuramsal Temeller kısmından oluşmakta, bu bölümde teorik bilgiler verilerek, esas çalışmaya ışık tutması ve ön veri elde edilmesi amacıyla konuyla ilgili olarak yapılan lineer ve nonlinear analizler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Üçüncü bölüm Materyal ve Yöntem kısımlarından oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmada kullanılan araçlar tanıtılmış, Yöntem kısmında ise çalışmada izlenecek yol belirtilmiştir. Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde analizlerden elde edilen sonuçlar sunularak, şekil ve grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Sonuçlar ve Öneriler bölümü ise çalışmadan çıkarılan belli başlı sonuçları ve daha sonra yapılacak olan çalışmalara yol göstermesi açısından önerileri kapsamaktadır.

Betonarme yapıların sonlu elemanlar analizinde en büyük engel malzeme özelliklerini tanımlamaktaki zorluklardır. Betonarme yapıların davranışını önceden belirlemek için gerçeğe uygun modellemelerin araştırılması konusunda çok çaba harcanmıştır. Sonlu elemanlar yönteminin betonarmeye ilk uygulandığı tarafından 1967'de gerçekleştirilmiştir (Ngo and Scordelis 1967). Bu çalışmada betonarme kirişler incelenerek beton ve donatı iki boyutlu üçgen elemanlarla lineer elastik olarak modellenmiştir. Donatı ile beton arasındaki aderans modellenmiş, bunun yanında çatlakların oluşması ile ilgili varsayımlar yapılmıştır.

Ngo and Scordelis (1967) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar yöntemi hakkında kısa bilgiler verilmiş, yöntemin matrisel formülasyonu gösterilmiştir. Nonlineer malzeme, aderans ve artan yükler altında malzemenin davranışı, oluşan çatlaklar ve yapı geometrisindeki değişikliklerin nasıl modellendiği açıklanmıştır. Betonun davranışı doğrusal bağıntılarla ifade edilemeyeceğinden bilgisayar programı gerekli görülmüştür. FEARCM (Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members) ve FINEARCS (Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures) adlı iki bilgisayar programından bahsedilmiştir.

Köksal ve Doran (1997) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar bilgisayar programında nonlineer oktahedral bünyesel bağıntılar kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ANSYS programında Drucker-Prager akma kriteri seçilerek yapılan plastik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizde beton için Drucker-Prager, çelik için ise Multi-lineer izotropik malzeme modeli seçilmiştir. Betonda basınç ve çekme gerilmeleri etkisi altında çatlak oluşması sırasında sürtünme kuvvetlerinin olduğu Drucker-Prager akma kriterinin, betonun bünyesinde sürtünme kuvvetlerinin iş yaptığı durumlarda kullanılabilirliği ifade edilmiştir. Bu yüzden, Drucker-Prager akma kriteri kullanılarak yapılan beton prizma ve betonarme kiriş elemanlarının sonlu eleman analizlerinin deneysel verilere uygunluk gösterdiği tespit edilmiştir.

Maruta *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada, aynı anda yatay yük ve burulmaya maruz kalan H şekilli betonarme perde duvarlarda deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır.

Burulma dayanımının, bir tarafı açık (OSCW) olan perde duvarlarda, kapalı olanlara (CSCW) göre daha az olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumda OSCW perdelerde elasto-plastik kapasitenin, CSCW perdelerine göre daha az olduğunu tahmin etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada dokuz adet H şeklindeki perde duvar, aynı anda yatay yük ve burulma altında test edilmiş, yatay yük ile H şeklindeki duvarın yatay yük yönündeki burulma oranı incelenmiştir. Tüm örnekler, eğilmede çekme anında kayma deformasyonunu iyi bir şekilde göstermek için tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri test sonuçlarını doğrulamak ve denenmemiş durumların verilerini elde etmek için yapılmıştır.

Beassason and Sigfusson (2001) çalışmalarında betonarme perde duvarların kapasitesi ve deprem davranışını araştırmak için sonlu eleman modelleri oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu sonlu eleman modellerinde deneysel veriler kullanılmıştır. Deprem davranışı analizinde 2000 Haziran Kuzey İceland depremi verileri kullanılmıştır. Aynı geometriye fakat farklı donatı biçimine sahip perde duvarların yük-deformasyon eğrilerini elde etmek için ANSYS sonlu eleman programı seçilmiştir. Analizde, donatılı ve donatısız olarak hazırlanmış üç boyutlu modellerde Solid65 eleman tipi kullanılmıştır. Beton için plastisite akma teorisi üzerine kurulmuş Von-Mises akma kriteri kabul edilmiş, malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Isotropik Hardening seçeneği kullanılarak tanımlanmıştır. Deneysel olarak kullanılan perde duvarların beton ve donatı özelliklerinin sonlu eleman modelinde gerçeğe uygun olarak tanımlanmasından dolayı sonlu eleman analizi sonuçları ve deneysel sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Fanning (2001) çalışmasında, sıradan betonarme kirişler ile art gerilmeli T kesitli kirişler için uygun nümerik modelleme stratejileri önerilmiştir. Beton için ANSYS'de bulunan ve gevrek malzemelerin üç eksenli nonlineer davranışını modelleyen Solid65 elemanı kullanılarak model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin nonlineer analizinden elde edilen yük-deplasman eğrileri ile deneysel yük-deplasman eğrileri karşılaştırılmış ve ikisinin paralellik gösterdiği görülmüştür.

Miller *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada, betonarme perde duvarların iki eksenli yükleme altındaki performansları test edilmiştir. Statik ve tersinir-tekrarlanır yüklemeler altındaki davranışlarını araştırmak için deneyler öncesi model çalışmaları yapılmıştır. Statik yükleme için kutu ve silindir elemanlar kullanılmıştır. ANSYS v5.6 programı kullanılarak sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Modeldeki perde duvarların sonlu eleman modeli için Solid65 eleman tipi yayılı donatı özelliği (smeared modelleme) kullanılarak oluşturulmuştur. Kutu yapının üst ve alt döşemeleri rijit varsayılmıştır. Betonun ezilmesi ihmal edilmiştir. Oluşturulan model, tersinir-tekrarlanır yükleme olarak 0 mm den 4 mm'ye sonra da -4 mm'den 0 mm'ye deplasman yapması için yüklenmiştir. ANSYS analizleri sırasında çözüme yakınsama problemleri ile karşılaşmışlardır. Bir yapının göçme dayanımına yaklaşan tersinir yüklemeler altında betonun nonlineer özelliklerini modelleme sırasında ANSYS'in problemler yaşadığı belirtilmiş ve test sonrası analizler için ANSYS'ten başka bir program kullanmaya karar verilmiştir.

Palermo and Vecchio (2002) yaptıkları çalışmada, iki büyük ölçekli flanşa sahip betonarme perdeyi, statik çevrimsel yerdeğiştirme altında test etmişlerdir. Testlerin amaçları keyfi yükleme koşullarına maruz betonarme perde için bünye denklemlerini doğrulayarak döngüsel deplasmanlar altında perdelerin davranışını öngörmektir. Çalışma sonucunda, eksenel yük varlığının nispeten küçük olmasına rağmen flanş ve gövde mukavemetinin perde duvar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Akış (2004) tarafından yapılan çalışmada, perde duvar-çerçeve tipi yapılardaki düzlemsel olmayan perde duvarların modellenmesi ve analizi araştırılmıştır. Açık ve kapalı kesit perde duvar tipleri için üç boyutlu iki ayrı model geliştirilmiştir. Bu modeller, düzlemsel bir perde duvarın bir kolon ve kat seviyelerindeki rijit kirişlerle modellendiği geniş kolon benzeşimi yöntemine dayanmaktadır. Çok katlı yapıların analizinde sıkça kullanılan rijit diyafram kat kabulü de bu çalışmada göz önünde bulundurulmuştur. Açık kesit perde duvarlar için önerilen modelde, kat seviyelerindeki rijit kirişlerin birbiriyle bağlantıları burulmaya karşı serbest bırakılmıştır. Kapalı kesit

perde duvarlar için ise buna ek olarak, geniş kolonların burulma rijitlikleri bir dizi denklem kullanılarak modifiye edilmiştir.

Arslan (2004) çalışmasında, betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinin analitik hesabında sonlu elemanlardaki elemanların boyut etkisi araştırılmıştır. Hesabı yapılan betonarme kirişte yalnız iki sıra çekme donatısı bulunmaktadır. Açıklık ortasında tekil yükü yüklenmiş kirişte beton için iki farklı kırılma kriteri seçilmiş (Drucker-Prager ve Çatlak modeli) analitik çözümler buna göre yapılmıştır. Drucker-Prager matematiksel modeli betonun mekanik davranışını, plastik ve visko-plastik teoriler yardımıyla ifade etmektedir. Akma kriteri Von-Mises kriterinin genelleştirilmiş şeklidir. Çatlak modelinde ise gelişen çatlakla malzemenin yumuşamadığı ve yük artımı sonunda mukavemetini kaybettiği farz edilmiştir. Analizler LUSAS bilgisayar programı kullanılarak yapılmış ve sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Erduran ve Yakut (2004) çalışması betonarme kolon elemanları için hasar eğrilerinin geliştirilmesi hakkındadır. ANSYS sonlu eleman programı kullanarak, betonarme kolonlarda hasar oluşturan etkilere ait parametreler geniş bir aralıkta araştırılmıştır. Nümerik yük-deplasman eğrileri pushover analizinden elde edilmiştir. Beton için Kent-Park modeli kullanılmıştır. Kolonlar, 8 düğüm noktalı Brick elemanlar vasıtası ile modellenmiştir ve bunların kırılmaya ve ezilmeye yatkın olduğu kabulü yapılmıştır. Beton dayanımının, kolonun narinliğinin, eksenel yük miktarının, boyuna ve enine donatı miktarının ve boyuna donatı akma dayanımının kolonun deformasyon kapasitesine etkisini tespit etmek amacıyla nonlinear analizler yapılmıştır. Kolonun deformasyon kapasitesini etkileyen en önemli parametrelerin; enine donatı miktarı, kolon narinliği ve boyuna donatının akma dayanımı olduğu tespit edilmiştir. Boyuna donatı miktarının ise yük taşıma kapasitesine etkisinin büyük olduğu, ancak kolonun deformasyon özelliğine etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Uysal vd (2004) yaptıkları çalışmada düzlem elastisite problemi olarak ele alınan bir kirişin çeşitli yüklemeler altında ve farklı mesnetlenme durumlarında davranışlarını incelemiştir. Statik analiz için ANSYS programını kullanmışlardır. Dörtgen sonlu

eleman ağının düğüm noktalarında oluşan Von-Mises gerilmelerinin maksimum değerlerinin akma gerilmesini aşmaması şartı altında kiriş boyutları minimize edilmeye çalışılmıştır. Tasarım değişkenleri olarak ise tasarım elemanlarının köşe noktalarının y koordinatları alınmıştır. Elde edilen en büyük kiriş hacmi ve tasarım değişkenleri çizelge halinde verilmiştir.

Brueggen *et al.* (2007) yaptıkları çalışmada, altı katlı bir ofis binasında yer alan T şekilli perde duvarların tasarımında karşılaşılan sorunları araştırmışlardır. Bu sorunlar, iki eksenli yükleme kombinasyonunda bir kat seviyesindeki perde duvarlar arasındaki güç dağılımını ve ACI 318-02'ye göre perde duvarların detaylandırılmasını içermektedir. Yapılan çalışmalar T şekilli perde duvarların tasarımının dikdörtgen şekilli perdelerin tasarımında kullanılan yöntemlere benzer yöntemler kullanılarak yapılabileceğini göstermiştir.

Beyer *et al.* (2008) yaptıkları çalışmada, ETH Zürih'de tamamlanmış bir deneysel programdan yola çıkarak, iki adet U şeklindeki perde duvarı yarı statik tekrarlı yüklemeye tabii tutmuşlardır. Bu çalışmada, bu iki test üniteleri için inelastik geniş kolon modelleri geliştirilmiştir. Kabuk yada katı eleman modeli ile kıyaslandığı zaman yine kurmak için daha kolay olan elastik olmayan özelliklere sahip üç boyutlu bir yapı olarak U şekilli geniş kolon modelinin seçilmesindeki amaç budur. Çalışma, literatürde bulunan tavsiyelere göre inşa edilmiş geniş kolon modellerinin analizi ile başlamaktadır. Bu tavsiyeler elastik sistemlerin analizi ile elde edilmiş olup, geniş kolon modellerinin inelastik davranış üzerindeki etkileri farklı modelleme varsayımları yapılarak araştırılmıştır. Son olarak yapılan testlerden elde edilen deneysel sonuç ile sayısal sonuçlar karşılaştırılarak büyük inelastik deformasyonlara maruz U şeklindeki perdelerin geniş kolon modellerini kurmak için pratik öneriler verilerek çalışma sonlandırılmaktadır.

Kazaz (2010) yapmış olduğu çalışmada, tasarım ve değerlendirmede kullanılan analitik araçların performansının belirlenmesinde doğru gerilme sınırlarının tanımlanması gerektiğini belirlemiştir. Bu amaçla betonarme elemanda dönme, eğrilik ve aderans

kavramlarını araştırmak için sonlu elemanlar modeli kullanmıştır. Bu modeller yardımıyla perde duvar tipi binaların hem statik hem de dinamik özelliklerinin hesaplanabildiğini belirlemiştir.

Sivri (2011) yapmış olduğu çalışmada, kısmi betonarme perde ilavesiyle güçlendirilmiş (ve laboratuarda denenmiş) betonarme çerçevelerin, yatay yükleme altındaki doğrusal olmayan davranışı, sonlu eleman metodunu kullanan ANSYS programı ile incelenmiştir. Bunun için, önce ANSYS programı ile betonarme elemanların nasıl modelleneceği ve malzeme davranışına ait kabuller, kısaca özetlenmiştir. Daha sonra, laboratuarda tersinir statik yükler ile denenmiş perdesiz ve kısmi betonarme perde ile güçlendirilmiş toplam 8 adet model için ANSYS programıyla doğrusal olmayan analiz yapılmış ve çıktılar ilgili deneysel bulgular ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, iki katlı ve iki açıklıklı zayıf bir çerçevenin (hem perdesiz ve hem de perde duvar ile güçlendirilmiş halinin) doğrusal elastik olmayan analizleri, hem ANSYS ve hem de STA4CAD ile yapılmıştır. Bulunan bu dört adet çıktı da, birbiri ile karşılaştırılmıştır.

Constantin and Beyer (2012) yapmış oldukları çalışmada, betonarme perde duvarların çok katlı yapılarda genellikle yanal yükleri karşılamak amacıyla yapıldığını söylemişlerdir. Bu tip duvarların geçmişte plastik mafsal veya eşdeğer ereve yöntemler ile modellendiğini belirtmişlerdir. Bu tip modellemelerin betonarme perde duvarların eğilme davranışını çok iyi yansıttığını belirlemişlerdir. Bu amaçla U Şekli betonarme perde duvarı kabuk eleman kullanarak modellemişlerdir.

Hagen (2012) yaptığı çalışmada, betonarme binalarda perde duvarların ASCE 7-05 standardına göre tasarımı incelemiş ve daha sonra da performansı ASCE 41-06'ya göre dört analiz işlemi kullanılarak araştırmıştır. Önerilen bina San Francisco'da 6 katlı ofis binası olarak planlanmıştır. Taşıyıcı sistem, düşey yükler için iki yönlü düz levha ve betonarme kolonlardan oluşurken, deprem yükleri için de ince perde duvarlardan oluşmaktadır. Matematiksel yapı modellemesinde ASCE 41-06 ve mekaniğin birinci prensibi kullanılmıştır. Moment-Eğrilik analizlerinde ve lif kesitli elemanların doğrusal olmayan uygulamaları için bilgisayar modelleri kullanılmıştır. Analiz işlemleri ile elde

edilen sonuçların, ASCE 41-06'da tanımlandığı gibi binalarda temel güvenlik amacı için olduğu gösterilmiştir. Binalarda doğrusal olmayan performans işlemlerinin doğrusal olan işlemlere göre daha iyi performans verdiği görülmüştür.

Kazaz ve Gülkan (2012) yaptıkları çalışmada, yükseklik genişlik oranı ikiden düşük betonarme duvarı (küt perdeyi), kayma duvarı olarak tanımlamaktadır. Betonarme duvar davranışının yapı sistemi ve beton malzemenin gerilme dağılımına bağlı olarak kesme kuvvetleri tarafından kontrol edildiğini belirtmektedirler. Kırılma ağı, diagonal çekme veya basınç ve taban kesmesi göçme modlarıdır. Yük-yer değiştirme davranışını elde etmek için hem sayısal modelleme hem de malzeme modellerini ele almışlardır. Çalışmalarında kısa kesme duvarının sarsma tablası deneyleri sonuçlarını kullanarak beton malzemenin mekanik özellikleri ile yük-yer değiştirme davranışı sonuçları ve göçme modu sonuçları arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Beton ve Betonarme İçin Matematiksel Modeller

Betonarmenin homojen bir malzeme olmaması yanında, farklı gerilme-birim deformasyon ilişkisine sahip iki malzeme olan beton ve donatı çeliğinin birlikte modellenmesi gerekmektedir. Betonda meydana gelen rötne ve sünme deformasyonlarından dolayı betonarme elemana ait gerilme ve deformasyonlar zamana bağılı değışmektedir. Betonarme elemanlarda görülen aderans, donatı sıyrılması, agrega kilitlemesi (aggregate interlock) ve kaldıraç etkisi (dowel action) gibi tesirlerin modellenmesi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle bir betonarme elemanın modellenmesi sırasında genelde aderansın ya tam olduğu ya da aderansın hiç olmadığı kabulü yapılır.

Diğer bir zorluk ise betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisinin doğrusal olmamasıdır. Gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilen denge denklemleri ile deformasyon cinsinden ifade edilen uygunluk denklemleri arasındaki bağlantı, malzemenin gerilme-birim deformasyon ilişkisinden faydalanılarak kurulur. Gerilme-birim deformasyon arasındaki ilişki ne kadar doğru varsayılırsa sonuç o kadar gerçeğe yaklaşır. Matematiksel özümü kolaylaştırmak için deneylerden elde edilen gerilme-birim deformasyon değerleri idealize edilerek matematiksel modeller oluşturulur.

2.1.1. Sargılı ve sargısız beton için malzeme modelleri

Betonarme elemanların nonlinear analizi sırasında, beton malzemesine ait nonlinear $\sigma-\varepsilon$ eğrisinin tanımlanması gerekmektedir. Basınç gerilmeleri için geliştirilen matematiksel modellerden en yaygın olarak kullanılanları; Hognestad, Geliştirilmiş Kent and Park, Sheikh and Üzümeri ile Saatçioğlu ve Razvi modelleridir. Hognestad modeli dışındaki diğer modellerde etriye/sargı etkisi de dikkate alınmıştır.

Sheikh ve Üzümeri modeli ile Saatçioğlu ve Razvi modeli, sadece sargılı betonun $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi için tanımlanmıştır ve sargı nedeniyle dayanımın arttığı varsayılmıştır. Her iki modelde boyuna donatının konumu ve sargı donatısı düzeni dikkate alınmaktadır.

Thompson and Park modelinde dinamik yükler altındaki tersinir-tekrarlanır yükleme davranışları ele alınmış, yükleme-boşaltma durumunda $\sigma-\varepsilon$ eğrisi tanımlanmıştır.

2.1.1.a. Hognestad modeli

Bu çalışmada kullanılan bir model olan Hognestad modeli, sargısız betonun matematiksel modeli için geliştirilmiştir. Bu modelde $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi; $0-\varepsilon_{c0}$ arasında ikinci dereceden bir parabol, $\varepsilon_{c0}-\varepsilon_{cu}$ arasında ise bir doğru ile modellenmiştir. Şekil (2.1)'de maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma;

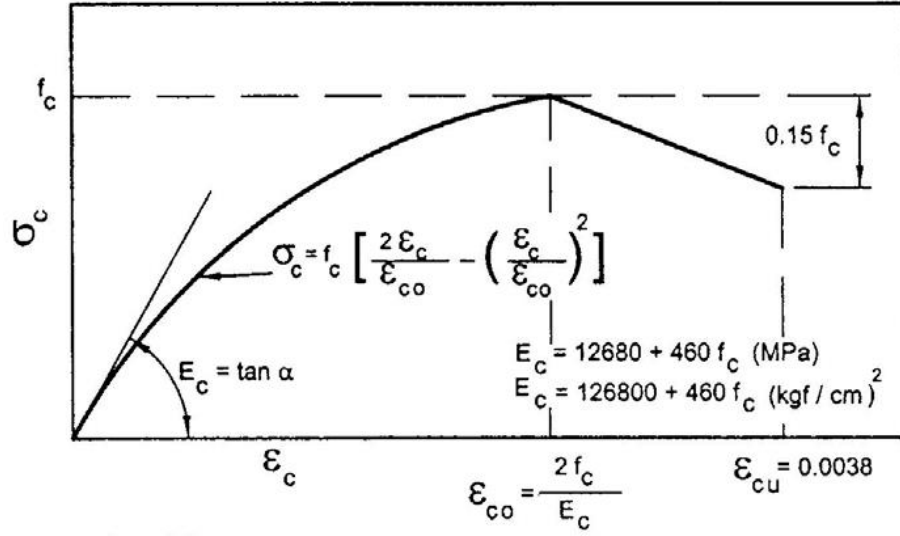
$$\varepsilon_{c0} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilmiştir. $\varepsilon_{c0} = 0,0020$ değeri alınabilir (Ersoy ve Özcebe 2001). Modeldeki elastisite modülü E_c ;

$$E_c = \tan \alpha = 12680 + 460f_c \quad (\text{MPa}) \quad (2.2)$$

olarak tanımlanmıştır. Eğrinin birinci bölümü olan parabol, aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

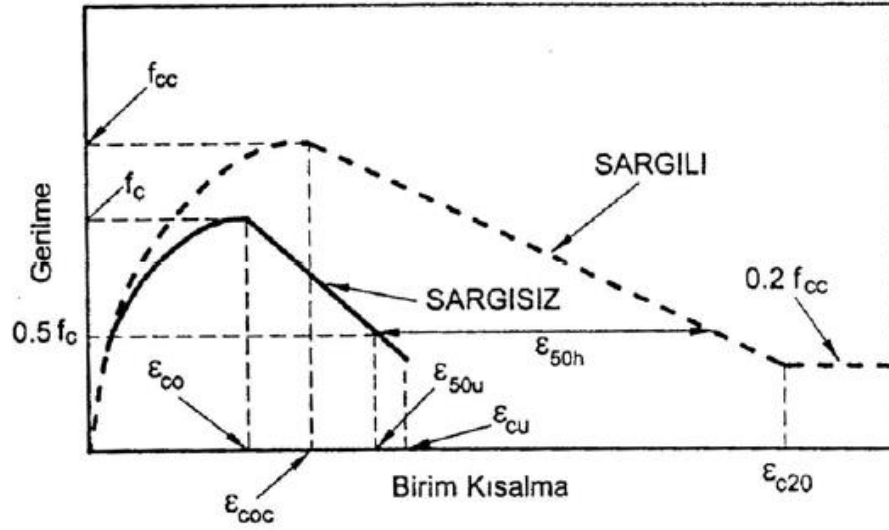


Şekil 2.1. Hognestad malzeme modelinde $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi

Betonun maksimum birim kısalması $\varepsilon_{cu} = 0,0038$, buna karşılık gelen gerilme değeri ise $0,85f_c$ olarak verilmiştir. ε_{co} ile ε_{cu} arasındaki bölgedeki gerilme değerlerini birleştiren doğru ile $\sigma-\varepsilon$ ilişkisi verilmiştir.

2.1.1.b. Geliştirilmiş Kent and Park modeli

Geliştirilmiş Kent and Park modelinde, sargılı ve sargısız beton için iki ayrı $\sigma-\varepsilon$ eğrisi tanımlanmıştır. Bu modelde sargıdan dolayı dayanımın arttığı varsayılmıştır. Sargı nedeni ile beton dayanımı f_c 'den f_{cc} 'ye, maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın ise ε_{co} 'dan ε_{c0c} 'ye yükseldiği varsayılmaktadır. Gerek sargılı, gerekse sargısız beton için önerilen eğrilerin ilk bölümleri ikinci dereceden bir parabol iken, eğrilerin ikinci bölümleri gerilmenin azaldığını gösteren lineer çizgilerden meydana gelmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Geliştirilmiş Kent and Park malzeme modelinde $\sigma - \varepsilon$ ilişkisi

Geliştirilmiş Kent and Park modelinde $\sigma - \varepsilon$ eğrilerini tanımlayan denklemler:

Sargısız beton için parabolik eğri bölgesi:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (2.4)$$

ε_{c0} , normal dayanımlı betonlar için yaklaşık 0,002 alınabilir.

Sargılı beton için parabolik eğri bölgesi:

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{coc} = K \cdot \varepsilon_{c0} \quad (2.6)$$

Sargısız beton için doğrusal bölge:

$$\sigma_c = f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (2.7)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285 f_c}{142 f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (2.9)$$

Sargılı beton için doğrusal bölge:

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c} \quad (2.10)$$

$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})] \geq 0.2 f_{cc} \quad (2.11)$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \left(\frac{b_k}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

f_c : Sargısız betonun basınç dayanımı. Genelde $f_c = f_{ck}$ alınır.

f_{cc} : Sargılı beton basınç dayanımı. $f_{cc} = K.f_c$

ε_{coc} : Sargılı betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon.

ε_{co} : Sargısız betonda maksimum gerilme altındaki birim deformasyon. Genelde

$\varepsilon_{co} = 0,002$ alınır.

Z_u, Z_c sırasıyla, sargısız ve sargılı betondaki $\sigma-\varepsilon$ eğrilerinin doğrusal bölümünün boyutsuz eğimidir.

b_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının küçük boyutu (mm)

h_k : Etriye dışından etriye dışına ölçülen çekirdek beton alanının büyük boyutu (mm)

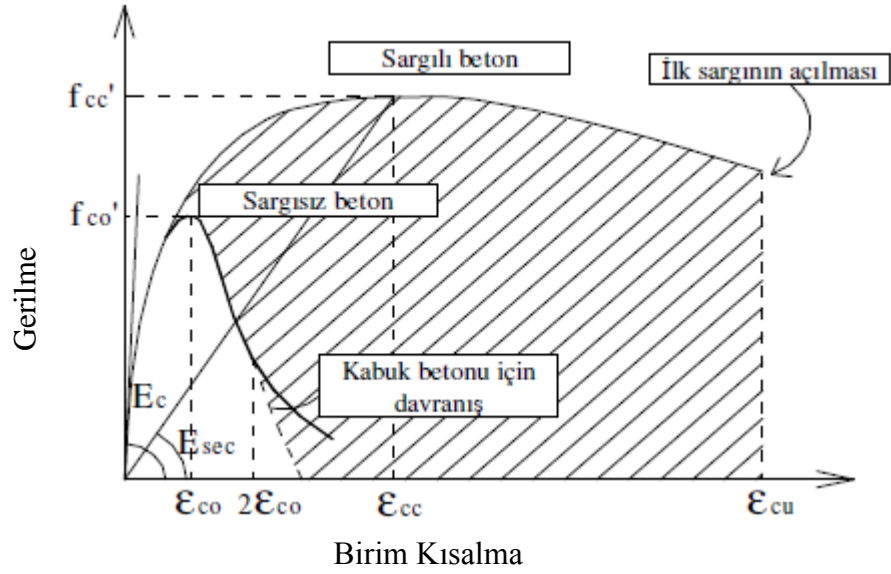
ρ_s : Sargı donatısı kesit alanı

f_{yk} : Sargı donatısının minimum akma dayanımı (MPa)

s : Sargı donatısının aralığı (mm)

2.1.1.c. Mander modeli

Mander ve çalışma ekibi, 1988 yılında hem spiral hem de dikdörtgensel enine donatılı kesitlere uygulanabilen bir model önermişlerdir (Mander *et al.* 1988). Model Sheikh and Uzumeri modeline (Sheikh and Uzumeri 1982) benzer şekilde, etkili olarak sargılanan beton alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Modele göre etkili sargılanamayan beton alanı yatayda boyuna tutulu donatılar arasında, düşeyde de enine donatı adımları arasında 45° derece ilk eğim açısına sahip ikinci derece bir parabol şekline sahiptir. Sheikh and Uzumeri modelinde merkezden merkeze alınan donatılar arası mesafe yerine donatılar arasında bulunan net açıklık dikkate alınmaktadır. Mander tarafından önerilen sargısız ve sargılı beton davranış modelleri Şekil 2.3'de gösterilmiş ve denklemleri de aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.3. Mander sargılı beton modeli

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (2.14)$$

$$\sigma_c = 0 \quad (2.15)$$

$$f_{cc} = f_c \left[2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94 f_1}{f_c}} - \frac{2 f_1}{f_c} - 1,254 \right] \quad (2.16)$$

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

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (2.18)$$

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

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

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

$$f_1 = \frac{f_{1x} + f_{1y}}{2} \quad (2.22)$$

$$f_{1x} = k_e \frac{A_{shx} f_{sy}}{sb} \quad (2.23)$$

$$f_{1y} = k_e \frac{A_{shy} f_{sy}}{sh} \quad (2.24)$$

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

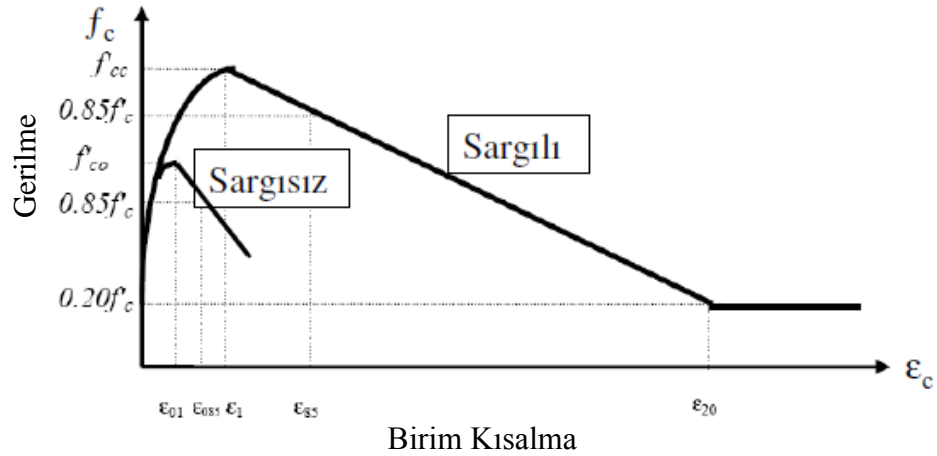
$$\varepsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4\rho_s f_{sy} \varepsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.26)$$

Burada f_1 : ortalama yanal sargı basıncı, f_{1x} : x yönünde oluşan sargı basıncı, f_{1y} : y yönünde oluşan sargı basıncı, k_e : sargılamamanın etkinliği ile ilgili katsayı, A_{shx} : x yönünde uzanan toplam enine donatı kesit alanı, A_{shy} : y yönünde uzanan toplam enine donatı kesit alanı, b : enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu x'e paralel boyutu, h : enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu y'ye paralel boyutu, s : enine donatı merkezinden merkezine ölçülen etriye aralığı, s' : enine donatı net aralığı, n : boyuna donatı sayısı, W_i : boyuna donatılar arası i'nci net açıklık, ρ_{cc} : boyuna donatı kesit alanının beton çekirdek alanına oranı, k_e : sargılamamanın etkinliği ile ilgili katsayı, ε_{cu} : beton nihai basınç birim şekil değiştirme değeri, ε_{cc} : maksimum

gerilmeye karşılık gelen birim şekil değıştirme değeri, ϵ_{su} : enine donatı nihai çekme birim şekil değıştirme değeri.

2.1.1.d. Saatçioğlu ve Razvi modeli

1992 yılında Saatçioğlu ve Razvi tarafından önerilmiştir. Enine donatı yakınında maksimuma ulaşan ve donatılar arasında azalan yanıl basıncın ortalama değeri hesaplanması esasına dayanır. Artan ilk bölüm bir parabol, düşen kol bir doğrudan oluşur (Şekil 2.4). Kent and Park ve Sheikh and Uzumeri modelleri gibi içsel sürtünme nedeniyle beton gerilme değeri, dayanımın belirli bir oranının altına düşmediği varsayılır ($0,20f_{cc}$). Model denklemleri aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 2.4. Saatçioğlu ve Razvi sargılı beton modeli

$$\sigma_c = f_{cc} \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{coc}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1+2\lambda}} \quad (2.27)$$

$$\sigma_c = f_{cc} \left[1 - \frac{0,15(\epsilon_c - \epsilon_{cc})}{\epsilon_{85} - \epsilon_{cc}} \right] \quad (2.28)$$

$$\sigma_c = 0,2 f_{cc} \quad (2.29)$$

$$f_{cc} = k_3 \cdot f_c + k_1 f_{1e} \quad (2.30)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} (1 + 5\lambda) \quad (2.31)$$

$$\lambda = \frac{k_1 f_{1e}}{k_3 f_c} \quad (2.32)$$

$$k_1 = 6,7 (f_{1e})^{-0,17} \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_{85} = 260 \rho_s \varepsilon_{cc} + \varepsilon_{085} \quad (2.33)$$

$$f_{1e} = \frac{f_{1ex} b_x + f_{1ey} b_y}{b_x + b_y} \quad (2.34)$$

$$f_{1ex} = \beta_x f_{1x} \quad (2.35)$$

$$f_{1ey} = \beta_y f_{1y} \quad (2.36)$$

$$f_{1x} = \frac{\sum A_o f_{sy} \sin \alpha_x}{s b_x} \quad (2.37)$$

$$f_{1y} = \frac{\sum A_o f_{sx} \sin \alpha_y}{s b_y} \quad (2.38)$$

$$\beta_x = 0,26 \sqrt{\left(\frac{b_x}{a_x}\right) \left(\frac{b_x}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{1x}}\right)} \quad (2.39)$$

$$\beta_y = 0,26 \sqrt{\left(\frac{b_y}{a_y}\right) \left(\frac{b_y}{s}\right) \left(\frac{1}{f_{1y}}\right)} \quad (2.40)$$

Burada f_{1e} : efektif yanal sargı basıncı, f_{1x} : x yönünde oluşan sargı basıncı, f_{1y} : y yönünde oluşan sargı basıncı, f_{1ex} : x yönünde oluşan efektif sargı basıncı, f_{1ey} : y yönünde oluşan efektif sargı basıncı, k_3 : betonun özelliğine bağlı katsayı (“0,85 ile 1,0” arasında beton özelliğine bağlı katsayı ve genel olarak “1,0” alınabilir), A_o : enine donatı kesit alanı, b_x : enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu x’e paralel boyutu, b_y : enine donatı merkezlerinden ölçülen çekirdek betonu y’ye paralel boyutu, s : enine donatı merkezinden merkezine ölçülen etriye aralığı, a_x : b_x boyunca tutulan boyuna donatılar arası mesafe, a_y : b_y boyunca tutulan boyuna donatılar arası mesafe, α_x : enine donatı ve b_x arasındaki açı, α_y : enine donatı ve b_y arasındaki açıdır.

2.2. ANSYS’de Kullanılan Betonarme Malzeme Modelleri

Beton malzemenin yükleme altındaki (bir eksenli, iki eksenli ve üç eksenli) davranışı oldukça karmaşıktır. Çatlama, ezilme, gerilme sertleşmesi, basınç azalması, aderans yapışması gibi beton davranışları doğrusal olmayan malzeme modeli ile verilmektedir. Betonun doğrusal olmayan davranışının iki önemli sebebi; donatının plastik davranışı ve betonun yük altında çatlama olmasıdır. Çekme çatlakları betonun rijitliğini azaltır ve genellikle, iki eksenli çekme - basınç gerilmeleri taşıyan duvar, panel veya perde gibi elemanlar bulunan betonarme yapının doğrusal olmayan davranışını büyük oranda etkiler. Bu tür yapılar için betonun çatlama davranışını doğru modellemek, hiç şüphesiz ki en büyük zorluklardan biridir.

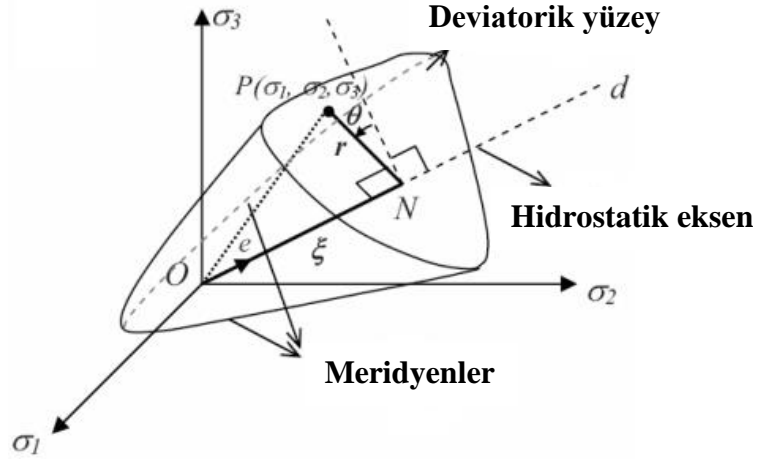
ANSYS betonarme elemanların modellenmesinde kullanılmak üzere farklı malzeme özellikleri sunar. Programda Willam-Warnke (1975) ölçütü beş parametre SOLİD65 elemanı ile kullanılmak üzere verilmektedir. Modelde, betonda ezilme oluşana kadar gerilme-şekil değiştirme arasında, doğrusal elastik bir ilişki olduğu kabul edilir. Plastisite yasası kullanılmaz ise, betonun şekil değiştirme kapasitesi düşük çıkmaktadır. Çünkü kırılma-ezilme yükü aşılana kadar beton, doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. ANSYS yazılımı, basınç altındaki betonarme elemanların böyle doğrusal olmayan davranışını yansıtabilecek birçok özelliği (kinematik ve izotropik plastisite) dikkate almaktadır. Drucker-Prager plastisite modeli (DP), Von-Mises tek eksenli (BISO) ve multi-doğrusal izotropik gerilme plastisitesinin (MISO) Willam-Warnke malzeme modelinin (CONC) gerilme göçme kriteri ile birleştirilmiş halidir. Parantez içinde verilen notasyon ANSYS de kullanılan plastisite modellerini ifade etmek için kullanılır.

2.2.1. Willam-Warnke göçme kriteri

Betonun göçme yüzeyinin genel özellikleri deneylerle tespit edilebilir. Deney sonuçları sapma yüzeyindeki göçme eğrisinin sahip olduğu genel özellikleri göstermektedir. Göçme eğrisinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Göçme eğrisi düzgündür.
- Basınç gerilmelerinde göçme eğrisi dış bükeydir.
- Göçme eğrisinin enine kesiti üç eksenli simetriktir.
- Göçme eğrisi çekme ve küçük basınç gerilmeleri için yaklaşık üçgendir (Π yüzeyine yakın küçük ξ değerlerine karşılık gelen) ve yüksek basınç değerleri (ξ nin artmasına veya yüksek hidrostatik basınca karşılık gelen) için giderek şişkinleşir.

Bu durumdan sonra üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme yüzeyinin şekli sapma düzleminde kesit şekli ile boylam düzleminde (θ =sabit ile hidrostatik eksen içeren alan) meridyenlerle tanımlanabilir (Haigh and Westergaard 1975). Şekil 2.5’de yukarıda verilen özelliklere göre göçme yüzeyinin genel geometrik şekli verilmiştir.



Şekil 2.5. Üç boyutlu gerilme yüzeyinde göçme eğrisi

Beton malzeme modeli kırılma malzemenin göçmesini öngörür. Hem çatlama hem de kırılma göçme modları verilmektedir. Çok eksenli gerilme durumunda betonun göçme kriteri formu aşağıdaki gibi verilebilir (Willam and Warnke 1975):

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (2.41)$$

F : Asal gerilme durumunun bir fonksiyonu ($\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$),

S : Beton malzeme çizelgesinde beş parametre ($f_t, f_c, f_{cb}, f_1, f_2$) ve asal gerilme terimleriyle ifade edilen kırılma yüzeyi

f_c : Tek eksenli basınç dayanımı

$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$: Asal gerilmeler

Eğer (2.41) denklemi sağlanmazsa, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Aksi takdirde malzeme ya ezilir ya da çatlar. Eğer bütün gerilmeler basınç ise ezilme meydana gelir, ancak; asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlayacaktır.

Hem kırılma yüzeyini hem de ortamdaki hidrostatik gerilme durumunu tanımlamak için toplam beş dayanım parametresine (her biri sıcaklığa bağlı olarak tanımlanabilir) ihtiyaç duyulur. Bu parametreler malzeme çizelgesinde verilmelidir (Çizelge 2.1). Bu çizelge concrete menüsü veya TB,CONCR komutu yardımıyla tanımlanabilir.

Çizelge 2.1. Beton malzeme tanım çizelgesi

Sembol	Açıklama
f_t	Tek eksenli çekme dayanımı
f_c	Tek eksenli basınç dayanımı
f_{cb}	İki eksenli basınç dayanımı
σ_h^a	Ortamdaki hidrostatik gerilme durumu
f_1	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan iki eksenli basınç durumu için basınç dayanımı
f_2	Hidrostatik gerilme durumuna (σ_h^a) eklenecek olan tek eksenli basınç durumu için basınç dayanımı

Kırılma yüzeyinin en az iki sabit (f_t, f_c) ile de tanımlanması mümkündür. Diğer üç sabit için ANSYS şu değerleri varsayar:

$$f_{cb} = 1,2f_c \quad (2.42)$$

$$f_1 = 1,45f_c \quad (2.43)$$

$$f_2 = 1,725f_c \quad (2.44)$$

Bu varsayılan değerler, sadece denklem (2.45) şartının sağlandığı gerilme durumları için geçerlidir. Eğer hidrostatik gerilme durumu bu şartı sağlamazsa, kullanıcının bu parametreleri kendisinin tanımlaması gereklidir.

$$\sigma_h \leq \sqrt{3}f_c \quad (2.45)$$

Hem F fonksiyonu hem de S kırılma yüzeyi $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ifadeleriyle gösterilen asal gerilme terimleri cinsinden ifade edilir. Bu asal gerilmeler:

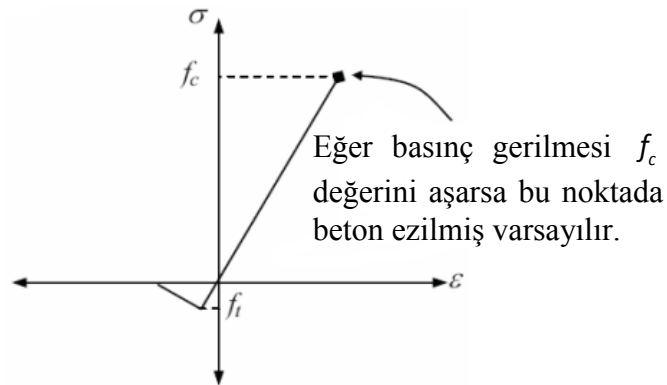
$$\sigma_1 : \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (2.46)$$

$$\sigma_3 : \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (2.47)$$

ve $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ tür. Betonun kırılma hali 4 grupta toplanabilir:

- 1) $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Basınç-Basınç-Basınç)
- 2) $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Çekme-Basınç-Basınç)
- 3) $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ (Çekme-Çekme-Basınç)
- 4) $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ (Çekme-Çekme-Çekme)

Eğer Willam-Warnke'nin göçme kriteri plastisite ilkesiyle birleştirilmemişse, betonun davranışı kırılma durumunda doğrusaldır ve kırılma gerilmesi güç kaybından dolayı ilk göçme yüzeyinde sonuçların sıfır olması ile rijitliğin azalmasına katkıda bulunarak eleman rijitliğini azaltır. Bir eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Şekil 2.6'da verilmiştir. Plastisite ilkesiyle birleştirilen göçme kriterinin daha iyi sonuçlar vereceği gözükmektedir.



Şekil 2.6. ANSYS'de Willam-Warnke bir eksenli gerilme durumu

2.2.2. Von-Mises akma kriteri

Betonun basınç altındaki davranışını temsil etmede, izotropik zorlanmayla Von-Mises plastisite modeli (BISO), kinematik zorlanma veya bileşik zorlanma yaygın olarak kullanılır. İzotropik zorlanmayla Von-Mises akma kriteri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F = \sqrt{J_2} - \sigma(\varepsilon_p) = 0 \quad (2.48)$$

Burada J_2 , esas gerilme alanında tanımlanabilen ikinci gerilme sabiti:

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right] \quad (2.49)$$

Denklem 2.48'deki $\sigma(\varepsilon_p)$ plastik uzamaya karşılık gelen zorlanma gerilmesi olarak tanımlanır. ε_p aşağıdaki denklemdeki gibidir:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p} \quad (2.50)$$

Burada ε_{ij}^p birim uzama bileşenine karşılık gelen plastik kısımdır. Bu modelde hidrostatik gerilmenin büyüklüğünün bağımsız olması, büyük basınç gerilmelerinde beton için uygun plastisite modelinin oluşturulamamasına neden olmaktadır. Basınç durumunda, beton dayanımıyla uyumlu şekil değiştirmelerin birlikte verildiği BISO malzeme modelini ANSYS programında kullanmak oldukça uygun olmaktadır. Bu modelin çelik donatının modellenmesinde kullanılması daha uygun olmaktadır.

2.2.3. Drucker-Prager plastisite modeli

Granüler malzemenin basınç davranışının modellenmesi için ANSYS’de kullanılan ikinci bir malzeme modeli de Drucker-Prager akma kriteridir. Drucker-Prager tarafından önerilen Mohr-Coulomb yüzeyine düzgün bir yaklaşım Von-Mises akma kriterinin değiştirilmiş halidir.

$$f(I_1, I_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \tau_0 \quad (2.51)$$

Burada α ve τ_0 pozitif malzeme parametreleridir. $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ gerilme tensörünün birinci sabiti olup, J_2 ise Denklem 2.49’da verilmiştir. Aynı şekilde, $\xi = I_1 / \sqrt{3}$ ve $r = \sqrt{2J_2}$ kullanılmasıyla gerilme durumunun geometrik yorumu ve akma yüzeyi belirlenebilir:

$$f(\xi, r) = \sqrt{6}\alpha\xi + r - \sqrt{2}\tau_0 = 0 \quad (2.52)$$

Gerilme tensörünün deviatorik bileşeni r ve hidrostatik bileşeni ξ ’dir. Drucker-Prager modeli çok eksenli basınç gerilmesi etkisindeki beton yüzeyinde iyi sonuçlar verir ve akma yüzeyi düzdür. Deneysel verilerle Drucker-Prager modeli karşılaştırıldığında çok eksenli basınç gerilmesi etkisindeki betonun davranışını modellemede kullanılmasının uygun olduğunu, basınç-çekme veya çekme-çekme yüklemesi yapılan betonun kapasitesini daha yüksek hesaplamaktadır.

ANSYS programında kullanılan Drucker-Prager parametreleri (α ve τ_0) Mohr-Coulomb modelinde tanımlanan c ve ϕ terimleriyle yorumlanmaktadır. c parametresi kohezyon ve ϕ içsel sürünme açısı olarak tanımlanır. Mohr-Coulomb kriteri için genel tanım aşağıdaki gibi verilebilir:

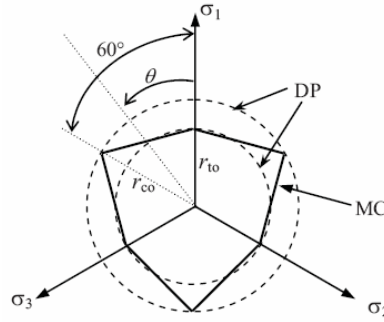
$$(1 + \sin \phi)\sigma_1 - (1 - \sin \phi)\sigma_3 = 2c \cdot \cos \phi \quad (2.53)$$

Betonun bir eksenli çekme ve basınç göçme durumu için karakteristik dayanma değeri Mohr-Coulomb gerilme ilişkisiyle aşağıdaki gibi tanımlanır:

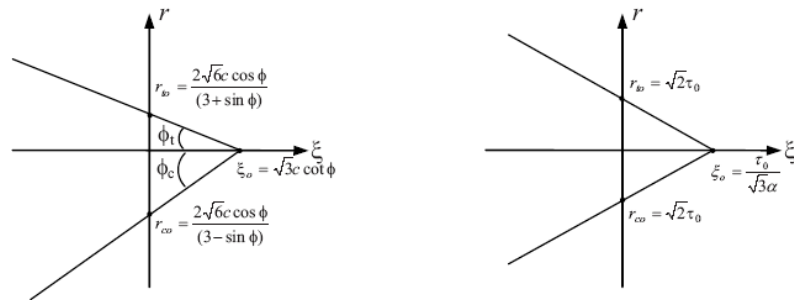
$$f_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (2.54)$$

$$f_c = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.55)$$

Drucker-Prager sabitleri, Mohr-Coulomb sabitleri c ve ϕ ile ilişkilendirilebilir. Drucker-Prager kriterinin konisinin büyüklüğü, basınç meridyenlerine karşılık gelen köşelerin birleştirilmesiyle oluşan Mohr-Coulomb altıgeni ile veya Şekil 2.7'de verilen çekme meridyenleriyle ayarlanabilir.



Şekil 2.7. Drucker-Prager kriterinin göçme yüzeyine eşlenmesi



Şekil 2.8. Deviatorik Gerilme vb. durumunda meridyenlerin gösterimi

Üç boyutlu eşleşen durumda, eğer iki göçme yüzeyi basınç meridyenlerinde karşılaşırsa malzeme sabitlerinden iki tanesi aşağıdaki gibi ilişkilendirilir:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \tau_0 = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (2.56)$$

Eğer çekme meridyenleri kullanılırsa:

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad \tau_0 = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (2.57)$$

Çeşitli yükleme durumlarında betonun davranışındaki değişiklikten dolayı malzeme sabitlerinin de farklı tanımlanması gerekir. Drucker-Prager sabitleri α ile τ_0 , iki eksenli gerilme durumunda Mohr-Coulomb sabitleri c ile ϕ , malzeme testlerinden elde edilen iki nokta ile bulunur.

Düzlem gerilme altında ($\sigma_2 = 0$), gerilme tensörünün sabiti, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_3$ ve $J_2 = (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3) / 3$ olarak verilebilir. Bir eksenli basınç ve çekme testleri ile iki eksenli basınç deneyleri dikkate alınarak, gerilmenin temel değerleri, I_1 ve J_2 sabitleri ve Haigh-Westergaard koordinatları, ξ , r ve θ Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Drucker-Prager kriteri durumu için, bir eksenli basınç (f_c) ve çekme (f_t) altında pik gerilmelerin değerleri yerine konur ve model parametreleri Denklem 2.54 ve 2.55 için çözümlerse aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$\alpha = \frac{f_c - f_t}{\sqrt{3}(f_c - f_t)} \quad (2.58)$$

$$\tau_0 = \frac{2f_c f_t}{\sqrt{(f_c + f_t)}} \quad (2.59)$$

Düzlem gerilme durumu altında, Denklem 2.51'deki kriter aşağıdaki formda verilebilir.

$$4(\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \left(2 - 3\frac{f_c^2 + f_t^2}{f_c + f_t}\right)\sigma_1\sigma_3 + 4(f_c + f_t)(\sigma_1 + \sigma_3) - 4f_c f_t = 0 \quad (2.60)$$

Çizelge 2.2. Drucker-Prager modeli parametrelerinin hesaplanması

Gerilme Durumu	σ_1	σ_3	I_1	J_2	ξ	r	θ , derece
Bir Eksenli Çekme	f_t	0	f_t	$f_t^2/3$	$f_t/\sqrt{3}$	$f_t\sqrt{2/3}$	0
Bir Eksenli Basınç	0	$-f_c$	$-f_c$	$f_c^2/3$	$f_c/\sqrt{3}$	$f_c\sqrt{2/3}$	60
Eş İki Eksenli Basınç	$-f_{bc}$	$-f_{bc}$	$-2f_{bc}$	$f_{bc}^2/3$	$-2f_{bc}/\sqrt{3}$	$f_{bc}\sqrt{2/3}$	0

f_t/f_c oranına bağlı olarak Denklem 2.61 elips, parabol veya hiperbol olabilir. Çekme ve basınç altındaki bir eksenli dayanımların birbirine uyumuyla, gerçek göçme zarfında tek eksenli çekme ve çekme-basınca karşılık gelen uygun bir değer kullanmak gerekir. Ancak, basınç-basınç altında eş iki eksenli dayanım noktası sonsuz olur, çünkü f_t/f_c oranı azalır. Diğer yandan, bir eksenli basınç durumunda iyi bir yaklaşım elde etmek için tek eksenli ve eş iki eksenli basınç (f_{bc}) dayanımı birleştirilmesiyle elde edilebilir. Bu sonuçla;

$$\alpha = \frac{f_{bc} - f_c}{\sqrt{3}(2f_{bc} - f_c)} \quad (2.61)$$

$$\tau_0 = \frac{f_{bc} f_c}{\sqrt{3}\sqrt{2}(f_{bc} - f_c)} \quad (2.62)$$

Denklem 2.61'e benzer olarak, düzlem gerilme altında, basınç bölgesinde daha iyi bir yaklaşım elde edebilmek için aşağıda verilen form da yazılabilir.

$$\left(2 - 3 \frac{f_{bc}}{f_c}\right) (\sigma_1^2 + \sigma_3^2) + \left(3 \frac{2f_{cb}^2 + f_c^2}{f_c f_{bc}} - 8\right) \sigma_1 \sigma_3 - 2(f_{bc} - f_c)(\sigma_1 + \sigma_3) + f_c f_{bc} = 0 \quad (2.63)$$

2.2.4. Multilineer pekleşme plastisitesi modeli (MISO, MKIN ve KINH)

Basınç etkisindeki betonun modellenmesinde kullanılan BISO ve DP modellerinin en büyük eksikliği hem betondaki yumuşamanın modellenememesi, hem de zorlanma ve yumuşamadan daha sonraki davranışın modellenememesinden kaynaklanmaktadır.

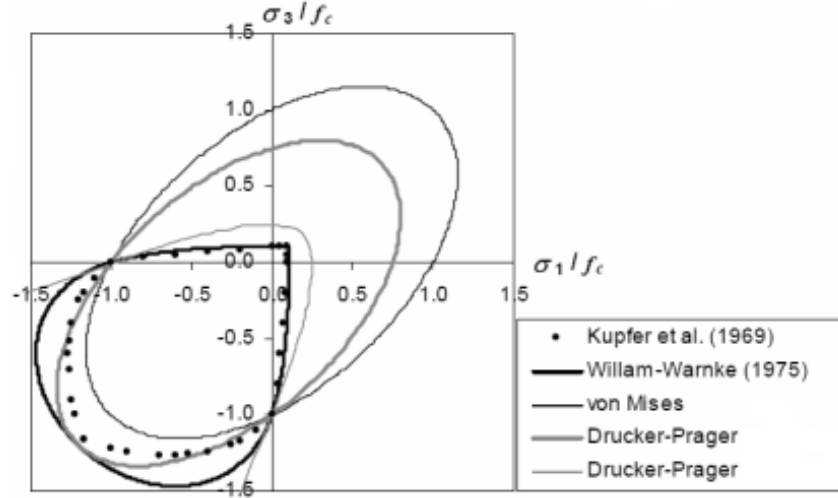
Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan eğri kısmı için ANSYS malzeme modelleri kütüphanesindeki multilineer plastisite modeli kullanılır. Multilineer izotropik sertleşme (Multilineer Isotropic Hardening, MISO) özellikleri iki doğrulu eğri yerine multilineer doğru kullanılması dışında iki doğrulu izotropik sertleşme özelliklerine benzer.

Tepe noktalarıyla tanımlanan ve pekleşme özelliklerinin tanımlandığı malzeme modelleri kullanıldığı zaman, sonlu eleman çözümlerinin sonlu eleman boyutunda sahte bir duyarlılığa sahip olduğu ve burada elemanların yakınsamasında zorluklarla karşılaşılacağı bilinmektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan sonlu eleman analizi kuvvet tipi yüklemde, modelin ulaştığı nihai kuvvetten sonra gerilme-şekil değiştirme eğrisinin düşmeye başladığı yumuşama kısmını verememektedir. Betonarme elemanın, yer değiştirme kontrollü yüklenmesi nihai yüklemekten sonra yakınsama sağlanması amacıyla verilir.

2.2.5. Birleştirilmiş malzeme modeli

Beton davranışı modellenirken basınç yüklemesi için yukarıda bahsedilen modeller, çekme yüklemesi için Willam-Warnke modeli ile birlikte kullanılarak kırılma yüzeylerinin plastik davranışı verilmektedir.

ANSYS’de plastisite tabanlı modeller Willam-Warnke beton malzeme özellikleriyle tanımlandığında plastisite kontrolü çatlama ve ezilme kontrolünden önce yapılır. Malzeme modelinin herhangi bir noktasının akması veya çatlama ana gerilmeler üzerinde değerlendirilir. Bu yaklaşım problemi yaklaşık düzlem gerilme durumuna azaltmanın bir yoludur. Şekil 2.9’da verilen grafikte akma yüzeylerinin göz önüne getirilmesi için birleştirilmiş malzeme modelleri aynı grafikte verilmiştir.



Şekil 2.9. Willam-Warnke, Drucker-Prager ve Von-Mises malzeme modelleri

Bu görünümde ve düzlem gerilme probleminin basitleştirilmesinde, Şekil 2.9’dan görüleceği gibi, çekme-çekme ve çekme-basınç eğrileri için beton çatladıktan sonra Willam-Warnke modelinin geçerli olacağı açıktır. Çatlak düzlemi üzerindeki gerilmede azalma, çatlak doğrultusuna dik durumdaki gerilmeyi azaltır. Çatlak üzerindeki gerilmenin azalmasına takiben her iki modelde çekme-basınç eğrileri birbirilerini etkileyecektir. Basınç-basınç eğrilerinde tam olarak plastik davranış geçerli olacaktır.

Bu açıklama şu sonuca yol açar. Çatlak yüzeyine dik doğrultuda sıfır çekme gerilmesiyle çatlamış beton dikkate alındığında, eşdeğer gerilme hesaplaması $\sigma_2 = 0$ için beton basınç dayanımına tamamen bağlıdır.

İki eksenli gerilme durumunda ANSYS'de Willam-Warnke beton modeli ile Drucker-Prager malzeme modeli parametrelerinin birlikte verilmesi durumunda, bu parametrelerin betonun gerçek basınç dayanımına (f_c) yakın belirlenmesi gerektiğini belirtmek gerekir.

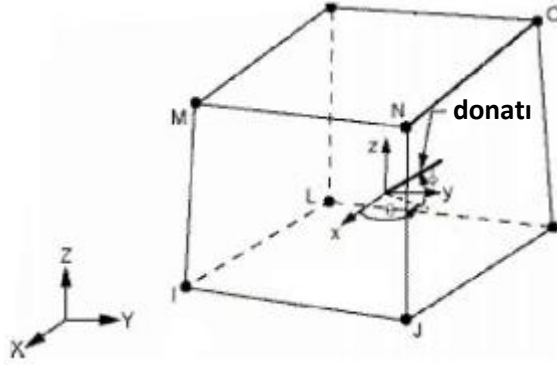
2.3. ANSYS'de Kullanılan Sonlu Elemanların Tanıtılması

ANSYS programında, farklı yapı ve malzeme davranışları için çeşitli elemanlar tanımlanmıştır. Donatılı veya donatısız 3-D betonarme eleman modellemesi için SOLİD65 elemanı tanımlanmaktadır. Betonarme donatısının modellemesinde iki yöntem vardır. Birincisi, SOLİD65 eleman içerisinde donatının yayılı olarak kabul edildiği yayılı donatı modeli, ikincisi ise donatının eksenel yük taşıyan LİNK8 çubuk eleman olarak tanımlandığı ayrık donatı modelidir. Bu tez çalışmasında, beton SOLİD65 eleman ile modellenmiştir.

2.3.1. SOLİD65 elemanı

SOLİD65, her düğüm noktasında üç öteleme serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasından oluşan bir elemandır. Bu 3D blok eleman, çekme gerilmelerinde çatlama, basınç gerilmelerinde ezilme (plastik şekil değiştirme) özelliklerine de sahiptir. Çatlak oluşumu, etkili ayrık çatlak veya yayılı band çatlakları olarak, iki farklı şekilde verilmektedir. Yayılı band çatlakları, malzeme özelliklerinde bir ayarlama ile elde edilmektedir. Beton malzemesi başlangıçta izotropik olarak tanımlanır. Farklı üç yönde donatı tanımlanabilir. Bağlar ve etriyeler bu özellik kullanılarak modellenebilir. Tanımlanan donatılar çekme ve basınç kuvvetlerini taşır, kesme kuvvetlerini taşımaz.

SOLID65, plastik şekil değiştirme yeteneğine de sahiptir. Geometri, düğüm yerleri ve koordinat sistemi Şekil 2.10’da verilmiştir.



Şekil 2.10. SOLID65 elemanı geometrisi (ANSYS kullanım kılavuzu)

Sekiz düğüm noktalı izoparametrik SOLID65 elemanı, sekiz birleşim (düğüm) noktası ile, (2x2x2) geometri ve yer değiştirme için sekiz enterpolasyon fonksiyonu verilmektedir. Bu eleman için enterpolasyon şekil fonksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 \pm \xi)(1 \pm \eta)(1 \pm \zeta) \quad i=1, \dots, 8 \quad (2.64)$$

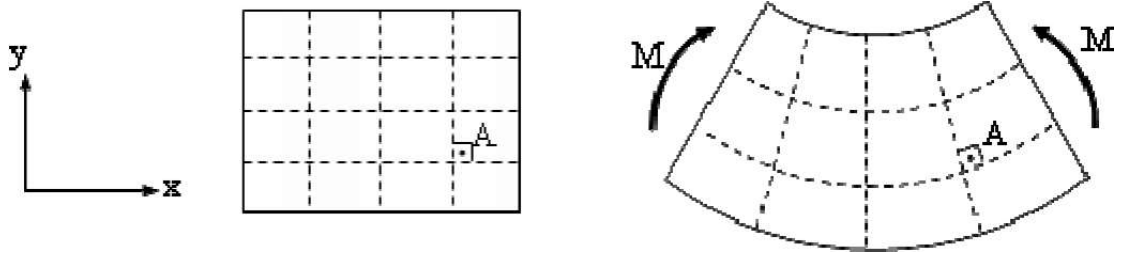
Bu N_i şekil fonksiyonuna bağlı olarak, noktasal yer değiştirme (u_i, v_i, w_i) eleman üzerindeki bir noktanın (ξ, η, ζ) koordinatlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} u &= u_1 N_1 + u_2 N_2 + \dots + u_8 N_8 \\ v &= v_1 N_1 + v_2 N_2 + \dots + v_8 N_8 \\ w &= w_1 N_1 + w_2 N_2 + \dots + w_8 N_8 \end{aligned} \quad (2.65)$$

2.3.1.a. Kesme gerilmesi ve yerdeğiştirme

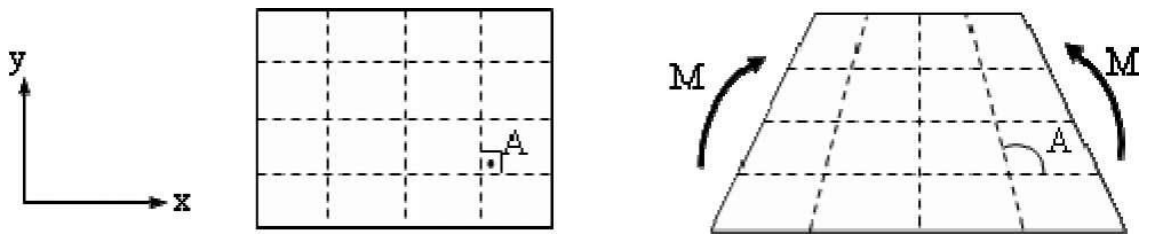
Malzemenin tanımlandığı blok elemanın yüzeyleri Şekil 2.11’de görüldüğü gibi, üç koordinat düzlemine (xy, xz, yz) paraleldir. Sürekli ortam, yeterli (ve çok) sayıda kübik

elemanlara bölünür. Sadece eğilme momenti etkisinde, elemanın yatay düzlemdeki kenar çizgileri birer eğri halini alır (düşey çizgiler ise doğru olarak kalır). Bununla birlikte, her bir düğüm noktasında, bütün yüzeyler, şekil değiştirmeden sonra da, birbirine dik kalır. Bundan dolayı $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = 0$ ve $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ bulunur.



Şekil 2.11. Eğilme momenti etkisindeki elemanda şekil değiştirme

Sürekli ortam, burada ele aldığımız SOLID65 elemanı ile sonlu elemanlara bölüldüğünde ise malzemesi aynı olan bu elemanlar, eğilme momenti etkisi altında Şekil 2.12'deki gibi şekil değiştirmektedir. Tüm kesik çizgiler (eleman ayrıtları) düz kalmaktadır, fakat A açısı artık 90° değildir. Bu durum, eleman içinde sabit gerilme dağılımı demek olan doğrusal yer değiştirme fonksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Böyle bir durum, elemanın şekil değiştirme enerjisinin, eleman hacmi içinde, kayma şekil değiştirmesi olarak oluştuğunu (eğilme şekil değiştirmesinin pek oluşmadığını) gösterir. Malzeme ile uyumlu olmayan böyle kesme gerilmelerinin tanımlanması, saf eğilme momenti etkisinde, aşırı yüklenmeye neden olmaktadır. Kesme kilitlenmesi (Shear Lock) olarak tanımlanan bu durum; hatalı şekil değiştirme, yanlış gerilme ve sahte doğal frekans değerleri vermektedir.



Şekil 2.12. SOLID65 elemanının eğilme momenti etkisinde şekil değiştirmesi

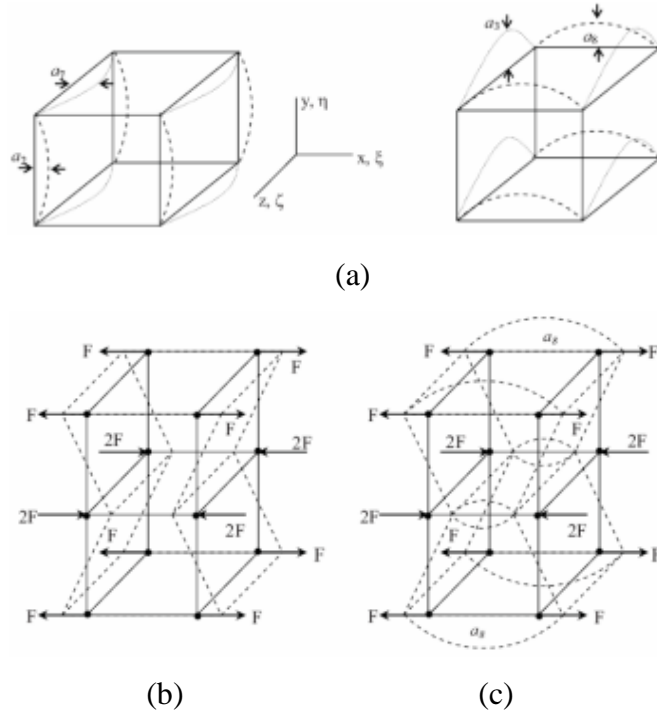
Bunu önlemek üzere, eleman yer değiştirme fonksiyonlarına, eğilme modları da eklenmektedir. Bu tip "uyumsuz yer değiştirme fonksiyonu modları", eğilme uygulamalarını modellemek açısından, çok daha iyi sonuçlar verir. Yoksa sekiz düğüm noktalı bu katı elemanlar (dört düğüm noktalı yüzey eleman gibi), kesme kilitlenmesi durumuna düşecektir.

Eğer hacimsel şekil değiştirme aranıyor ise, işlem hızını artırmak, kaydetme dosyasını küçültmek ve yakınsama hatalarını azaltmak için gereksiz şekil değiştirme hesaplamaları kapatılmalıdır. Ancak bunu yaparken herhangi bir eğilme modeli kapatılmamalıdır. Böyle bir durumda eğilme doğrultusundaki eleman sayısı artırılmalıdır. Yapısal analiz için, ilave şekil fonksiyonlarıyla elemanın köşe düğüm noktasının uygun bir çözümünü elde etmek için bilgisayarın daha fazla çalışması gerekecektir. İlave şekil fonksiyonları göz önüne alındığında, yer değiştirme aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 u &= u_1N_1 + u_2N_2 + \dots + u_8N_8 + a_1(1 - \xi^2) + a_2(1 - \eta^2) + a_7(1 - \zeta^2) \\
 v &= v_1N_1 + v_2N_2 + \dots + v_8N_8 + a_3(1 - \xi^2) + a_4(1 - \eta^2) + a_8(1 - \zeta^2) \\
 w &= w_1N_1 + w_2N_2 + \dots + w_8N_8 + a_5(1 - \xi^2) + a_6(1 - \eta^2) + a_9(1 - \zeta^2)
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

Burada her a_i , bir serbestlik derecesidir. Her bir a_i , ne başka bir düğüm noktası ile ilişkilidir ne de başka bir elemanın serbestlik derecesi ile bağlantılıdır. Bu, a_i ile bağlantılı yer değiştirme modu, Denklem 2.66 eşitlikleri (yer değiştirme değerleri) ile her bir eleman için (ayrık ortam bazında) ayrı ayrı gösterilmektedir.

İlave şekil değiştirme fonksiyonları ile tanımlanan eleman davranışı Şekil 2.12'de gösterildiği gibi olduğundan "uyumsuz" olarak adlandırılır. Çünkü Şekil 2.13b'de gösterilen yükleme durumunda elemanlar arasında boşluk oluşur (Şekil 2.13c).



Şekil 2.13. Sonlu eleman yer değiştirme modları

Hiç boşluk veya örtüşme (uyumsuzluk) oluşmaması, fiziksel devamlığı gösterir. Sabit gerilmeye maruz elemanların şekil değiştirmemiş durumdaki düz çizgileri (sabit gerilme durumunda olduğu gibi), şekil değiştirmeden sonra da düz kalır. Böyle ilave şekil fonksiyonlarını da barındıran elemanlardan oluşan bir model, kesin sonuca çok daha iyi yaklaşır. İlave şekil değiştirme fonksiyonlarının da tanımlandığı böyle sonlu elemanlar ile, azalarak (yukarıdan aşağıya) yakınsama olmaktadır. Buna karşılık, bu ilave şekil fonksiyonları olmayan sonlu elemanlar ise, artarak (aşağıdan yukarıya) yakınsamaktadır. Çünkü bu basit elemanlar, çok daha rijittir.

2.3.1.b. Varsayımlar ve sınırlamalar

Malzeme modellemede tanımlanan en temel varsayımlar aşağıdaki gibidir:

1) Beton malzeme başlangıçta izotropik kabul edilir. Beton için simetrik malzeme rijitlik matrisi $[D]$ aşağıdaki gibidir.

$$[D^C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Burada E , Elastisite Modülü ve ν , betonun Poisson Oranı'dır.

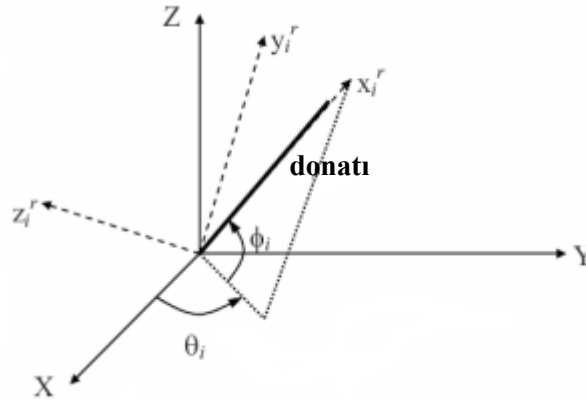
2) Beton içindeki donatı da dikkate alınacak ise, donatı beton eleman içerisinde yayılı olarak tanımlanır. Donatı miktarı, donatı hacminin toplam hacme bölünmesiyle tanımlanan hacimsel oran olarak tanımlanır. Bu oran, donatının gerilme-şekil değiştirme matrisinde, D^R olarak alınır ve Denklem 2.68 de verildiği gibi kullanılır.

$$[D] = (1 - \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R) [D^C] + \sum_{i=1}^{N_R} V_i^R \cdot [D^R]_i \quad (2.68)$$

Bu denklemde, N_R farklı donatı malzemelerinin sayısı, D^C betonun gerilme – şekil değiştirme matrisi, D^R donatı malzemesinin gerilme-şekil değiştirme matrisi, V_i^R donatının hacimsel oranını, V_i ise elemanın toplam hacmini ifade eder.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx}^r \\ \sigma_{yy}^r \\ \sigma_{zz}^r \\ \sigma_{xy}^r \\ \sigma_{yz}^r \\ \sigma_{xz}^r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} = [D^r]_i \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^r \\ \varepsilon_{yy}^r \\ \varepsilon_{zz}^r \\ \varepsilon_{xy}^r \\ \varepsilon_{yz}^r \\ \varepsilon_{xz}^r \end{Bmatrix} \quad (2.69)$$

Denklem 2.69’da, E_i donatı tipine göre verilen elastisite modülüdür. σ_{xx}^r , i . donatı tipinin x_i^r ekseninde normal gerilmesinin sıfır olmayan tek gerilme bileşenidir. Eleman koordinat sistemi (X, Y, Z) olarak tanımlanır. Donatı için tanımlanan donatı koordinat sistemi ise, x_i^r, y_i^r, z_i^r dir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Donatı doğrultusu

Donatılı malzeme matrisi donatı eksenini doğrultusuna paralel koordinatlarda tanımlanmak istendiğinde dönüşüm matrisi kullanılır.

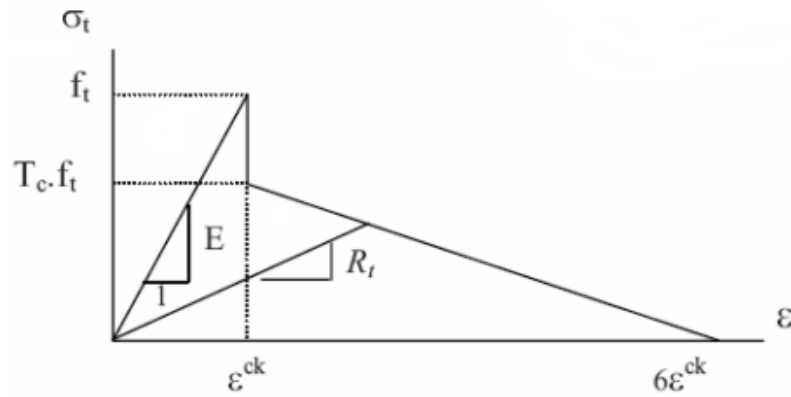
$$[D^R]_i = [T^r]^T [D^r]_i [T^r] \quad (2.70)$$

$[D^R]_i$, global koordinatlarda donatının davranışını ifade eder.

3) Çatlamaya her integrasyon noktasında üç eksen de izin verilir.

4) Eğer çatlak integrasyon noktasında meydana gelirse, çatlak malzeme özelliklerine bağlı bir ayarlama ile etkili ayrık çatlak olarak değil yayılı çatlak olarak modellenir. Çatlak, integrasyon noktasında meydana geldiğinde, yüzeyin zayıf yönünde betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisine göre çatlak yüzeyinin normali doğrultusunda ortaya çıkar.

Betonun çekme altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve çatlama durumunda zorlanması Şekil 2.15’de gösterilmiştir. Şekilde f_t tek eksenli çekme kuvveti ve E betonun elastisite modülüdür. Çatlamadan sonra, f_t beton çekme gerilmesi, $T_c \cdot f_t$ değerine düşer (genellikle $T_c = 0.6$ kabul edilir). R_t olarak gösterilen ise, sekant eğimidir. Nihai yük değerine yaklaşıldıkça R_t değeri de sıfıra yaklaşacaktır. Beton çekme dayanımındaki bu azalma, elaman fonksiyonunda dikkate alındığında çok daha iyi bir yakınsama sağlamaktadır.



Şekil 2.15. Betonun çekme davranışı

Ayrıca, kesme iletim katsayısı β_t çatlak yüzeyi boyunca gelen kesme yüklerinin iletilmesinde kesme yüklerini azaltma faktörü olarak tanımlanır. Bir doğrultuda çatlak oluşan malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki hali alır:

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} \frac{R_t(1+\nu)}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-\nu)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Burada üst simge ck çatlama yüzeyine dik olan x^{ck} ile esas gerilme doğrultusuna paralel koordinat sisteminde gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ifade eder. Denklem 2.71'e göre, çatlığa dik yönde malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin R_t ile ve kayma teriminin f_t ile tanımlandığı görülür. f_t terimi agrega yüzeyi veya donatı yüzeyindeki sürtünme gerilmelerinin aktarıldığı kesme terimidir. Eğer çatlak kapalı ise, çekme yüzeyine dik basınç gerilmeleri çatlak yüzeyince taşınır ve kapalı çatlak için sadece kesme iletim katsayısı f_c tanımlanır. Daha sonra kapalı bir çatlak ile beton için uygun gerilme-şekil değiştirme ilişkileri aşağıdaki formu alır.

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

İki yönde çatlak bulunan betonun gerilme – şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Eğer her iki yönde kapalı çatlak var ise;

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Çatlağın her üç yönde oluştuğu betonarme elemanda gerilme – şekil değiştirme ilişkisi;

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_t}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.75)$$

Eleman koordinatlarına dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi olur;

$$[D_c]_i = [T^{ck}]^T [D_c^{ck}]_i [T^{ck}] \quad (2.76)$$

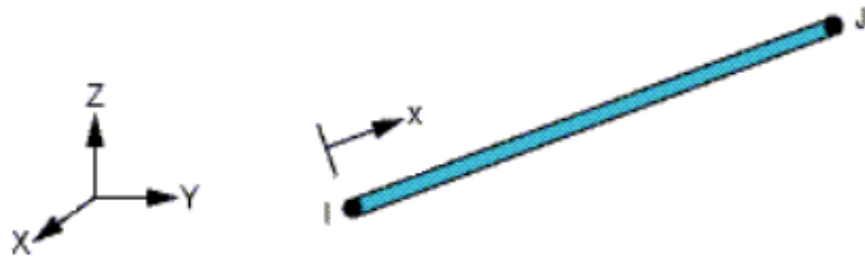
Burada $[T^{ck}]$ ile gösterilen değer, ana yön vektörlerinin terimlerini ifade eder.

5) Çatlama ve kırılmaya ek olarak, genelde Drucker-Prager kırılma yüzeyleri olarak kullanılan plastik çekme yapabilir. Bu durumda, plastisite çatlama ve kırılmadan önce oluşmaktadır.

2.3.2. LİNK8 (çubuk) elemanı

LİNK8 eleman mühendislik uygulamalarında kullanılan çubuk elemandır. Bu eleman kablolar, bağlantılar, kafes elemanı vb. olarak kullanılabilir. 3-D çubuk eleman tek eksenli çekme ve basınç yükü taşıyan, her düğüm noktasında x, y ve z eksenlerinde üç serbestlik derecesine sahiptir. Pim eklemeli yapısı olduğu için eğilme davranışı göstermez. Plastisite, sünme, gerilme sertleşmesi, büyük eğilme kapasitesi yeteneklerine sahiptir.

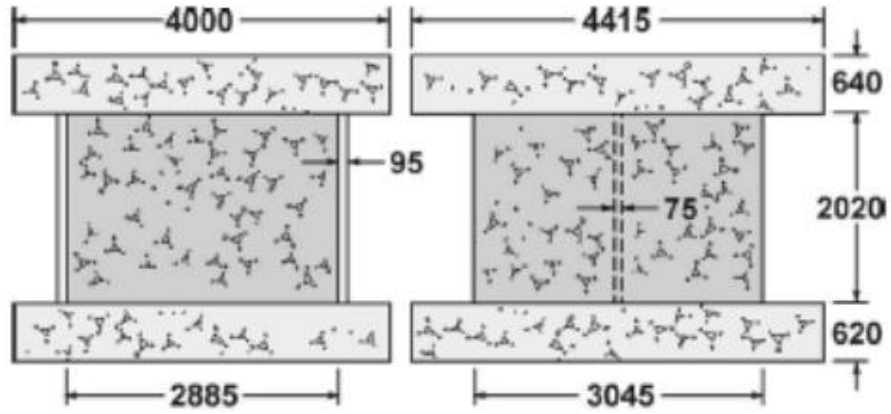
LİNK8'in geometrisi, düğüm noktaları ve koordinat sistemi, Şekil 2.16'de verilmiştir. Eleman iki düğüm noktası, kesit alanı, başlangıç birim şekil değiştirme ve malzeme özellikleri ile tanımlanır. Eleman x eksenine, I düğüm noktasından J düğüm noktasına eleman uzunluğu doğrultusunda tanımlanan eksendir. Başlangıç birim şekil değiştirme değeri eleman uzunluğundaki değişimin (Δ) elemanın ilk boyuna (L) oranı olarak tanımlanır.



Şekil 2.16. Link8 (çubuk) eleman geometrisi

2.4. Farklı Modelleme Kriterleri Kullanılarak H Şekilli Betonarme Perde Duvarların Performansının İncelenmesi

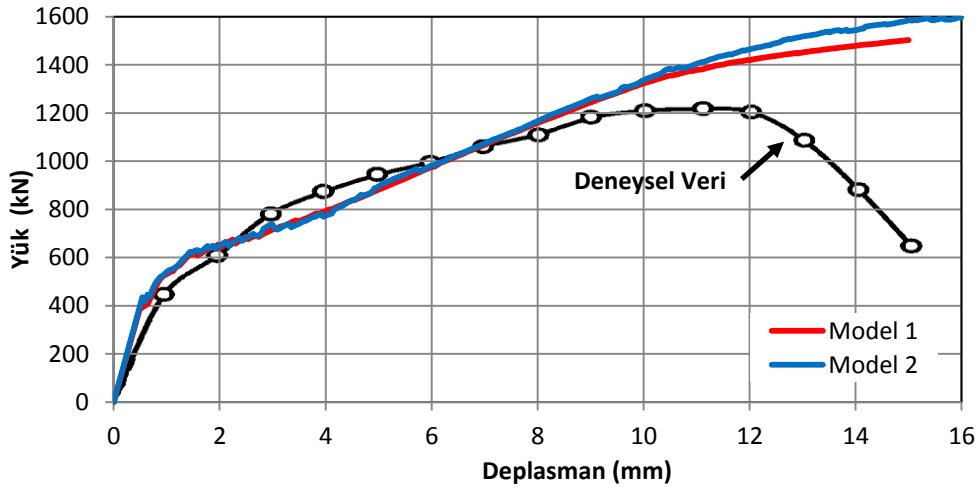
Palermo and Vecchio (2002) tarafından yapılan çalışmada kullanılan H şekilli betonarme perde duvar modeli, beton ve çelik donatı özellikleri ile beraber temel alınarak ANSYS sonlu eleman programında bir takım modellemeler yapılmış ve çeşitli faktörlerin etkileri araştırılmıştır. Şekil 2.17’de modellemede kullanılan H şekilli betonarme perde duvarın boyutları gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Modellemede temel alınan ölçüler

2.4.1. Alt ve üst levhaların rijitliklerinin performansa etkisi

Şekil 2.17’de görüldüğü gibi H şekilli betonarme perde duvara uygulanacak yüklerin, perdenin tüm kısımlarına (flaş-gövde) eşit bir şekilde dağıtılması için perdenin üst ve alt bölgesinde rijit betonarme levhalar yapılmıştır. Model 1 ve Model 2’de bu levhalarda kullanılan çelik donatı ve beton özelliklerinin performansa etkisi incelenmiştir. Bunun için Model 2’deki üst ve alt levhaların, Model 1’e göre çok daha rijit olması sağlanmış, diğer parametreler sabit tutulmuştur. Yapılan analiz sonrası elde edilen yük-deplasman ilişkisi Şekil 2.18’de gösterilmiştir.

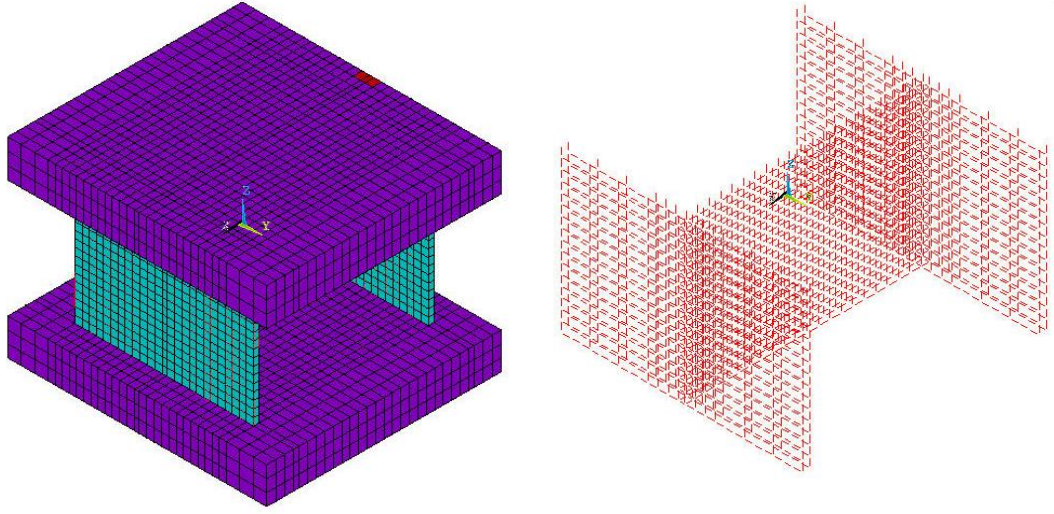


Şekil 2.18. Alt ve üst levha rijitliklerine bağlı yük-deplasman ilişkisi

Şekil 2.18'de elde edilen sonuca göre, H şekilli betonarme perde duvarın üst ve alt kısımlarındaki betonarme levhaların, perdenin yük taşıma kapasitesine etkisinin olmadığı söylenebilir. Çünkü alt ve üst levhalar sadece uygulanan yüklerin perdenin gövde ve flanş kısımlarına eşit bir şekilde aktarılabilmesi için yapılmaktadır. Yük uygulanırken üst levhada çatlak oluşması halinde perdenin gövde ve flanş kısımlarına yükün eşit ve dengeli bir şekilde iletilmesi mümkün olmayacaktır.

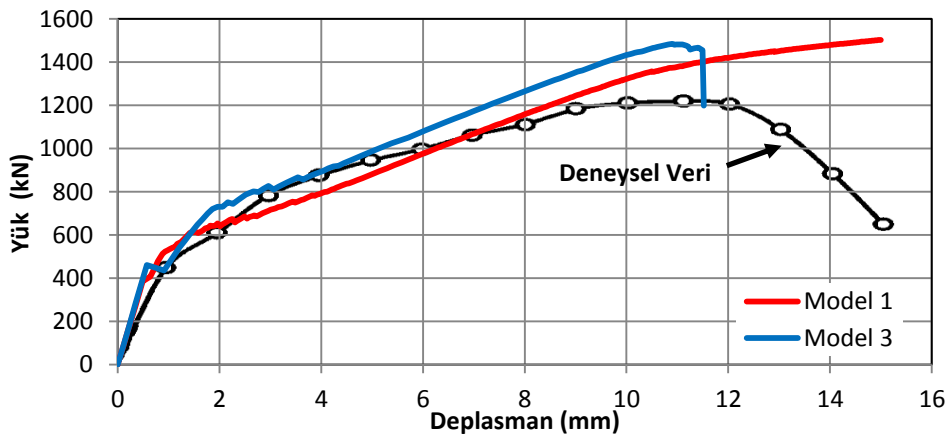
2.4.2. Üst levhanın ağırlığının hesaba katılmasının performansa etkisi

Model 3'de H şekilli betonarme duvar ayırık modelleme tekniği ile yapılmıştır. Bu modelleme tekniğinde donatılar LINK8 elemanı kullanılarak tek tek yapılarak modele yerleştirilmektedir ve bu açıdan zaman alıcı ve daha çok emek isteyen bir modelleme tekniğidir. Artan eleman sayısı da çözümü zorlaştırmaktadır. Model 3'de alt ve üst betonarme levhalar da yayılmış modelleme tekniği ile yapılmıştır. Bu modelleme tekniğinde ise yerleştirilecek donatıların hacimsel oranı hesaplanarak programa girilmektedir. Ayrıca yayılmış modelleme tekniğinde düğüm noktası sayısı azaldığından çözümün daha kısa sürede elde edilmesi söz konusudur. Şekil 2.19'da ayırık modelleme tekniği ile yapılmış modelin gövde ve flanş kısımlarına yerleştirilmiş çelik donatılar ve sonlu eleman ağı görülmektedir.



Şekil 2.19. Sonlu eleman modeli ve donatıların gösterimi

Model 3’de üst levhanın ağırlığından doğacak düşey yük hesaba katılarak, aksenal yükün performansa etkisi araştırılmıştır. Bu şekilde yapılan analiz sonuçları, Model 1’de elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Düşey yükün artırılması, H şekilli betonarme perdenin yük taşıma performansını artırması beklenmektedir. Model 3’e ait yük-deplasman ilişkisi Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



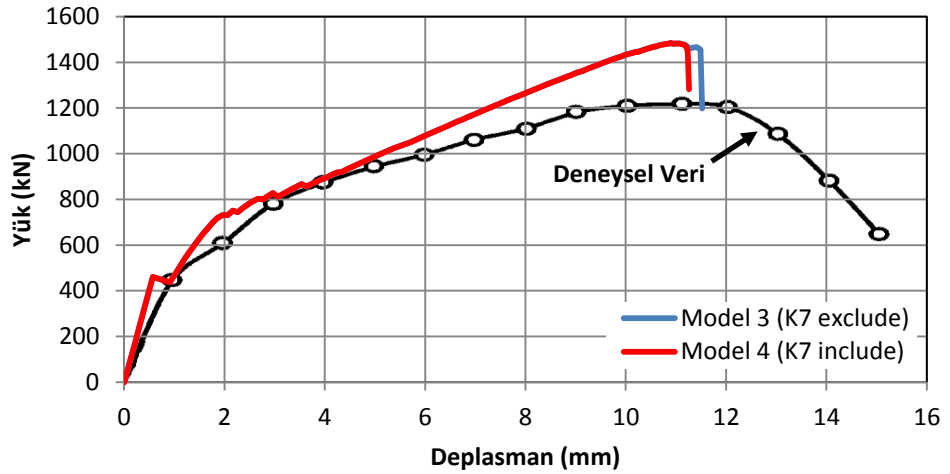
Şekil 2.20. Aksenal yükün artırılması sonucu oluşan yük-deplasman ilişkisi

Şekil 2.20’de görüldüğü gibi, üst levhanın ağırlığının hesaba katılması durumunda aksenal yükün artması, perde üzerinde oluşan çekme çatlaklarının büyümesini

engelleyeceğinden kuvvet-deplasman grafiğinde H şekilli betonarme perdenin yük taşıma performansını yükseltmiştir. Model 3’de eğrinin 11 mm deplasmandan sonra düşmesini sağlayan etken ANSYS’e girilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisidir. Eğri Geliştirilmiş Hognestand Modeli’ne göre çok doğru hale getirilmiştir.

2.4.3. K7 faktörünün etkisi

Model 4’de, ANSYS’de K7 (Stress Relax After Cracking) faktörünün etkisi araştırılmıştır. Bunun için K7 faktörü kapatılarak (exclude) analiz gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Model 3 ile karşılaştırılmış ve Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

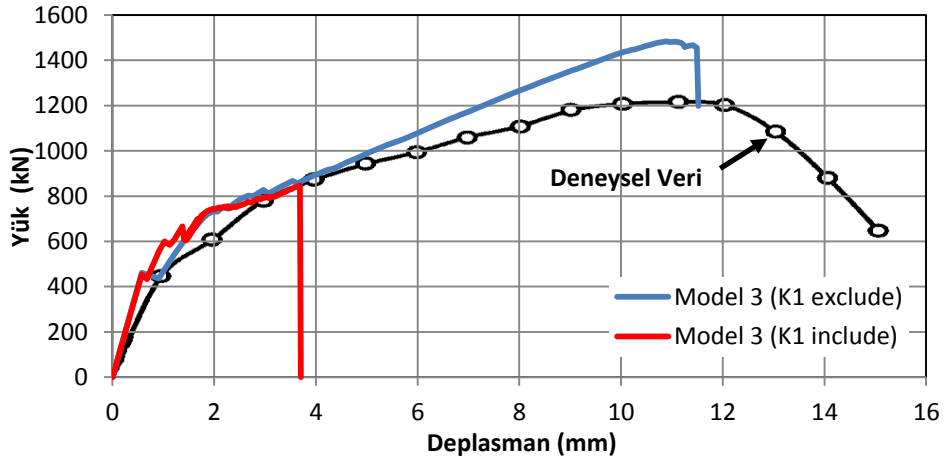


Şekil 2.21. K7 (Stress Relax After Cracking) faktörünün etkisi

Şekil 2.21’e göre, tek başına K7 faktörünün değiştirilmesi sonucunda H şekilli betonarme perde duvarın yük taşıma performansında herhangi bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

2.4.4. K1 faktörünün etkisi

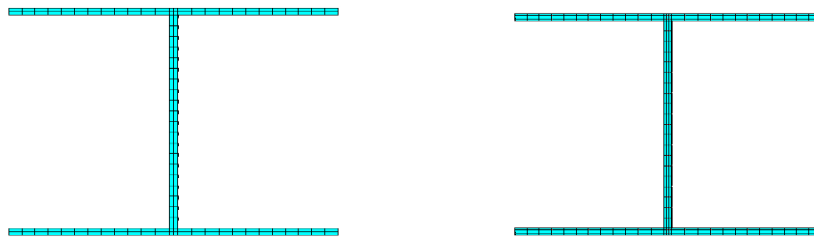
Şekil 2.22’de ise, K1 (Extra displacement shapes) faktörünün etkisini belirlemek için Model 3 üzerinde K1 faktörü kapalı (exclude) ve açık (include) olarak analiz yapılmıştır.



Şekil 2.22. K1 (Extra displacement shapes) faktörünün etkisi

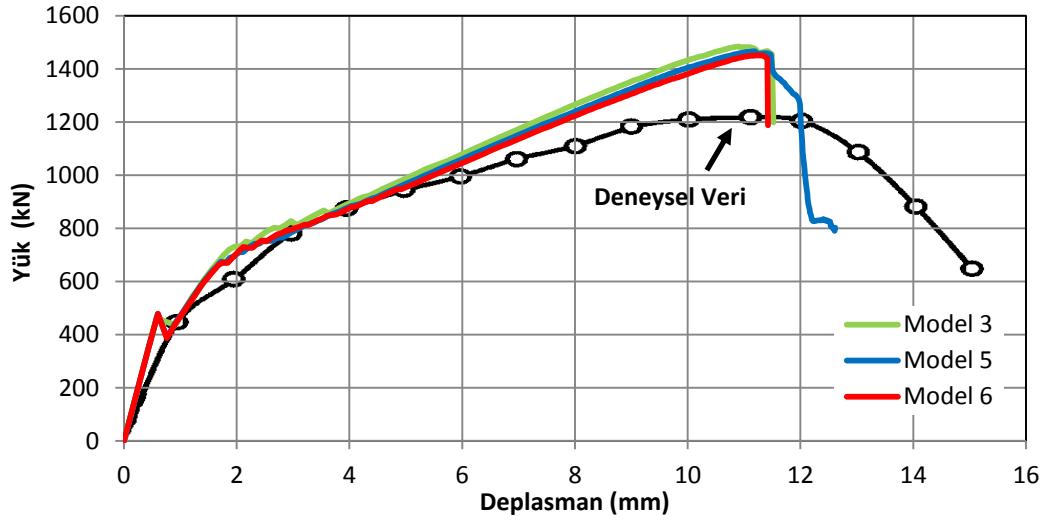
2.4.5. Modelin sonlu eleman ağı farklılıklarının performansa etkisi

Model 5’de, H şekilli betonarme perdenin gövde ve flanş kısımları iki sonlu elemana bölünerek, sonlu eleman ağındaki değişimin performansa etkisi araştırılmıştır. Model 6’da ise, perdenin gövde ve flanş bölgesi, hem üç sonlu elemana bölünmüş, hem de donatılar pas payı kadar iç kısımdan yerleştirilmiştir. Her iki modele ait sonlu eleman görüntüsü Şekil 2.23’de gösterilmiştir.



Şekil 2.23. İki ve üç sonlu elemana bölünen betonarme perde duvar

Şekil 2.24'de gösterilen Model 3, Model 5 ve Model 6 analizlerine ait yük-deplasman eğrilerine bakıldığında, ANSYS ile sonlu eleman modellenmesinde, gövde ve flanşın sonlu eleman ağında yapılan değişikliklerin veya donatıların paspayı kadar içerden yerleştirilmesinin, perdenin yük taşıma performansında belirgin bir etki yapmadığı belirlenmiştir.

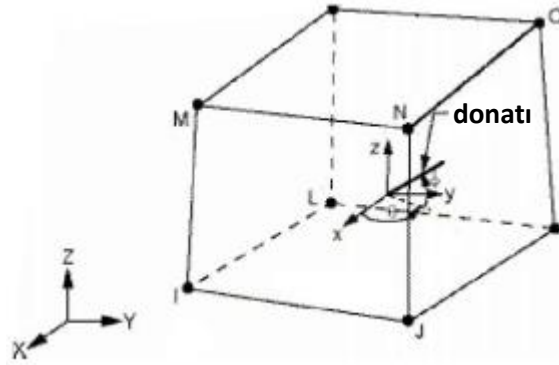


Şekil 2.24. Sonlu eleman ağı yoğunluğuna bağlı yük-deplasman ilişkisi

2.4.6. Ayırık ve yayılmış modelleme tekniğinin performansa etkisi

Model 7, yayılmış modelleme tekniğine göre oluşturulmuştur. Yayılmış modelleme tekniğinde donatıların oluşturulmasında kullanılan LİNK180 elemanının kullanılmasına gerek kalmamıştır. Böylece hem eleman sayısı azalmış hem de çözüm daha kısa sürede elde edilebilmiştir.

Model 7'de kullanılan donatılara göre belirlenen hacimsel oranlar ve donatıların konumları Çizelge 2.3'de verilmiştir. Çizelgedeki θ ve ϕ açıları Şekil 2.25'de gösterilen kurala göre belirlenmiştir.

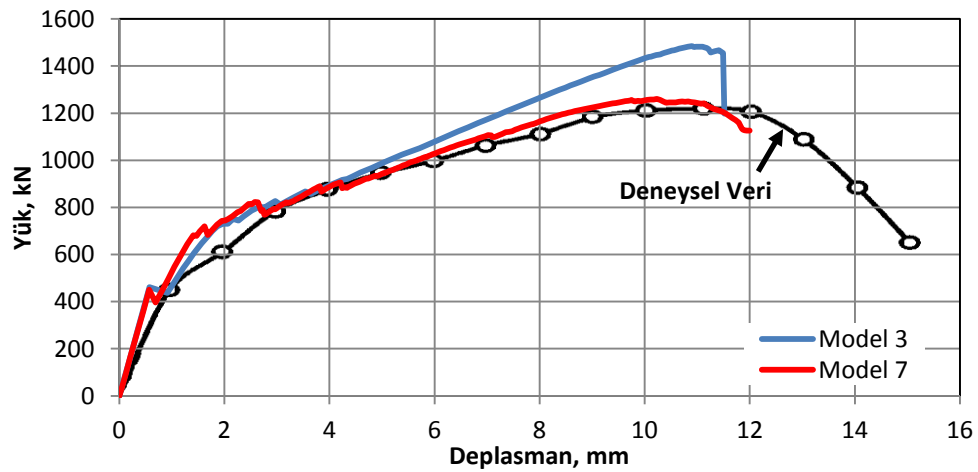


Şekil 2.25. θ ve ϕ 'nin belirlenmesi

Çizelge 2.3. Model 7 donatı konumları ve hacimsel oranlar

Reel Sabiti	Hacimsel Oran	Donatı 1	Donatı 2	Donatı 3	$\theta 1$	$\phi 1$	$\theta 2$	$\phi 2$	$\theta 3$	$\phi 3$
R1		0,008182	0,007621	0	0	90	90	0	0	0
R2		0,02	0,02	0,02	0	0	0	90	90	0
R3		0,007634	0,006016	0,0002	0	90	90	0	0	0
R4		0,002214	0,006016	0	0	90	90	0	0	0
R5		0,008182	0,006016	0,007621	0	90	90	0	0	0

Model 7'nin oluşturulmasındaki amaç; ayırık ve yayılmış modelleme arasındaki farkı belirlemektir. Bu amaçla yapılan analiz ile elde edilen sonuçlar, Model 3 ile karşılaştırılmış ve Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



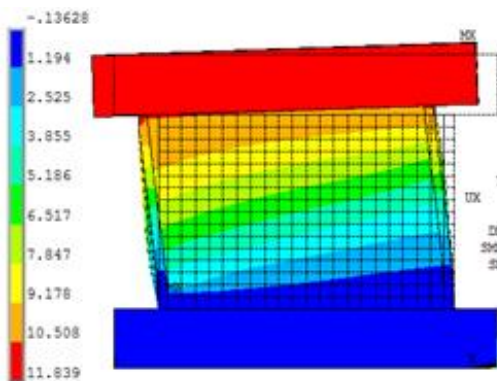
Şekil 2.26. Ayırık ve yayılmış modellemenin karşılaştırılması

Şekil 2.26’da görüldüğü gibi, aynı modelin ayırık ve yayılmış olarak modellenmesi halinde kapasitenin farklı değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Ayırık ve yayılmış modelleme tekniklerinin birbirine yakın sonuçlar vermesi beklenmektedir ancak burada oluşan farkın temel sebebinin, Model 7’nin flanş kısmındaki donatıların seyrek olması ve yayılmış modelleme tekniğine uygun olmayışı olarak tahmin edilmektedir.

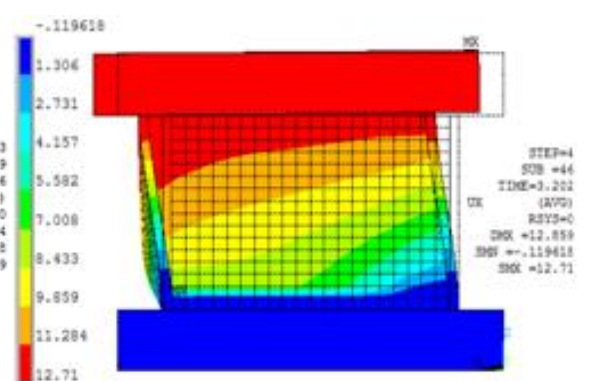
Bu analizde, yayılmış modellemenin ayırık modellemeye göre daha kolay yapıldığı ve eleman sayısının azalması nedeniyle çözümün daha kısa sürede elde edildiği görülmüştür. Ayrıca yayılmış modellemede sonlu eleman ağının istenildiği gibi yapılabilmesi de kullanıcılar için ayrı bir kolaylık sağlamaktadır. Öyleki, ayırık modellemede donatıların sonlu eleman parçaları ile çakışması gerekmekte aksi halde donatı ve betonun birlikte çalışması sağlanamamaktadır.

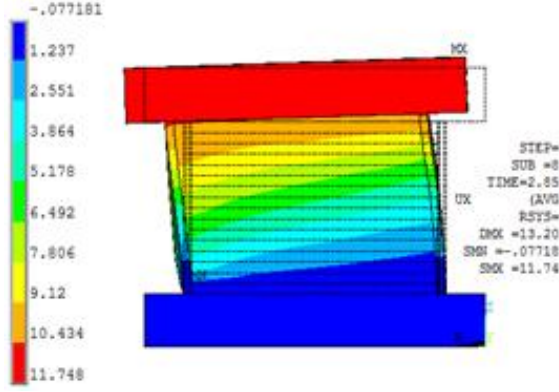
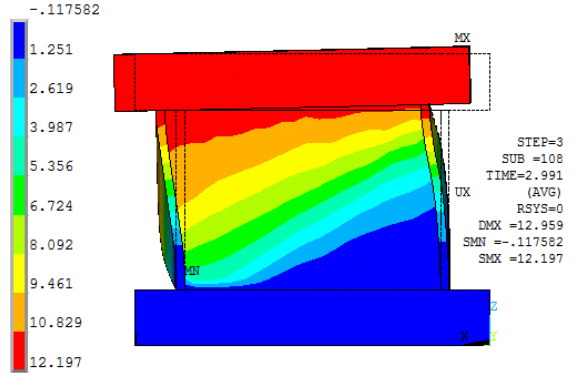
Yapılan tüm analizlerde, H şekilli betonarme perdeye x doğrultusunda 15 mm deplasman verilmiş ve maksimum yük kapasitesi tespit edilmiştir. Şekil 2.27’de x yönünde uygulanan kuvvetin etkisinde, betonarme perdenin yaptığı ötelenmeler her bir model için gösterilmiştir.

Model 3

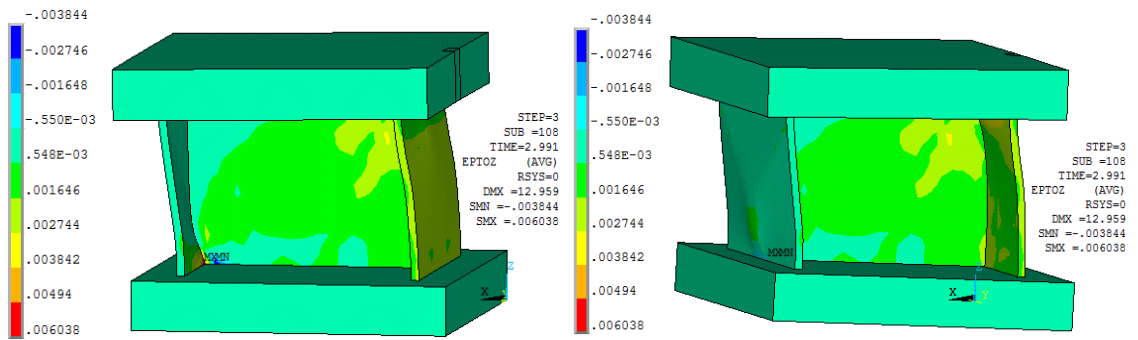


Model 5



Model 6**Model 7****Şekil 2.27.** Perdenin X yönünde yaptığı ötelenmeler

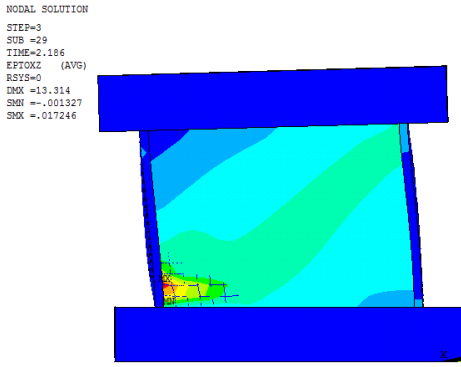
H kesitli betonarme perde, x doğrultusunda uygulanan kesme kuvveti etkisi altında Şekil 2.28'de verilen deformasyon halini almaktadır. Perde x yönünde zorlanırken flanş-gövde birleşim bölgesinde çekme etkileri oluşmakta, betonun birim şekil değiştirme değeri $\varepsilon_c = 0,0038$ değerini aşmakta ve beton ezilmektedir.

**Şekil 2.28.** Z yönündeki birim şekil değiştirme (Model 7)

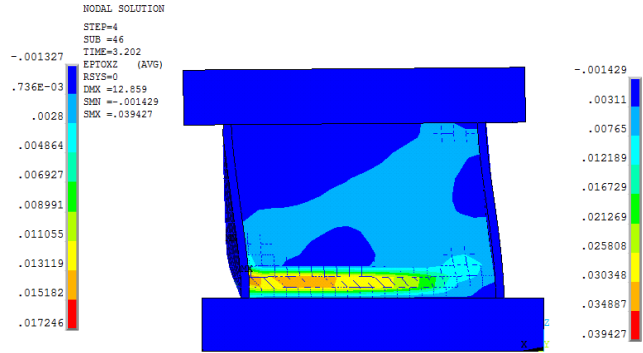
X doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir bölümü, perdenin o doğrultuda yer alan gövde kısmı tarafından karşılanmaktadır. Bu sebeple hasarın daha çok gövde

üzerinde oluşacağı söylenebilir. Şekil 2.29’da gövde üzerinde oluşan kayma şekil değiştirme deformasyonları gösterilmektedir.

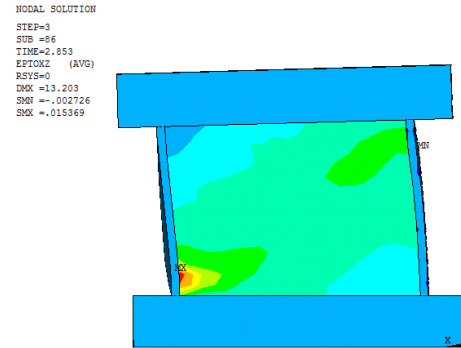
Model 3



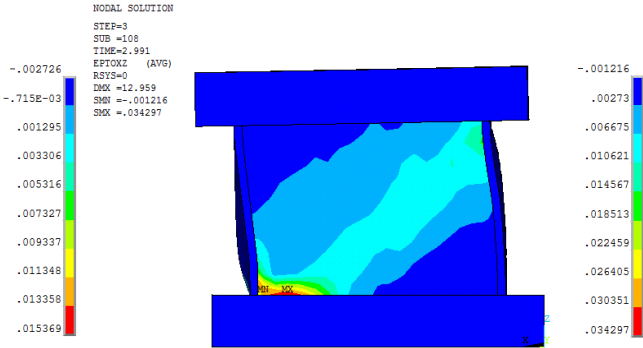
Model 5



Model 6



Model 7



Şekil 2.29. XZ düzlemindeki kayma şekil değiştirmeler

2.5. Kesme Kuvveti ve Burulma Etkisi Altında H Şekli Betonarme Perde Duvarların Performansının İncelenmesi

Maruta *et al.* (2000) yaptıkları çalışmada, aynı anda yatay yük ve burulmaya maruz kalan H şekilli betonarme perde duvarlarda deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlardır. Burulma dayanımının, bir tarafı açık olan OSCW perde duvarlarda, kapalı olanlara

CSCW göre daha az olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumda OSCW perdelerde elasto-plastik kapasitenin, CSCW perdelerine göre daha az olduğunu tahmin etmişlerdir.

Bir tarafı açık perde duvarların elasto-plastik davranışı üzerinde yapılan az sayıda çalışma mevcuttur. Maruta *et al.* (2000) yaptıkları bu çalışmada dokuz adet H şeklindeki perde duvarı, aynı anda yatay yük ve burulma altında test etmişler ve iki parametreyi incelemişlerdir. Yatay yük ve H şeklindeki duvarın yatay yük yönünde burulma oranı. Tüm örnekler, eğilmede çekme anında kayma yetmezliğini iyi bir şekilde göstermek için tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri test sonuçlarını doğrulamak ve denenmemiş durumların verilerini elde etmek için yapılmıştır.

2.5.1. Örnekler ve test yöntemi

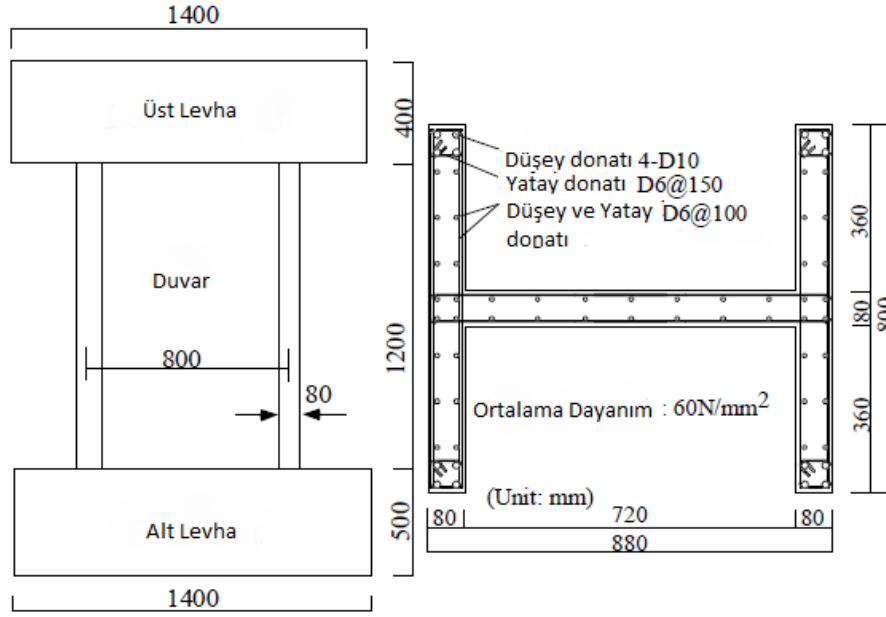
Çizelge 2.4’de verilen dokuz adet 1/12 ölçekli numuneler test edilmiştir. Tüm örnekler aynı H şekilli, aynı boyutlu ve aynı donatılandırmaya sahiptir. Şekil 2.30’da, test numunelerinin ayrıntıları gösterilmektedir. Numunelerin flanş kısımlarının uç bölgesinde de kolon tipi donatılar mevcuttur.

Çizelge 2.4. Test örnekleri listesi

Seri Numarası	Tür	Yüklemeye Yönü	Yüklemeye Oranı(%) M:T ^{*1}
1	HS25	Güçlü	75:25
	HS50		50:50
	HS75		25:75
2	HW00	Zayıf	100:0
	HW25		75:25
	HW50		50:50
	HW75		25:75
3	HD25	Çapraz	75:25
4	H100	Saf Burulma	0:100

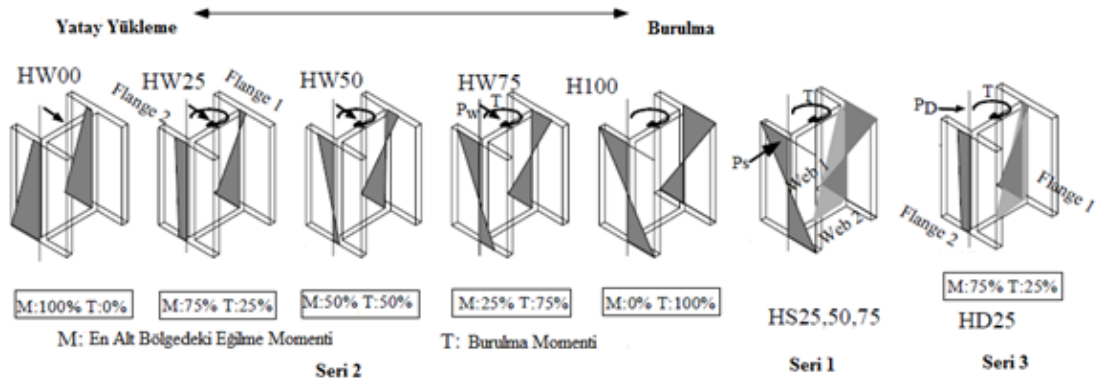
*M: En alt bölgedeki eğilme momenti T: Burulma momenti *1: Burulma oranı

Duvarın en alt bölümünde eğilme momentinin burulma momentine oranları %0, %25, %50, %75 ve %100 olarak değişmiştir. Bu oranlar burulma oranı olarak adlandırılır. Burulma oranları bu testin ana parametreleridir.



Şekil 2.30. Test numunelerinin boyutları ve donatı yerleşimi

Deneysel parametreler duvarın en alt bölümünde, yatay yükleme yönünde eğilme momentinin burulma momentine oranıdır. Şekil 2.31'de görüldüğü gibi, yükleme yönü Seri 1 için güçlü, Seri 2 için zayıf ve Seri 3 için çapraz eksende yapılmıştır.



Şekil 2.31. Test numunelerinin varsayılan moment dağılımları

Maruta *et al.* (2000) yaptıkları bu çalışmada kullandıkları beton malzemenin özellikleri Çizelge 2.5’de, çelik malzeme özellikleri ise Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. H şekilli betonarme perdeler için beton malzeme özellikleri

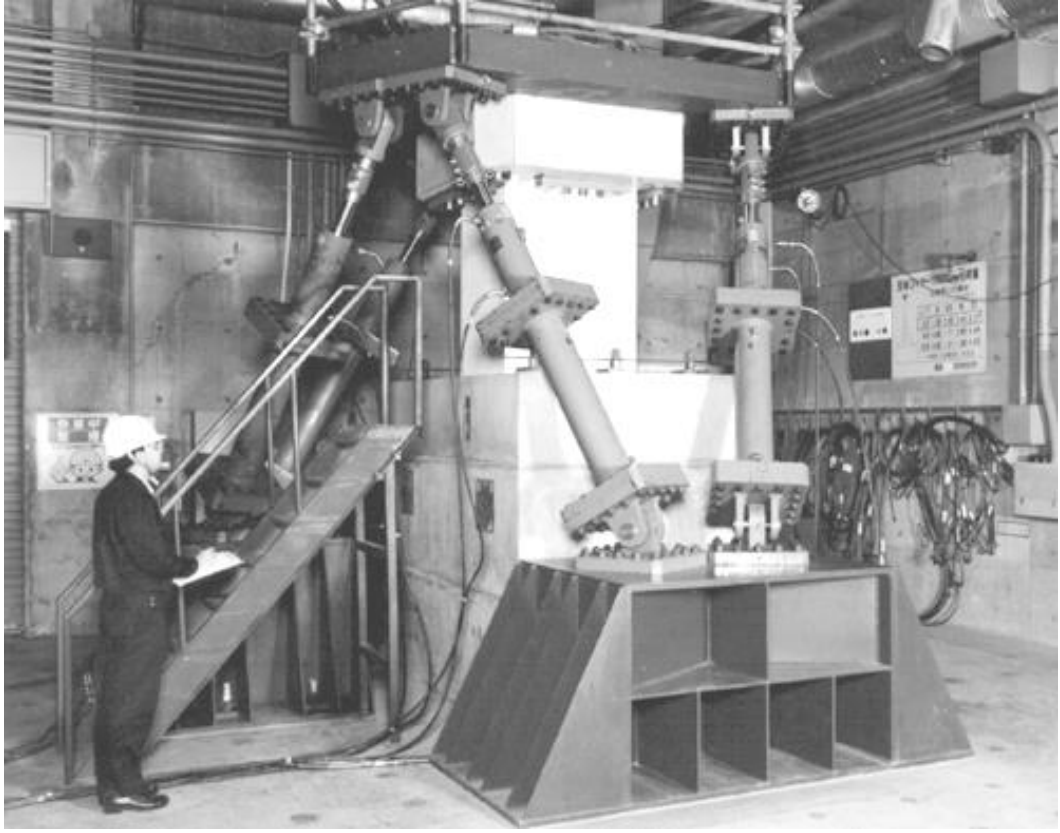
Tür	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (*10 ⁴ N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
HW00	56,1	3,58	2,79
HW25	57,9	3,46	3,74
HW50	57,8	2,89	3,12
HW75	64,1	3,25	2,94
HS25	57,6	3,02	3,05
HS50	59,3	2,98	3,29
HS75	60,4	2,83	3,48
HD25	62,5	3,13	3,47
H100	66,4	3,10	4,00

Betonda kullanılan agreganın maksimum tane çapı 10 mm olup, ortalama basınç mukavemeti ise 60 N/mm² dir.

Çizelge 2.6. Modele ait çelik donatı malzeme özellikleri

Tür	Çap(mm)	f_{sy} , MPa	f_{su} , MPa
D6	7	365	419
D10	9,525	403	595

Maruta *et al.* (2000) yaptıkları bu çalışmada, H şekilli betonarme çekirdek duvarlara 118 kN düşey yük ve beraberinde Çizelge 2.7’de gösterilen yatay yük ve burulma momenti uygulamışlardır. Uygulanan yatay yük etkisinde eğilme momentleri oluşmuştur. Deneysel çalışma için hazırlanan düzenek Şekil 2.32’de gösterilmiştir. Düzenek H şekilli betonarme perde duvarda eğilme ve burulma etkisi oluşturacak şekilde etkilere maruz bırakılmıştır.

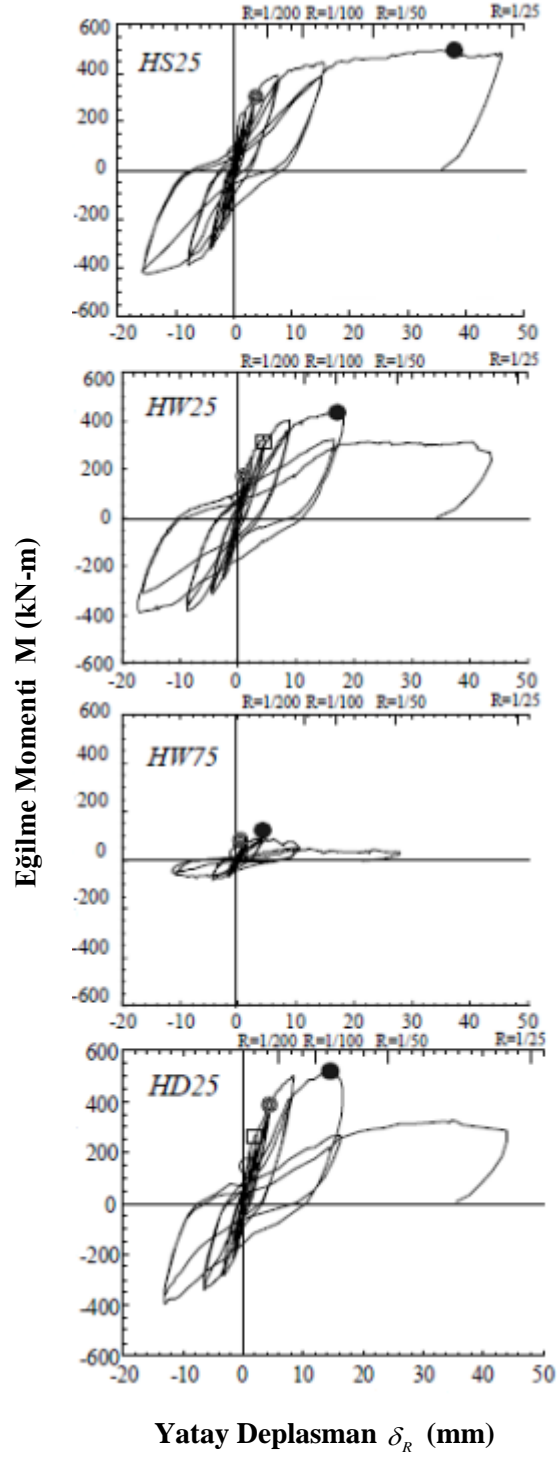


Şekil 2.32. Test düzeneği (Maruta *et al.* 2000)

Çizelge 2.7. Uygulanan maksimum eğilme ve burulma momenti değerleri

Tür	Uygulanan Maksimum Eğilme ve Burulma Momentleri (kN-m)	
	M(Eğilme Momenti)	T(Burulma Momenti)
HW00	459	-
HW25	426	137
HW50	214	205
HW75	87	251
HS25	468	153
HS50	235	228
HS75	93	283
HD25	529	171
H100	-	268

2.5.2. Test sonuçları



Şekil 2.33. Eğilme momenti-deplasman eğrileri

Maruta *et al.* (2000) yaptıkları çalışma sonucu elde ettikleri sonuçlar, Şekil 2.33'de verilmiştir. HS25, HW25, HW50, HW75 ve HD25 test numunelerine ait yük-eğilme eğrileri ($M - \delta_R$) gösterilmiştir.

Seri 1'de HS25 için $M - \delta_R$ eğrileri, kesme çatlaması sonrasında sıkışma davranışı göstermiştir. Seri 2'de flanşların zarar görmesi, HS25'e göre daha şiddetli olmuştur. HW75'de burulma etkisi HW25'e göre daha büyük olmuş, flanş kısmında büyük kesme çatlakları oluşmuştur. Seri 3'de HD25 için yük-eğilme eğrileri pozitif ve negatif yükler altında farklı davranış göstermiştir.

Maruta *et al.* (2000) yapmış oldukları yukarıda anlatılan çalışmada kullanılan H şekilli çekirdek perde duvarın beton ve malzeme özellikleri kullanılarak, Şekil 2.30'daki perde duvarla aynı boyutlara sahip perdelerin, ANSYS'de sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Modellerin sırasıyla nonlinear ve lineer analizleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar gerçek deneysel çalışmada elde edilen veriler ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2.5.3. ANSYS sonlu elemanlar metodu ve doğrusal olmayan analiz

Maruta *et al.* (2000) yapmış oldukları çalışmadan yola çıkılarak, H şekilli çekirdek perde duvarların farklı beton ve çelik malzeme özellikleri ile ANSYS'de SOLID65 elemanı kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılmış olan tüm analizlerde bir model temel alınmış ve diğer analizlerde de bu modelin sadece beton basınç dayanımı ve malzeme özellikleri değiştirilmiştir.

H şeklindeki çekirdek duvarların modellenmesinde yayılmış modelleme tekniği kullanılmıştır. Donatıların hacimsel oranları aşağıdaki gibi hesaplanarak Çizelge 2.8'de verilmiştir.

R1

$$\rho_{dik} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{4 * \pi * 4,7625^2}{80 * 80} = 0,0445 \quad (2.77)$$

$$\rho_{yatay} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{2 * 8 * \pi * 3,5^2}{80 * 1200} = 0,006414 \quad (2.78)$$

R2

$$\rho_{dik} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{14 * \pi * 3,5^2}{80 * 720} = 0,009354 \quad (2.79)$$

$$\rho_{yatay} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{8 * 2 * \pi * 3,5^2}{80 * 1200} = 0,006414 \quad (2.80)$$

R3

$$\rho_{dik} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{6 * \pi * 3,5^2}{80 * 280} = 0,01030 \quad (2.81)$$

$$\rho_{yatay} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{8 * 2 * \pi * 3,5^2}{80 * 1200} = 0,006414 \quad (2.82)$$

R4

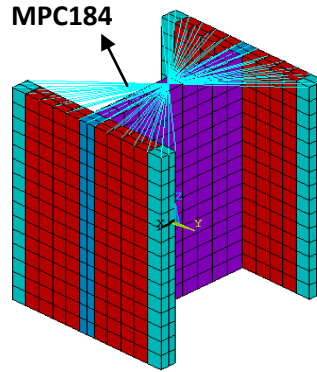
$$\rho_{dik} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{4 * \pi * 3,5^2}{80 * 80} = 0,0240 \quad (2.83)$$

$$\rho_{yatay} = \frac{A_s}{A_c} = \frac{8 * 2 * \pi * 3,5^2}{80 * 1200} = 0,006414 \quad (2.84)$$

Çizelge 2.8. Temel alınan modele ait donatı yerleşimi ve hacimsel oranlar

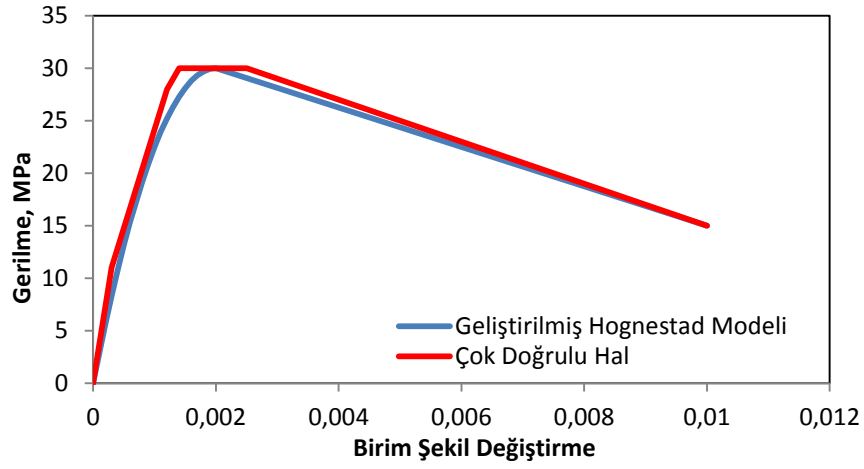
Reel Sabiti	Hacimsel Oran	Donatı 1	Donatı 2	Donatı 3	$\theta 1$	$\phi 1$	$\theta 2$	$\phi 2$	$\theta 3$	$\phi 3$	
R1		0,0445	0,006414	0,006414	0	90	90	0	0	0	90
R2		0,009354	0,006414	0	0	90	0	90	0	0	0
R3		0,0103	0,006414	0,0002	0	90	90	0	0	0	0
R4		0,024	0,006414	0,006414	0	90	90	0	0	0	90

Model sargılı ve sargısız beton olmak üzere kısımlara ayrılmıştır. Flanş uç kısımları ve gövde flanş birleşim bölgesi Şekil 2.30'da görüldüğü gibi sargılı olduğu için bu bölgelerde sargılı beton modeli kullanılmıştır. Perdenin sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiş şekli Şekil 2.34'de görülmektedir.



Şekil 2.34. Temel alınan perdenin sonlu eleman modeli

Modelde, sargısız betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Geliştirilmiş Hognestad Modeli kullanılarak oluşturulmuş ve daha sonra eğri çok doğrulu hale dönüştürülerek ANSYS sonlu eleman programında kullanılmıştır. Şekil 2.35'de sargısız betona ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gösterilmektedir. Farklı türdeki perdeler analiz edilirken basınç dayanımlarına göre her perde için ayrı ayrı gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi kullanılmıştır. Burada sadece temel alınan modele ait eğri gösterilmiştir.



Şekil 2.35. Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve çok doğrusu hal

Çizelge 2.9. Model perdeye ait beton malzeme özellikleri

Tür	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (*10 ⁴ N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
HW25	57,9	3,46	3,74
HW50	57,8	2,89	3,12
HW75	64,1	3,25	2,94
HS25	57,6	3,02	3,05
HS50	59,3	2,98	3,29
HS75	60,4	2,83	3,48
M1 Y	57,9	3,46	3,74
M1 X	57,9	3,46	3,74

Modellerde kullanılan beton malzemenin özellikleri Çizelge 2.9'da, çelik malzemenin özellikleri de Çizelge 2.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.10. Modele ait çelik donatı malzeme özellikleri

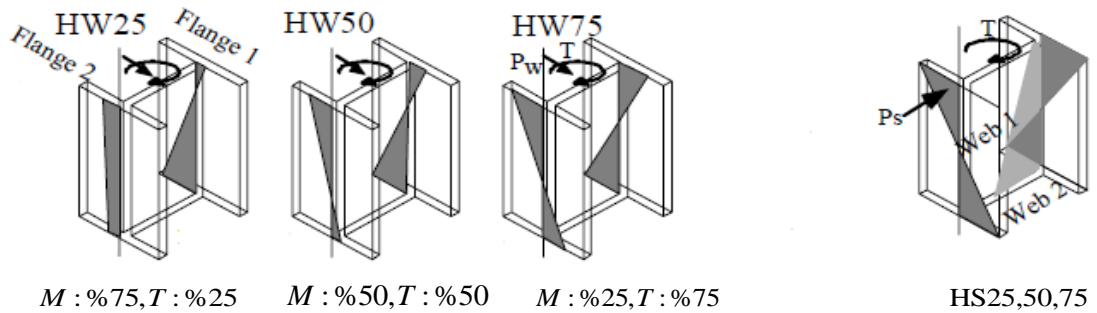
Tür	Çap(mm)	f_{sy} , MPa	f_{st} , MPa
D6	7	365	419
D10	9,525	403	595

Çizelge 2.9’da gösterilen HW25, 50, 75 perdeleri ile HS25, 50, 75 perdelerine, 118 kN düşey yük ile beraberinde yatay yük ve aynı zamanda burulma etkisi verilerek nonlineer ve lineer analizler yapılmıştır. Sadece M1 Y ve M1 X perdelerinde düşey yük ve yatay yük uygulanmış, burulma etkisi verilmemiştir. Yatay yükten dolayı oluşan eğilme momenti ile uygulanan burulma momentlerinin miktarı Çizelge 2.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.11. Perdelere uygulanan maksimum eğilme ve burulma momenti değerleri

Tür	Uygulanan Maksimum Eğilme ve Burulma Momentleri(kNm)	
	M(Eğilme Momenti)	T(Burulma Momenti)
HW25	426	137
HW50	214	205
HW75	87	251
HS25	468	153
HS50	235	228
HS75	93	283
M1 Y	510	-
M1 X	510	-

Şekil 2.36’da görüldüğü gibi, H şekilli betonarme perde duvarların en üst kısmında, geometrik merkezinden yatay yük ve burulma momentinin uygulanma şekli ile bunların birbirlerine göre yüzdeleri gösterilmiştir. Yatay yükler HW25,50,75 ve M1 Y perdelerinde y eksenine paralel, HS25,50,75 ve M1 X perdelerinde x eksenine paraleldir.

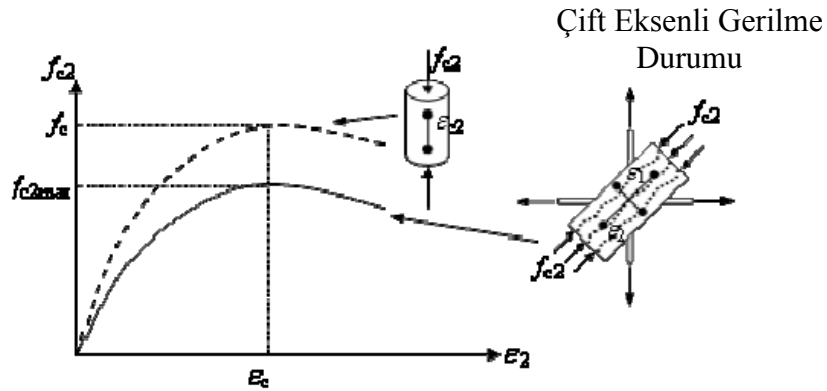


Şekil 2.36. Yüklerin uygulanma biçimleri

Eğilme kontrollü perdelerde sıkışma bölgesi, betonun tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile temsil edilebilir. Duvar sınır elemanı etrafında kuşatma etkisi nedeniyle bu bölgede betonun basınç dayanımı için bir iyileştirme hesabı dikkate alınabilir. Bu tür eğilme davranışları, betonun başlangıçtaki basınç altında dayanımında artış meydana gelmesine neden olur.

Öte yandan, eksenel basınç altında yüksek kesme yüklemesi durumunda çapraz gerilim çok erken aşamalarda başlar ve kısa perdelerde basınç etkisinde gövde kısımlarında gelişir. Gövde kısmında betondaki gerilmeler yükselir.

Şekil 2.37’de görüldüğü gibi, perdenin gövde kısmında çift eksenli gerilme sıkışma durumu meydana gelir. Betonun basınç dayanımının, aynı zamanda asal çekme gerilmesinin bir fonksiyonu olduğu belirlenmiştir. Daha net bir şekilde, normal yönde yüksek çekme gerilmelerine sahip betonun basınç dayanımı, kırılmış betonda daha düşük, yumuşak ve daha zayıftır.



Şekil 2.37. Çatlamış beton için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi

Vecchio and Collins (1986) bu konuda, çekme ve basıncın bir fonksiyonu olarak yumuşatıcı bir faktör sunmuştur. Bu faktör;

$$\beta = \frac{f_{c2max}}{f_c} = \frac{1}{0.8 + 170 \cdot \varepsilon_1} \leq 1.0 \quad (2.85)$$

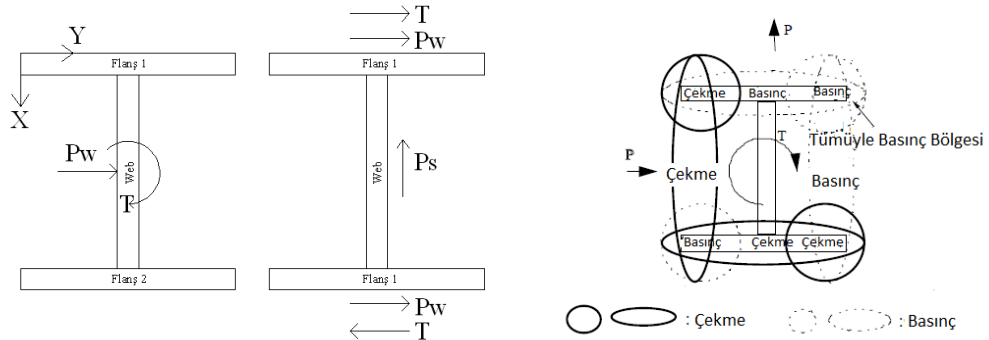
Bu formülde ε_1 , betonun maksimum gerilmesine karşılık gelen birim şekil değişimi, f_{c2max} , yumuşatılmış pik basınç dayanımıdır. Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$f_{c2} = f_{c2max} \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \right)^2 \right] \quad (2.86)$$

Bu çalışmada, yukarıdaki çatlama betonun açıklanan durumu düşünülerek basınç dayanımı, belirlenen β değeri ile çarpılarak azaltılmış ve modellemede azaltılmış basınç mukavemeti kullanılmıştır.

H şekilli betonarme perde duvarların düşey yük, yatay yük ve aynı zamanda burulma momenti etkisi altında nasıl davranış gösterdiği ve perdenin flanş ve gövde kısımlarının, uygulanan yükün ne kadarını aldıkları araştırılmıştır. Çalışmada ANSYS ile yapılan lineer ve nonlineer analizler gerçek deneysel veriler ile karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır.

H şekilli betonarme perde duvarlara etkiyen yatay yük ve burulma altında perde üzerinde oluşması beklenen etkiler Şekil 2.38’de gösterilmiştir.

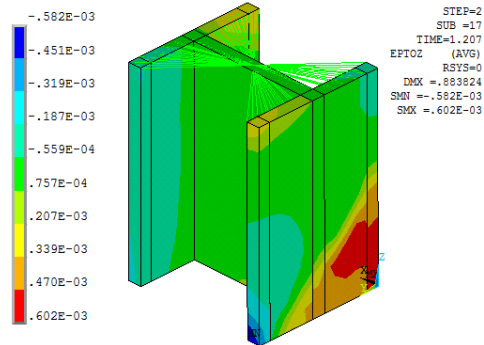


Şekil 2.38. Yatay yük ve burulma etkisinde H şekilli perdede oluşacak etki

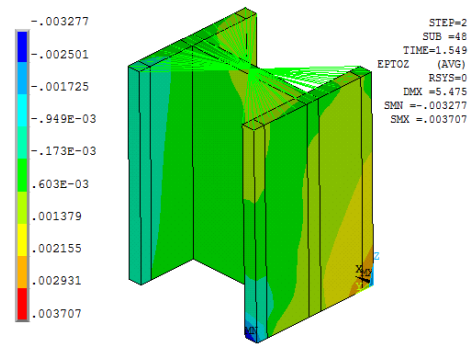
Şekil 2.38’de görüldüğü üzere y yönünde uygulanan yatay yük altında Flanş 1 ve Flanş 2’de aynı yönde kuvvetler oluşurken burulma etkisinden dolayı Flanş 1’de ve Flanş 2’de farklı yönlerde kuvvetler meydana gelmektedir. X yönünde uygulanan yatay yükün perdenin gövde kısmında etki yapacağı belirlenmiştir. Hem eğilme hem de burulma momentinden dolayı Flanş 1’in uç kısmında tümüyle basınç bölgesi meydana gelmiştir. Yapılan analizler ile elde edilen sonuçlar benzer durumların olduğunu kanıtlamıştır. Her bir perde için betonun çatlaması, donatıların akması ve betonun ezilme alanlarına karşılık gelen deformasyon şekilleri gösterilmiştir

(HW25)

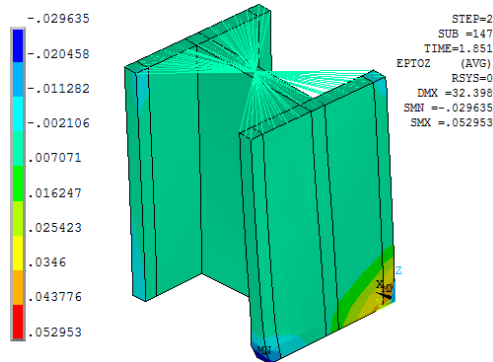
Çatlama



Akma

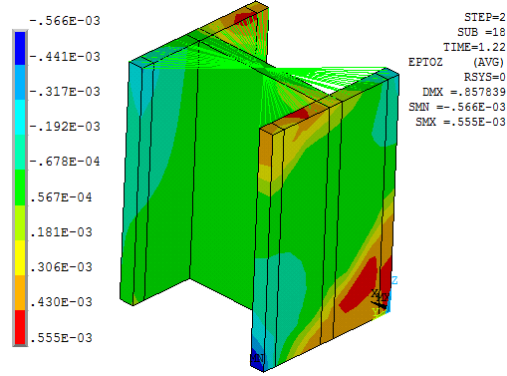
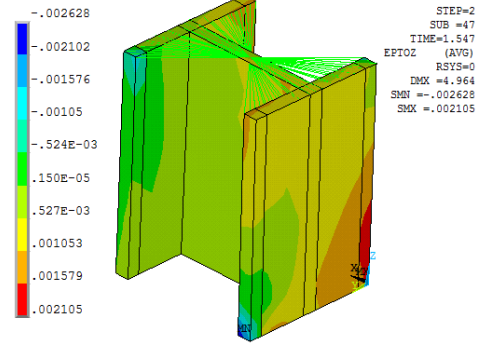
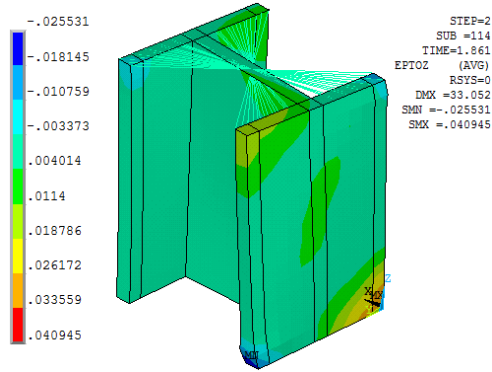


Ezilme



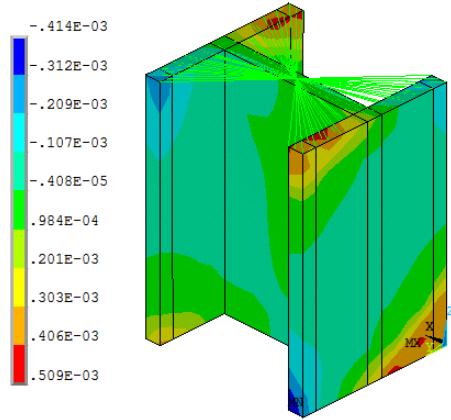
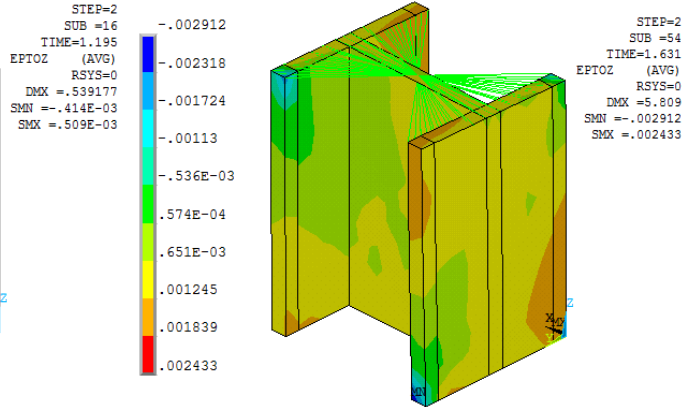
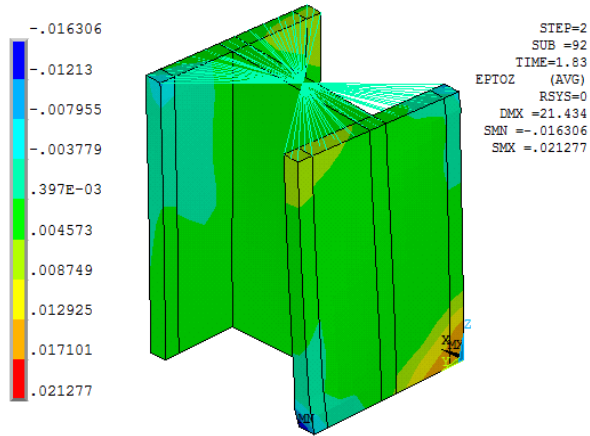
Şekil 2.39. HW25 perdesi Z yönündeki birim şekil değiştirme

(HW50)

Çatlama**Akma****Ezilme****Şekil 2.40.** HW50 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme

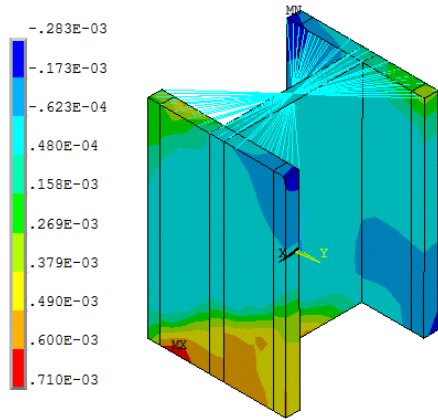
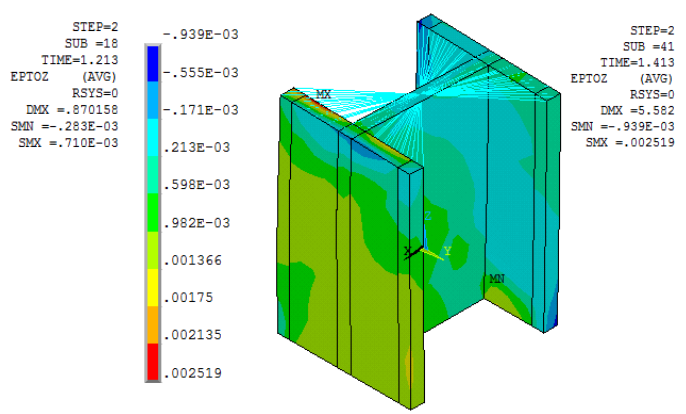
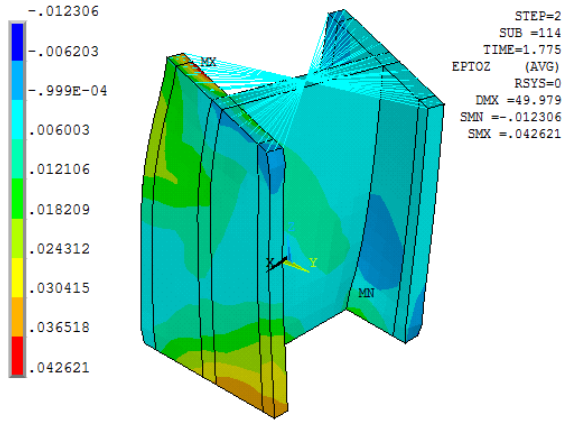
Y yönünde uygulanan yatay yükten dolayı H şekilli betonarme perde duvar üzerinde en çok zorlanması beklenen kısımlar perdenin flanşlarıdır. Şekil 2.39, 2.40 ve 2.41'de görüldüğü üzere HW25,50 ve 75 betonarme perde duvarlarda, y yönünde uygulanan yatay kuvvetin etkisinde Flanş 1'in alt uç kısmında, çekme ve basınç etkileri oluşmakta, burulma etkisinden dolayı Flanş 1 uç kısmında ezilme meydana gelmektedir. Modellerde burulma momentinin eğilme momentine göre giderek artırılması Flanş 1 üzerindeki kuvvetin etkisini azaltarak Flanş 2 nin de yük almasına neden olmuştur.

(HW75)

Çatlama**Akma****Ezilme**

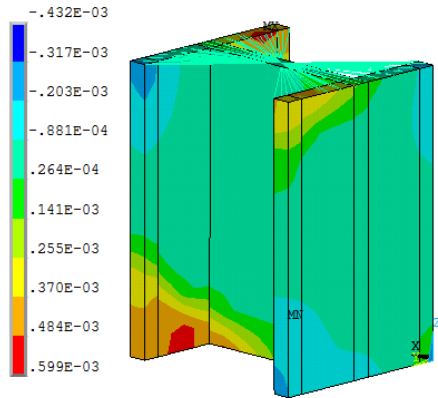
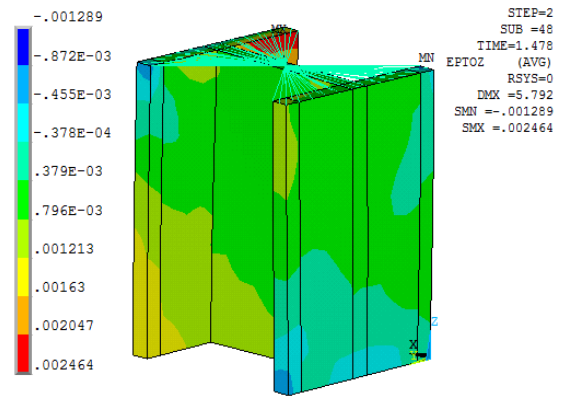
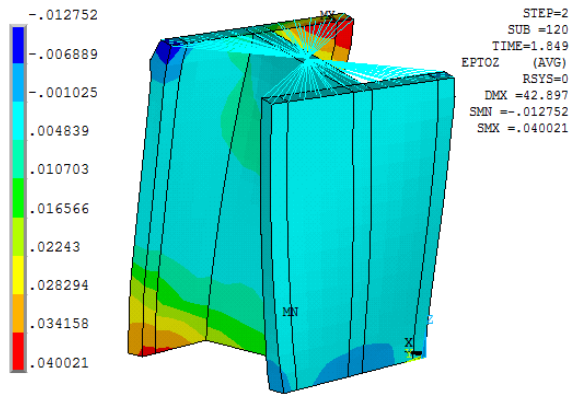
Şekil 2.41. HW75 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme

(HS25)

Çatlama**Akma****Ezilme****Şekil 2.42.** HS25 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme

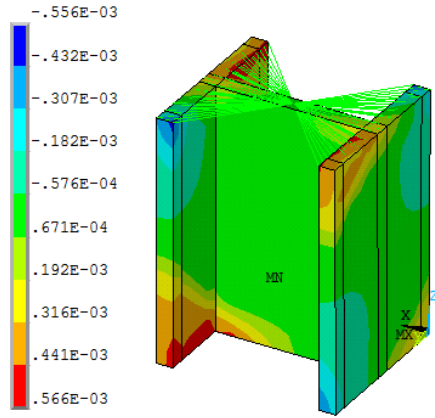
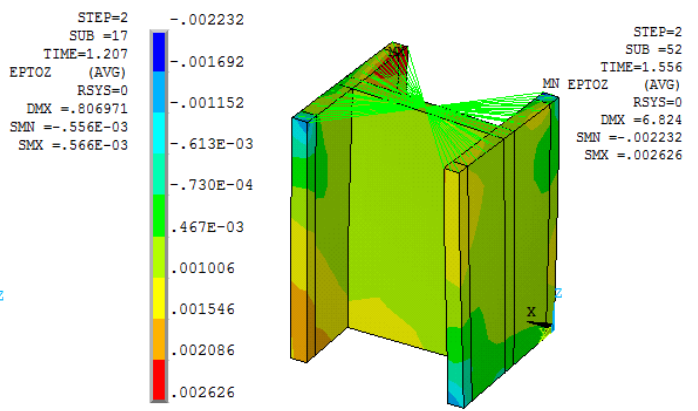
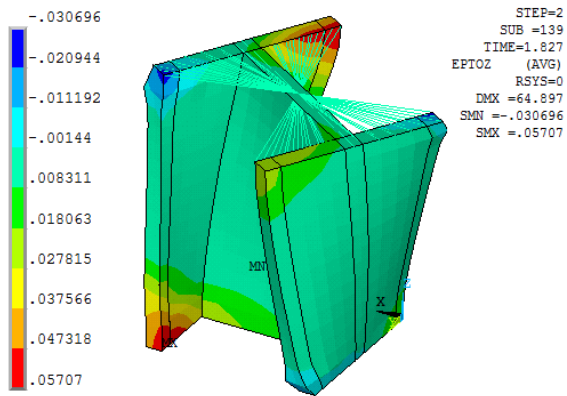
X yönünde uygulanan yatay yükten dolayı H şekilli betonarme perde duvarlarda Flanş 2 ve gövde bölgelerinin en çok zorlanması beklenmektedir. Uygulanan kesme yükünün büyük bir bölümünü perdenin gövde kısmının aldığı ve Flanş 2'de çekme gerilmelerinin etkisiyle ilk çatlakların oluştuğu belirlenmiştir.

(HS50)

Çatlama**Akma****Ezilme**

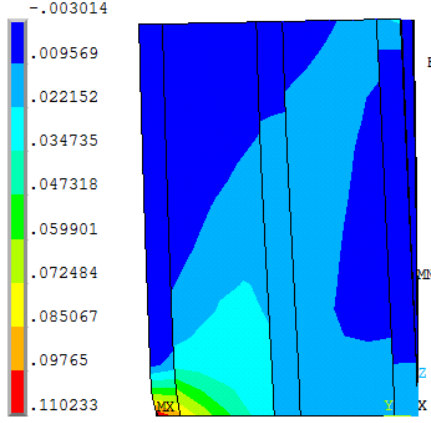
Şekil 2.43. HS50 perdesi Z yönünde birim şekil değıştirme

(HS75)

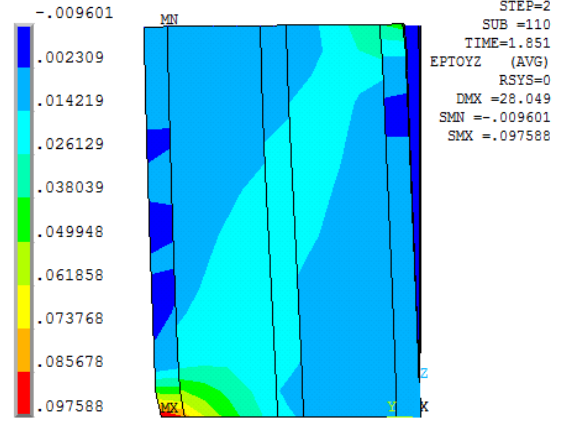
Çatlama**Akma****Ezilme****Şekil 2.44.** HS75 perdesi Z yönünde birim şekil değiştirme

Şekil 2.42, 2.43 ve 2.44'de görüldüğü gibi burulma etkisi ile Flaş 2'nin uç bölgesinde hem çekme hem de basınç etkileri oluşmakta, birim şekil değiştirmenin giderek artması sonucu flaş uç bölgesindeki beton ezilmektedir.

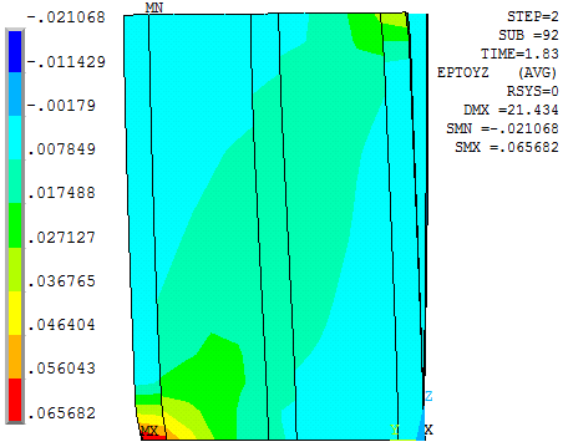
(HW25)



(HW50)

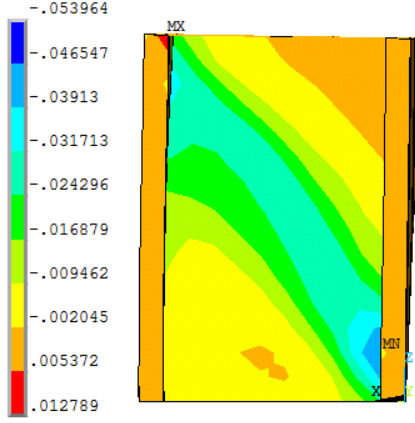


(HW75)

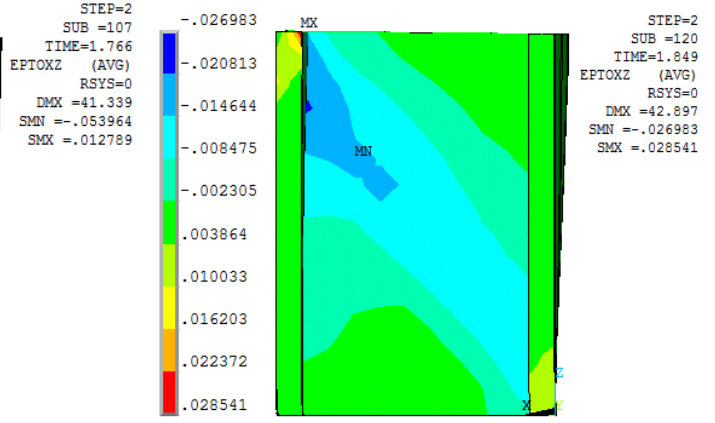
**Şekil 2.45.** HW25,50 ve 75 Perdeleri kayma birim şekil değiştirme

HW25,50 ve 75 perdelerinde y yönünde uygulanan yatay yük etkisi altında Flanş 1 ve Flanş 2'de kesme gerilmelerinden dolayı kayma şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Şekil 2.45'de görüldüğü gibi, uygulanan kesme yükünün özellikle Flanş 1 üzerinde kayma gerilmeleri oluşturduğu belirlenmiştir. HW75 perdesinde burulma etkisinin eğilme etkisinin üç katına çıkartılması sonucu Flanş 2'de de kayma şekil değiştirmeleri olduğu belirlenmiştir.

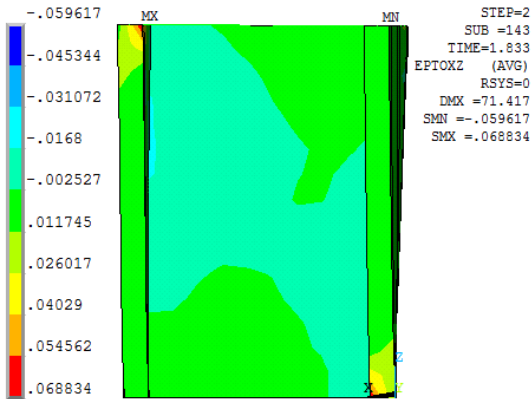
(HS25)



(HS50)



(HS75)

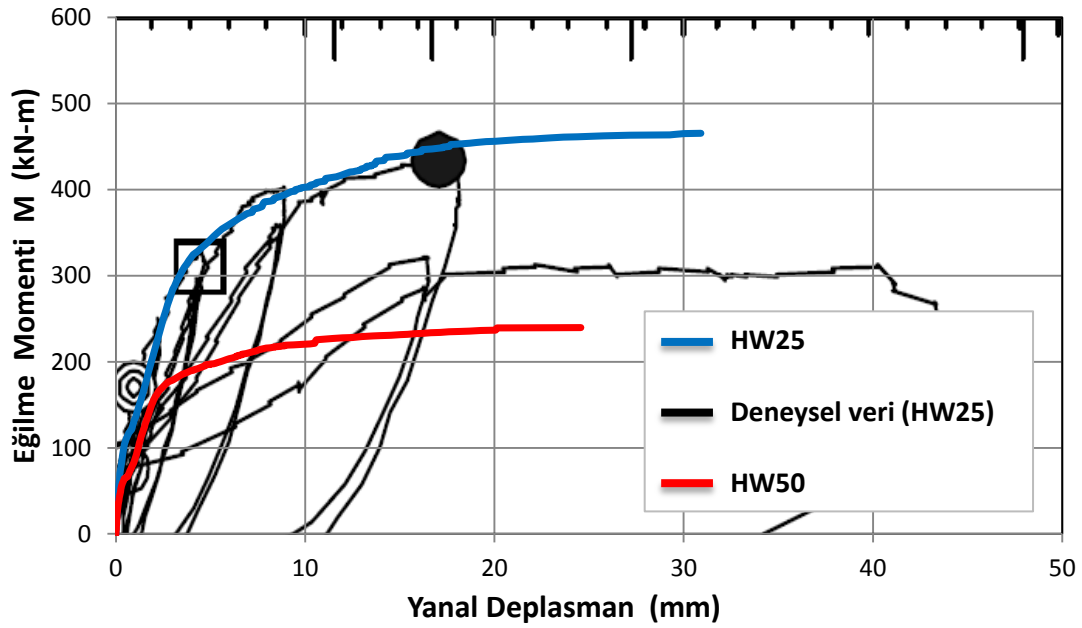


Şekil 2.46. HS25,50 ve 75 perdeleri kayma birim şekil değiştirme

HS25,50 ve 75 perdelerinde x yönünde uygulanan yatay yük etkisi altında gövde üzerindeki kesme gerilmelerinden dolayı kayma şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Şekil 2.46'da gösterildiği gibi perdeye etkiyen yatay yükün büyük bir kısmını gövde bölgesi aldığından burada kayma şekil değiştirmeleri belirlenmiştir. Kayma gerilmelerinden dolayı oluşan şekil değiştirmeler beklendiği gibi gövde üzerinde 45 derece açya yakın bir şekilde oluşmuştur.

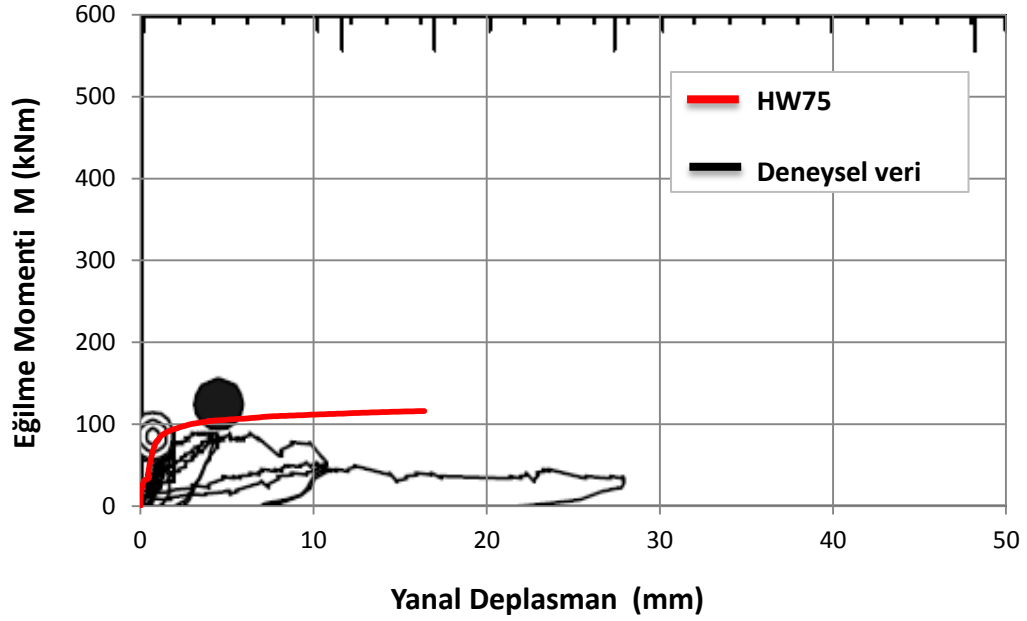
Yapılan analizlerde elde edilen sonuçlara göre çizilen eğilme momenti-yanal deplasman eğrileri ve bunların gerçek deneysel verileri karşılaştırılarak, sonuçlar yorumlanmıştır.

2.5.4. HW25,50 ve 75 perdelerinin eğilme momenti-yanal deplasman ilişkisi



Şekil 2.47. Eğilme momenti-yanal deplasman eğrileri (HW25 ve HW50)

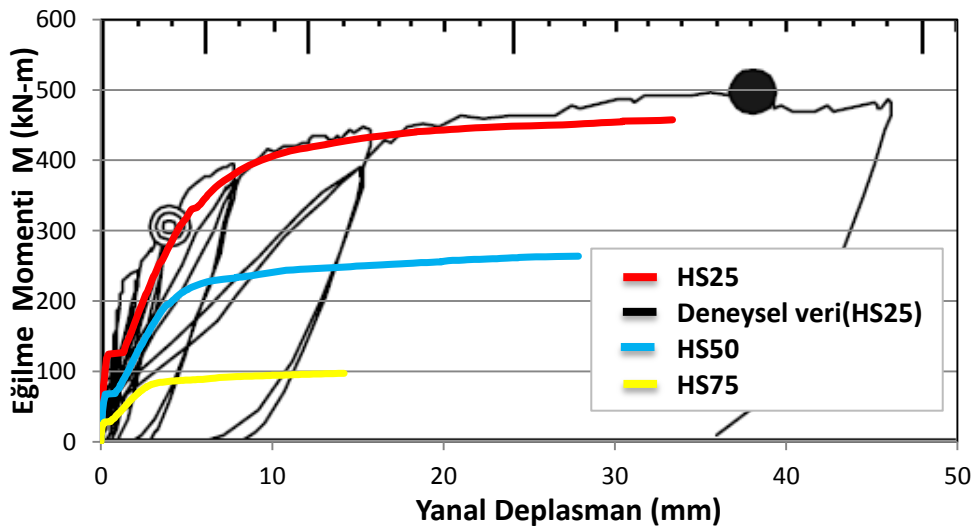
Şekil 2.47'de gösterilen eğriler incelendiğinde HW25 perdesinin ANSYS'de yapılan sonlu eleman modeli ve nonlinear analizi ile, gerçek deneysel verilerin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. HW25 perdesinin analiz sonucunda ulaştığı eğilme momenti kapasitesinin gerçek deneysel verilerden elde edilen kapasiteyi yakaladığı görülmektedir. HW50 perdesinde ise gerçek deneysel verilerin olmaması nedeniyle gerekli yorum yapılamamıştır.



Şekil 2.48. Eğilme momenti–yanal deplasman eğrisi (HW75)

Şekil 2.48’de gösterilen eğriler incelendiğinde, HW75 perdesinin ANSYS’de yapılan sonlu eleman modeli ve nonlinear analizi sonucunda ulaştığı eğilme momenti kapasitesinin gerçek deneysel verilere çok yakın olduğu belirlenmiştir.

2.5.5. HS25,50 ve 75 perdelerinin eğilme momenti-yanal deplasman ilişkisi

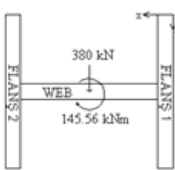
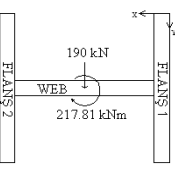
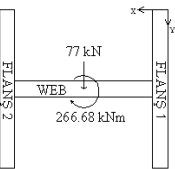
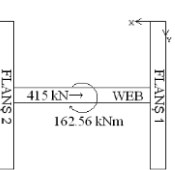


Şekil 2.49. Eğilme momenti–yanal deplasman eğrisi (HS25, HS50 ve HS75)

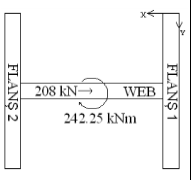
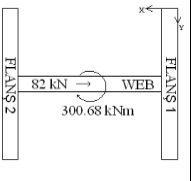
Şekil 2.49’da gösterilen eğriler incelendiğinde, HS25 perdesinin ANSYS’de yapılan sonlu eleman modeli ve nonlinear analizi ile gerçek deneysel verilerin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. HS25 perdesinin gerçek deneysel verilerden elde edilen kapasiteye yakın bir değer yakaladığı görülmektedir. HS50 ve HS75 perdelerine ait gerçek deneysel veriler bulunmadığından ilgili perdeler hakkında yorum yapılamamıştır. Ancak bu perdelerle ait sayısal veriler üzerinden gerekli açıklamalar yapılmıştır.

Çizelge 2.12’de, yatay yük, eksenel yük ve burulma etkisi altındaki perdelerin, Çizelge 2.13’de ise sadece eksenel yük ve yatay yük etkisi altındaki perdelerin taşıdığı toplam kesme kuvvetleri gösterilmiştir.

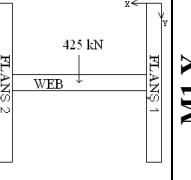
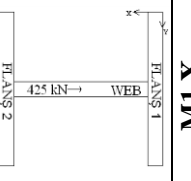
Çizelge 2.12. Perde üzerine etkiyen toplam kesme kuvvetleri (Nonlinear)

Nonlinear	ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
	0,0	-92,2	0,0	-243,5	118,0	0,0	-380,5	118,0
	0,0	-49,0	0,0	-122,0	118,0	0,0	-192,0	118,0
	0,0	-17,9	0,0	-48,5	118,0	-0,3	-78,4	125,2
	103,8	0,0	258,4	0,0	118,0	372,3	0,0	118,0

Çizelge 2.12 (devam)

Nonlinear	ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
 HS50	48,7	0,0	130,5	0,0	118,0	200,0	0,0	118,0
 HS75	18,7	0,0	41,6	0,0	118,0	80,5	0,0	118,0

Çizelge 2.13. Eğilme etkisinde perdelerin toplam kesme kuvvetleri (Nonlinear)


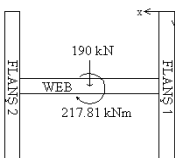
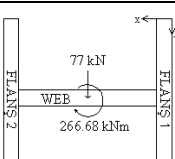
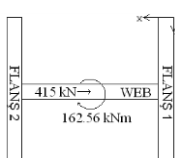
Nonlinear	ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
 M1 Y	0,0	-114,7	0,0	-314,9	118,0	0,0	-415,7	118,0
 M1 X	128,1	0,0	318,9	0,0	118,0	425,8	0,0	118,0

Çizelge 2.12 ve Çizelge 2.13’de görüldüğü gibi nonlinear analizlerde HW25, HW50 ve HW75 ile M1 Y perdelerinde, y yönünde uygulanan yatay yükten dolayı perdenin tamamına etkiyen $\sum F_y$ kuvveti, ile uygulanan F_y kuvveti birbirine eşittir. Aynı şekilde bu perdelerde x yönünde herhangi bir kuvvet uygulanmadığından dolayı

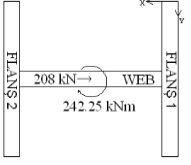
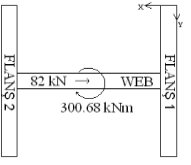
$\sum F_x = 0$ olarak hesaplanmıştır. Z yönünde 118 kN düşey yük uygulandığı için $\sum F_z = 118$ olarak bulunmuştur.

HS25, HS50 ve HS75 perdelerinde x yönünde uygulanan yatay yükten dolayı perdenin tamamına etkiyen $\sum F_x$ kuvveti ile uygulanan F_x kuvveti birbirine eşittir. Perdelere y yönünde bir kuvvet etki etmediği için $\sum F_y = 0$ dır.

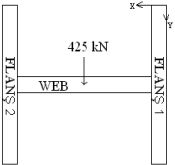
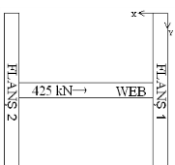
Çizelge 2.14. Perde üzerine etkiyen toplam kesme kuvvetleri (Linear)

Linear	ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
	0,0	-92,3	0,0	-243,2	118,0	0,0	-380,0	118,0
	0,0	-49,4	0,0	-122,0	118,0	0,0	-190,0	118,0
	0,0	-17,8	0,0	-48,5	118,0	0,0	-77,0	118,0
	103,7	0,0	258,1	0,0	118,0	415,0	0,0	118,0

Çizelge 2.14 (devam)

Lineer		ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
		$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
	HS50	48,7	0,0	130,4	0,0	118,0	208,0	0,0	118,0
	HS75	18,7	0,0	41,6	0,0	118,0	82,0	0,0	118,0

Çizelge 2.15. Eğilme etkisinde perdelerin toplam kesme kuvvetleri (Lineer)

Lineer		ÇATLAMA		AKMA			EZİLME		
		$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$	$\sum F_x$	$\sum F_y$	$\sum F_z$
	M1 Y	0,0	-134,5	0,0	-49,5	117,9	0,0	-425,0	117,9
	M1 X	150,5	0,0	375,0	0,0	118,0	425,0	0,0	118,0

Çizelge 2.14 ve Çizelge 2.15’de H şekilli betonarme perde duvarların lineer analizleri yapılmış ve sonuçlar nonlinear analizlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplara göre nonlinear ve lineer analizlerde, H şekilli betonarme perde duvarların tümüyle dengede olduğu belirlenmiştir. Bu durum yapılan çalışmanın doğruluğu açısından da önemli bir bilgidir.

2.5.6. Perdelerin flanş ve gövde kısımlarının taşıdıkları yükler

Çizelge 2.16’da H şekilli betonarme perde duvarın gövde ve flanş kısımlarının aldıkları kesme kuvvetleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi y yönünde uygulanan kuvveti, perdelerin flanşları almakta, gövde kısmı ise yükün çok küçük bir bölümünü karşılamaktadır. Eğilme momentinin burulma momentine oranı azaldıkça, Flanş 2’nin aldığı yükün arttığı belirlenmiştir. M1 Y perdesi incelendiğinde sadece düşey yük ve y yönünde yatay yük etkisi altında, perdede oluşan eğilme momentinin her iki flanşa eşit olarak dağıldığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 2.16. Perdelerin Y yönünde aldıkları yükün dağılımı (Nonlinear)

NONLİNEER	Flanş 1Y	Flanş 2Y	GövdeY	Tür
Çatlama	-86,68	-4,21	-1,31	HW25
Akma	-234,65	-10,37	1,47	
Ezilme	-351,94	-22,10	-6,43	
Çatlama	-89,44	41,74	-1,34	HW50
Akma	-227,44	104,53	0,87	
Ezilme	-345,05	164,14	-11,12	
Çatlama	-79,02	62,60	-1,44	HW75
Akma	-227,28	177,86	0,88	
Ezilme	-348,92	276,27	-5,80	
Çatlama	-57,13	-57,13	-0,43	M1 Y
Akma	-155,13	-155,13	-4,62	
Ezilme	-207,93	-207,93	0,14	

Çizelge 2.17. Perdelerin X yönünde aldıkları yükün dağılımı (Nonlinear)

NONLİNEER	Flanş 1X	Flanş 2X	GövdeX	Tür
Çatlama	20,47	6,06	77,31	HS25
Akma	102,82	0,72	154,83	
Ezilme	120,42	-1,46	253,34	
Çatlama	3,80	5,62	39,32	HS50
Akma	46,48	5,70	78,33	
Ezilme	65,52	10,14	124,33	
Çatlama	-1,13	3,39	16,45	HS75
Akma	16,13	7,45	18,00	
Ezilme	-24,79	17,53	87,80	
Çatlama	25,73	2,49	99,91	M1 X
Akma	127,79	-1,48	192,61	
Ezilme	153,38	-4,28	276,73	

Çizelge 2.17’de görüldüğü gibi, x yönünde uygulanan kesme kuvvetin büyük bir bölümünü perdelerin gövde kısmının aldığı, Flanş 2’nin en az yük alan bölge olduğu söylenebilir. M1 X perdesi incelendiğinde burulma etkisi olmadan, sadece düşey yük ve x yönünde yatay yük etkisi altındaki perdede, yükün gövde ve Flanş 1 tarafından alındığı belirlenmiştir.

Çizelge 2.18. Perdelerin Y yönünde aldıkları yükün dağılımı (Lineer)

LİNEER	Flanş 1Y	Flanş 2Y	GövdeY	Tür
Çatlama	-86,19	-2,38	-3,76	HW25
Akma	-227,01	-6,27	-9,90	
Ezilme	-354,70	-9,80	-15,47	
Çatlama	-88,11	40,57	-1,86	HW50
Akma	-217,55	100,17	-4,59	
Ezilme	-338,87	156,03	-7,15	
Çatlama	-82,15	64,84	-0,47	HW75
Akma	-224,06	176,84	-1,28	
Ezilme	-355,65	280,69	-2,04	
Çatlama	-54,76	-54,76	-5,17	M1 Y
Akma	-150,34	-150,34	-14,19	
Ezilme	-202,92	-202,92	-19,15	

Çizelge 2.19. Perdelerin X yönünde aldıkları yükün dağılımı (Lineer)

LİNEER	Flanş 1X	Flanş 2X	GövdeX	Tür
Çatlama	7,06	6,90	89,78	HS25
Akma	17,57	17,16	223,37	
Ezilme	28,25	27,59	359,12	
Çatlama	3,36	3,21	42,10	HS50
Akma	9,01	8,60	112,80	
Ezilme	14,37	13,71	179,90	
Çatlama	1,35	1,20	16,14	HS75
Akma	3,01	2,67	35,90	
Ezilme	5,93	5,27	70,80	
Çatlama	9,86	9,64	108,62	M1 X
Akma	24,55	23,98	270,37	
Ezilme	32,71	31,96	360,29	

Çizelge 2.18 ve Çizelge 2.19’da görüldüğü gibi, lineer analiz durumunda da nonlinear analizde olduğu gibi y yönünde uygulanan yatay yük etkisi altında yükün büyük bir bölümünü flanşların aldığı belirlenmiştir. Burulma momentinin değerinin artırılması halinde Flanş 2’nin de büyük boyutlarda yük almaya başladığı görülmektedir. X yönünde uygulanan yatay yük etkisi altında ise yükün büyük bir bölümünü yine nonlinear analizde olduğu gibi gövde kısmının aldığı belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ANSYS’de perde modellemesinde nonlinear ve lineer analizin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

2.5.7. Perdelerin çatlama akma ve ezilme anlarındaki moment değerleri

Çizelge 2.20, 2.21 ve 2.22’de H şekilli betonarme perde duvarların nonlinear analizi sonrasındaki çatlama, akma ve ezilme durumlarında x ve y yönlerinde Flanş 1, Flanş 2 ve Gövde kısımlarındaki momentler ile toplam momentleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.20. Çatlama anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear)

NONLİNEER	ÇATLAMA(kN-m)							
	Tür	Flanş1	Flanş2	Gövde	$\sum M_x$	Flanş1	Flanş2	Gövde
HW25	-70,3	-39,7	-0,4	-110,5	-32,2	31,6	0,6	0,0
HW50	-63,5	5,2	-0,5	-58,8	-31,0	28,1	2,9	0,0
HW75	-52,5	31,7	-0,3	-21,2	-28,0	24,5	3,4	0,0
HS25	-21,5	20,8	0,8	0,0	-90,8	-26,9	-7,0	-124,6
HS50	-39,6	39,4	0,2	0,0	-56,5	0,7	-5,2	-61,0
HS75	-51,2	51,4	-0,2	0,0	-42,7	20,7	-2,1	-24,1
M1 Y	-68,8	-68,8	-0,4	-138,0	-36,3	36,3	0,0	0,0
M1 X	0,0	0,0	0,0	0,0	-105,1	-42,8	-10,1	-158,1

Çizelge 2.21. Akma anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear)

NONLİNEER	AKMA(kN-m)							
Tür	Flanş1	Flanş2	Gövde	$\sum M_x$	Flanş1	Flanş2	Gövde	$\sum M_y$
HW25	-192,0	-99,6	-0,7	-292,3	-47,2	41,8	5,4	0,0
HW50	-167,0	20,7	-0,2	-146,5	-42,5	39,1	3,4	0,0
HW75	-149,5	90,6	0,1	-58,8	-44,6	43,3	1,3	0,0
HS25	-75,0	72,7	2,3	0,0	-204,8	-91,7	-13,5	-310,0
HS50	-111,8	110,0	1,7	0,0	-132,5	-24,4	-2,6	-159,5
HS75	-110,4	109,6	0,9	0,0	-69,2	18,6	0,0	-50,6
M1 Y	-188,4	-188,4	-1,2	-378,0	-47,9	47,9	0,0	0,0
M1 X	0,0	0,0	0,0	0,0	-229,6	-135,8	-21,0	-386,4

Çizelge 2.22. Ezilme anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Nonlinear)

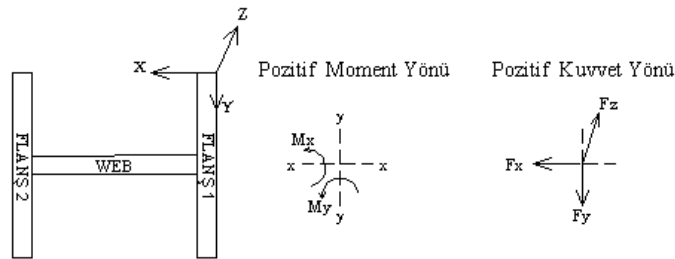
NONLİNEER	EZİLME(kN-m)							
Tür	Flanş1	Flanş2	Gövde	$\sum M_x$	Flanş1	Flanş2	Gövde	$\sum M_y$
HW25	-226,6	-225,4	-1,3	-453,2	-86,2	86,9	-0,7	0,0
HW50	-214,5	-13,8	-2,1	-230,4	-80,3	74,4	5,9	0,0
HW75	-211,9	120,5	-1,5	-92,9	-79,2	71,2	5,3	-2,8
HS25	-96,8	94,7	2,2	0,0	-273,2	-128,7	-44,9	-446,8
HS50	-164,0	162,1	1,9	0,0	-217,0	-29,1	-3,4	-249,5
HS75	-202,8	201,5	1,3	0,0	-133,3	37,0	-0,6	-96,9
M1 Y	-247,5	-247,5	-0,4	-495,4	-88,4	88,4	0,0	0,0
M1 X	0,0	0,0	0,0	0,0	-272,4	-200,5	-55,5	-528,4

Çizelge 2.23'de ise, H şekilli çekirdek betonarme perde duvarların lineer analizleri sonucu Flanş 1, Flanş 2 ve Gövde üzerinde x ve y yönündeki momentler ile toplam momentler gösterilmektedir.

Çizelge 2.23. Ezilme anında flanş ve gövdedeki moment değerleri (Linear)

LİNEER Tür	EZİLME(kNm)							
	Flanş 1	Flanş 2	Gövde	$\sum M_x$	Flanş 1	Flanş 2	Gövde	$\sum M_y$
HW25	-330,0	-120,7	-5,1	-455,8	-14,9	14,9	0,0	0,0
HW50	-263,6	37,2	-2,6	-229,0	-14,9	14,9	0,0	0,0
HW75	-237,8	145,7	-1,0	-93,1	-14,9	14,9	0,0	0,0
HS25	-116,9	116,9	0,0	0,0	-248,2	-218,4	-34,2	-500,8
HS50	-174,2	174,2	0,0	0,0	-132,0	-102,3	-17,2	-251,4
HS75	-216,3	216,3	0,0	0,0	-61,2	-31,5	-6,8	-99,5
M1 Y	-253,9	-253,9	-5,8	-513,6	-14,9	14,9	-1,0	-1,0
M1 X	0,0	0,0	0,0	0,0	-254,1	-224,4	-27,7	-506,2

Momentlerin ve kuvvetlerin yorumlanmasında Şekil 2.50’de belirtilen pozitif yönler kullanılmıştır. Perdelere etkiyen yatay yükün sistemin tamamında oluşturduğu moment değeri ile Flanş 1, Flanş 2 ve Gövde üzerinde, ayrı ayrı hesaplanan moment değerlerinin toplanması ile oluşan momentin eşit olması gerekmektedir. Nonlineer analizde Çizelge 2.22’de ezilme durumu için hesaplanan toplam moment değerleri ile uygulanan yatay yükten dolayı sistemin tamamında oluşan toplam moment değerleri birbirine oldukça yakındır. Çizelge 2.23’de ise lineer analizlerde elde edilen toplam moment değerleri ile perdenin tamamında oluşacak toplam moment değerleri birbirine çok yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.50. Kuvvet ve momentin pozitif yönlerinin gösterilmesi

Çizelge 3.1. Bina tasarımında kullanılacak veriler

Bina Önem Katsayısı, I		1,0
Etkin Yer İvme Katsayısı, A ₀		0,4
Doğal Titreşim Periyodu	hesaplanan T _{1x}	0,679468883
	hesaplanan T _{1y}	0,748476557
Spektrum Katsayısı, S(T)	T _A < T _{1x} < T _B	S(T _{1x}) = 2.5
	T _A < T _{1y} < T _B	S(T _{1y}) = 2.5
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R		6
Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı, R _a (T _A < T ₁)		R _a (T _{1x}) = R = 6 R _a (T _{1y}) = 6
Spektral İvme Katsayısı A(T) = A ₀ * I * S(T ₁)		A(T _{1x}) = 0.4 * 1 * 2.5 = 1
		A(T _{1y}) = 0.4 * 1 * 2.5 = 1

Çizelge 3.1’de belirtilen doğal titreşim periyotları T_{1x} ve T_{1y}, Denklem (3.1)’e göre hesaplanmıştır. Burada m_i; kat kütlesi (w_i/g), d_{fi}; deplasman, F_{fi}; i. kata etkiyen fiktif yükü göstermektedir.

$$T_1 = 2.\pi \left(\frac{\sum_{i=1}^N m_i . d_{fi}^2}{\sum_{i=1}^N F_{fi} . d_{fi}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

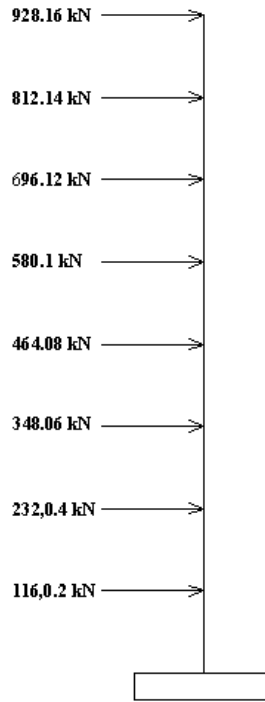
Göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkiyen *Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü* (taban kesme kuvveti) V_t, Denklem (3.2)’de gösterildiği şekilde hesaplanmış ve Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

$$V_t = \frac{W.A(T_1)}{R_a(T_1)} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.2. Toplam eşdeğer deprem yükü hesap verileri

Kat No	Kat Kütlesi	Deplasman X	Deplasman Y	Fiktif Yük
	m_i (t)	d_{fi} (mm)		F_{fi} (kN)
1	316,4	0,028	0,036	1
2	316,4	0,063	0,091	2
3	316,4	0,109	0,149	3
4	316,4	0,157	0,205	4
5	316,4	0,203	0,255	5
6	316,4	0,245	0,299	6
7	316,4	0,282	0,333	7
8	247,0	0,313	0,351	8
Toplam Ağırlık (kN)		$V_{t(x)}$ (kN)		$V_{t(y)}$ (kN)
25060,4		4176,73		4176,73

Hem x hem de y yönünde hesaplanan taban kesme kuvveti V_t , binanın her bir kat seviyesine Şekil 3.2’de gösterildiği gibi dengeli bir şekilde dağıtılarak eşdeğer deprem yükü analizi gerçekleştirilmiştir.

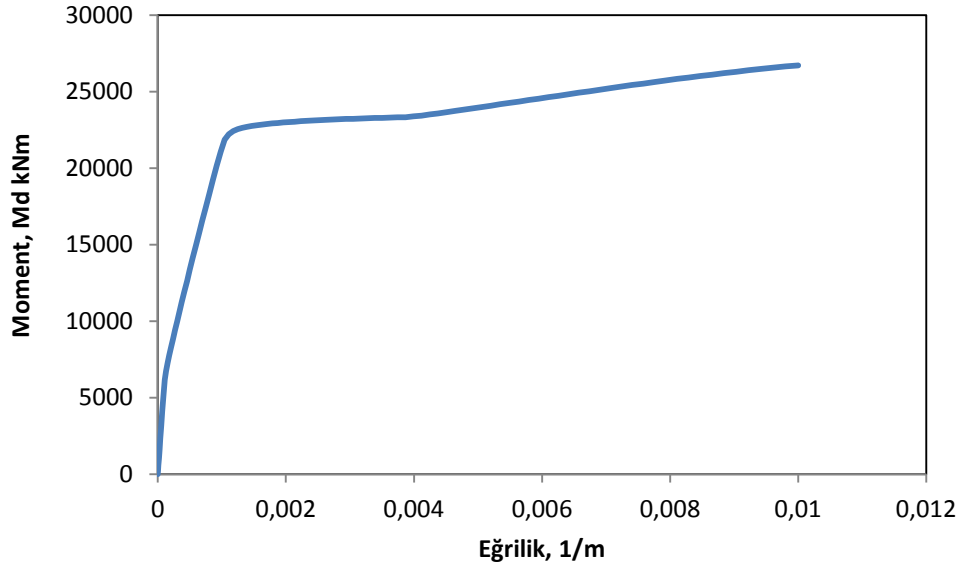


Şekil 3.2. Taban kesme kuvvetinin bina kat seviyelerine dağıtılması

Binanın yukarıda anlatılan kriterlere göre SAP2000 programında yapılan eşdeğer deprem yükü analizi sonrasında U kesitli betonarme perdenin tabanında x,y ve z doğrultusunda oluşan kesme kuvveti, aksenal yük ile eğilme ve burulma momentleri Çizelge 3.3’de verilmiştir. Perdenin donatı hesabı SAP2000 programı bünyesindeki Sectiondesigner ile yapılmıştır. Bunun için Çizelge 3.3’de belirlenen aksenal yük değeri kullanılarak, perdenin moment-eğrilik ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 3.3) . Perdede Şekil 3.4’de gösterilen donatılar kullanıldığında oluşan moment taşıma kapasitesi M_d , eşdeğer deprem yükü analizinden elde edilen ve Çizelge 3.3’de gösterilen maksimum moment değerinden büyük olduğundan kesit donatı durumu yeterlidir.

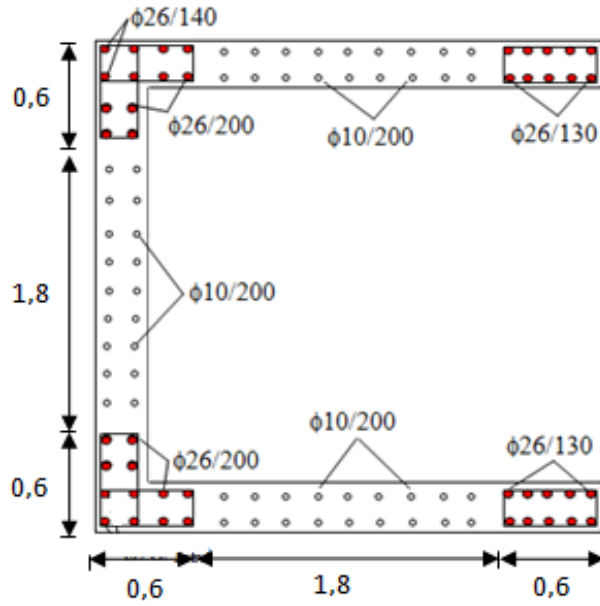
Çizelge 3.3. Perde tabanında oluşan kuvvet ve momentler

Kesme Kuvveti (kN)		Eksenal Yük (kN)	Eğilme Momenti (kNm)		Burulma Momenti (kNm)
V_x	V_y	V_z	M_x	M_y	M_z
2475,18	1304,45	5387,10	12197,16	17998,30	1379,09
-2378,12	-1304,45	2034,04	-12197,16	-17838,76	-1379,09



Şekil 3.3. Kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik ilişkisi

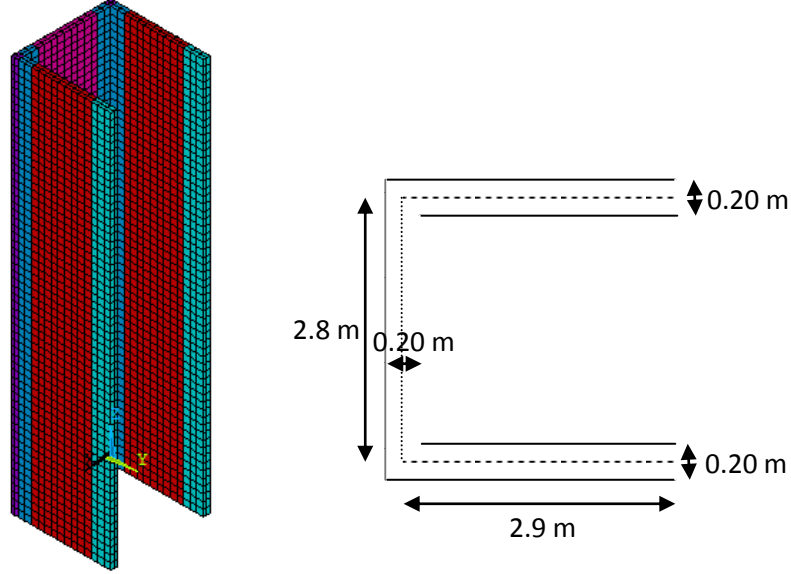
Perde modelinin flanş uçlarında ve gövde-flanş birleşim bölgelerinde boyuna $\phi 26$ donatı, flanş ve gövde ortasında boyuna $\phi 10/200$ mm donatı kullanılmıştır. DBYBHY-07'ye göre düşey doğrultuda etriye ve/veya çiroz aralığı perde kalınlığının yarısından ve 100 mm'den fazla, 50 mm'den daha az olmayacağından, hesaplarda etriye olarak $\phi 8/100$ mm donatı tercih edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada incelenen perde elemanların DBYBHY-07'ye göre süneklik düzeyi yüksek elemanlar olduğu söylenebilir.



Şekil 3.4. U kesitli perdenin donatı planı

3.1.1. U kesitli perdenin modellenmesi

Tasarımda kullanılacak veriler elde edildikten sonra ANSYS yazılımı kullanılarak U kesitli perdenin sonlu eleman modeli yapılmıştır. Şekil 3.5'de U kesitli perdenin boyutları ile sonlu eleman görüntüsü gösterilmiştir. Perde uç bölgelerinde perde kalınlığı DBYBHY-07'de belirtildiği gibi en az 200 mm olacak şekilde belirlenmiştir.



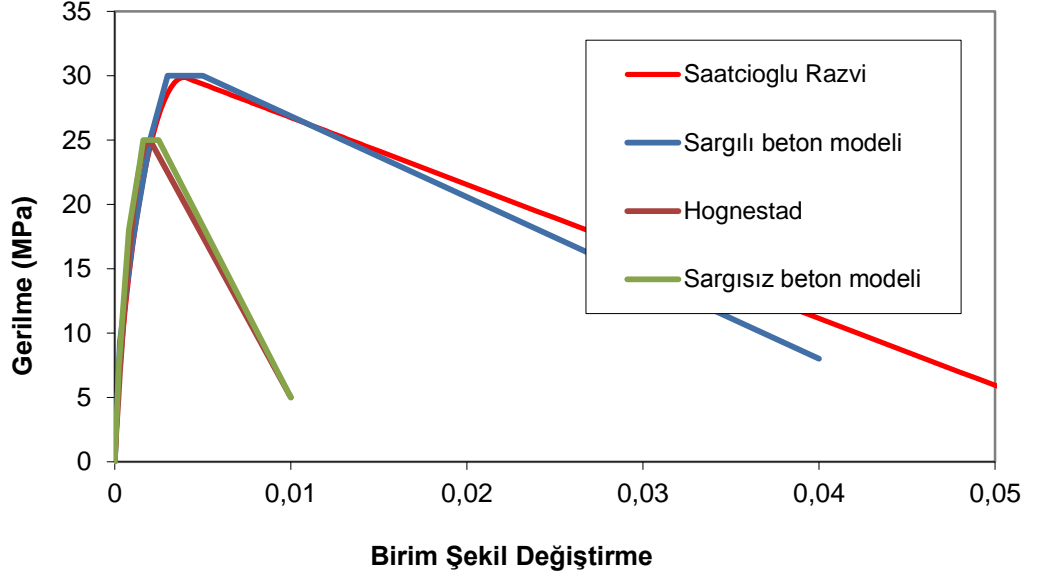
Şekil 3.5. U kesitli perdenin boyutları ve sonlu eleman modeli

Modelin oluşturulmasında 8-düğüm noktalı katı eleman SOLID65 kullanılmış, en az sayıda sonlu eleman oluşturacak şekilde dizayn yapılarak çözüm süresinin kısaltılmasına dikkat edilmiştir. Böylelikle bilgisayarın daha rahat çözüm yapması ve analiz süresinin kısaltılması sağlanmıştır.

3.1.2. Sargılı ve sargısız beton modelleri

Kaleme alınmış tarzı itibariyle didaktik özellikler taşıyan DBYBHY-07, sargılı veya sargısız beton gerilme-birim şekil değiştirme malzeme modelleri için Mander vb. modelini önermiştir. Diğer modellerle karşılaştırıldığında, bu modelin sargılı beton için özellikle azami gerilme sonrası yumuşama bölgesinde daha yüksek gerilme değerleri verdiği görülmüştür. Saatçioğlu ve Razvi modeli Mander modeliyle tepe gerilmesi benzer eğriler vermekle birlikte, yumuşama bölgesinde daha gerçekçi bir davranış sergilemektedir (Kazaz ve Gülkan 2012). Dolayısıyla hesaplarda sargılı betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Saatçioğlu ve Razvi modeliyle, sargısız betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ise Geliştirilmiş Hognestad modeliyle hesaplanmıştır. U kesitli perdenin sonlu eleman modelinde, flanşların uç kısımları ve gövde-flanş birleşim bölgelerinde sargılı beton modelleri, diğer kısımlarında ise sargısız

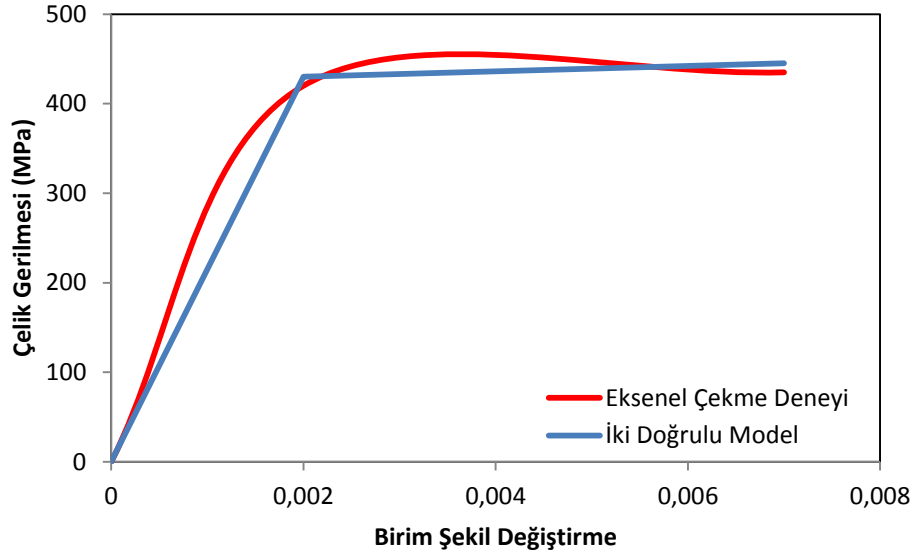
beton modelleri kullanılmıştır. Sargılı ve sargısız betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile bunların modellemede kullanılan çok doğrulu halleri Şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Sargılı ve sargısız beton modelleri

3.1.3. Beton ve donatı özellikleri

U kesitli betonarme perdenin sonlu eleman ile modellenmesinde kullanılan beton malzemenin dayanım sınıfı C25/30 olarak belirlenmiş, betonun elastisite modülü ise 31000 MPa olarak alınmıştır. Donatı çeliği elastik modülü 200000 MPa, akma dayanımı 420 MPa ve akma sonrası teğet modülü 550 olacak şekilde iki doğrulu model olarak alınmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Çelik için kullanılan malzeme modeli

Modelde kullanılan donatılar yayılmış modelleme tekniğine göre yerleştirilmiştir. Bu modelleme tekniğinde donatıların hacimsel oranları ve yerleşim şekilleri Çizelge 3.4’de gösterildiği gibi hesaplanarak programa girilmiştir. DBYBHY-07’ye göre perde uç bölgesinin uzunluğu l_u , perdenin toplam uzunluğu l_w ’nin 0,2 katına eşit ya da daha büyük olmalıdır. Bu nedenle U kesitli betonarme perdenin uç ve gövde-flanş birleşim kısımlarındaki sargı bölgesi $0,2l_w$ olarak alınmıştır.

Çizelge 3.4. Donatıların hacimsel oranları ve yerleşim şekilleri

Reel Sabiti	Hacimsel Oran	Donatı 1	Donatı 2	Donatı 3	$\theta 1$	$\phi 1$	$\theta 2$	$\phi 2$	$\theta 3$	$\phi 3$
R1		0,04425	0,0039	0,0039	0	90	90	0	0	0
R2		0,05309	0,0039	0,0039	0	90	90	0	0	0
R3		0,00392	0,00392	0	0	90	90	0	0	0
R4		0,02654	0,0039	0,0039	0	90	90	0	0	0
R5		0,00392	0,00392	0	0	90	0	0	0	0

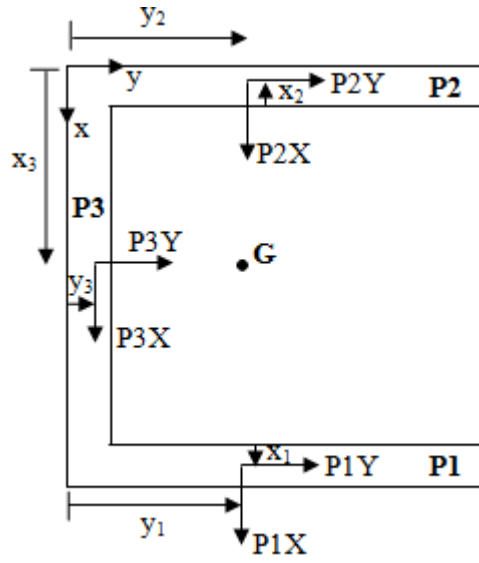
3.2. Yöntem

Bu çalışmada, U kesitli 12 m uzunluğundaki betonarme perde duvarın ANSYS yazılımı kullanılarak, yukarıda belirtilen şekilde sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra Çizelge 3.5’de gösterilen şekilde çeşitli kesme kuvvetleri ve eksenel yük etkileri altında nonlineer analizleri yapılarak, oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Model perdeye sadece x doğrultusunda, sadece y doğrultusunda ve her iki doğrultuda kesme kuvveti uygulanmış ve meydana gelecek burulma ve eğilme deformasyonları araştırılmıştır. Kesit analizleri, hem SAP2000 programında hem de ANSYS’de yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.5. Değişik yükleme durumları

Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10

Model 1’de, kesme kuvveti şeklin geometrik merkezine, Model 6’da kesme kuvveti şeklin kayma merkezine uygulanmıştır. Model 5 ve Model 10’da kesme kuvveti U kesitli betonarme perde gövde kısmının tam ortasının 1 m yukarisından uygulanmış, diğer tüm modellerde kesme kuvveti gövdenin ortasından etki etmiştir.



Şekil 3.8. Kesme kuvvetleri ve yerlerinin gösterilmesi

Çizelge 3.5’de verilen yükleme şekillerine göre yapılan analizlerin sonucunda U kesitli betonarme perde duvarın flanş ve gövde kısımlarının aldıkları kesme kuvvetlerinin pozitif yönleri ve bu kuvvetlerin yerleri hesaplanırken kullanılan x_1 , x_2 ve x_3 ile y_1 , y_2 ve y_3 mesafeleri Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

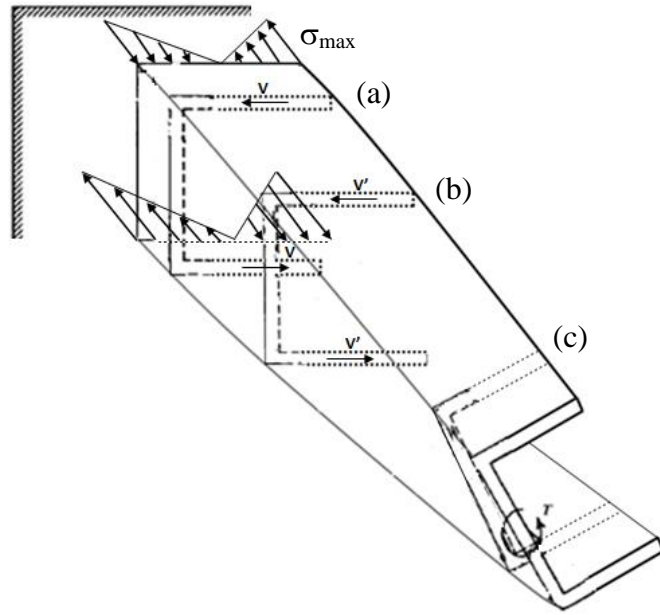
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, ANSYS programında sonlu eleman modeli yapılan U şekilli betonarme perde duvarın Çizelge 3.5’de gösterilen şekilde, kesme kuvveti ve aksenal yük etkisi altında nonlinear analizleri sonucunda uğradığı deformasyon şekilleri verilmektedir. Çizelge 3.5’de gösterilen her bir model için yük-deplasman eğrisinin numaralar ile gösterilen noktalarına ait hesaplar verilmiştir. Eğrilerin 1 ile gösterilen noktasında beton çatlamış, 2 ile gösterilen noktasında donatı akmış ve $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaşılmış, 3 ile gösterilen noktasında beton ezilerek $\varepsilon_c = 0,0038$ değerine ulaşılmıştır. 4 ve 5 ile gösterilen noktalar ise betonun ezilmesinden sonraki durumlarına karşılık gelmektedir. Çalışmada, her bir modele ait burulma açıları çatlama, donatının akması ve betonun ezilmesi durumlarında gösterilmiş, moment-eğrilik ilişkileri ile birim şekil değiştirmeler hem SAP2000’de hem de ANSYS’de elde edilerek kıyaslama yapılmıştır. ANSYS’den elde edilen verilerle, donatının akması ve betonun ezilmesi durumlarına göre hesaplanan birim şekil değiştirmeler U kesitli perdenin iç ve dış bölgeleri için ayrı ayrı çizdirilerek yorumlar yapılmıştır. Perdenin gövde ve flanş kısımlarında oluşan kayma deformasyonları her bir model için gösterilmiştir. Perdelere uygulanan kesme kuvvetleri etkisi altında plastik kayma merkezinin değişimi incelenmiş, çatlama donatının akması ve betonun ezilmesi gibi durumlarda kayma merkezi yeri verilerek bölüm sonlandırılmıştır.

4.1. U Kesitli Betonarme Perdede Oluşacak Mekanizmanın Belirlenmesi

Dairesel kesitli olmayan yapı elemanları burulma yüklerine maruz kaldıklarında eğrilirler. Bununla birlikte yapı elemanı uç bölgesinden yoğun bir şekilde mesnetlenir ise meydana gelecek eğrilme kısıtlanmış olur. Bu nedenle dairese kesitli olmayan yapı elemanlarının uç bölgesinde normal gerilmeler meydana gelir. Buna ek olarak elemanın uç bölgesinde burulma yükünü dengeleyebilmek için kayma gerilmeleri de meydana gelecektir. Şekil 4.1’de bu çalışmada ele alınan U kesitli bir betonarme perde elemanında burulma yükü sonucu oluşan mekanizma gösterilmiştir. Perdenin bir ucu

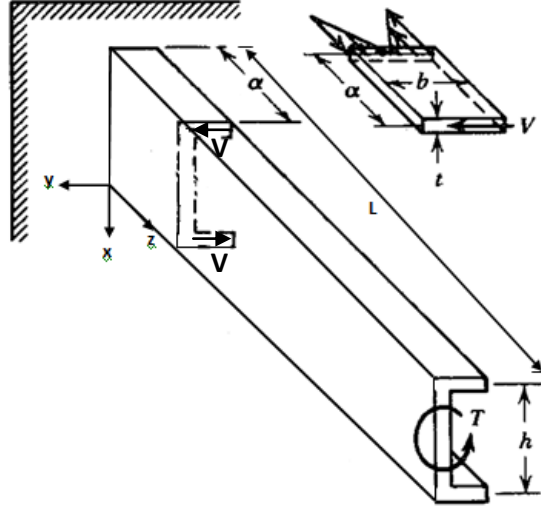
mesnetlenerek eğilmesi kısıtlanmıştır. Perdenin mesnete yakın bölümünde burulma yükü flanşlardaki yanal kesme kuvveti V esas alınarak iletilir. Bu kesme kuvveti her flanşta yanal eğilme oluşturur. Bunun bir sonucu olarak, lineer eğilme teorisini esas alarak mesnete doğru normal gerilme dağılımları meydana gelmektedir. Buna ek olarak, perdenin mesnetlerine doğru her flanşın içinde kayma basınç dağılımları oluşmaktadır. Mesnetten bir miktar uzaklıkta kısmen eğilme oluşur ve burulma yükü kesme kuvvetleri tarafından ($V' < V$) eğilme etkisi sınırlandırılarak iletilir. Mesnetten uzaklaştıkça elemanın uç kısmındaki sınırlandırıcı etki azalır ve moment ağırlıklı olarak burulma ve kesme gerilmeleri iletir.



Şekil 4.1. U kesitli perde üzerinde burulma yükünün genel etkisi

(a) Ağırlıklı Olarak Yanal Kesme (b) Kısmen Yanal Kesme ve Kısmen Burulmalı Kesme (c) Ağırlıklı Olarak Burulmalı Kesme

U kesitli betonarme perdede, Çizelge 3.5’de belirtilen yükleme şekilleri altında hem eğilme hem de burulma etkileri meydana gelmektedir. Perdede oluşan burulma momenti, Şekil 4.2’de gösterildiği gibi mesnetlerde normal gerilme oluşturduğundan alt ve üst flanşlarda eğilme etkisi meydana gelmektedir. Burulma etkisi altındaki U kesitli betonarme perdenin alt ve üst flanşında oluşan maksimum eğilme momenti Denklem (4.1)’deki formülle hesaplanır.



Şekil 4.2. U kesitli perde flanşında yanal eğilme gerilmelerinin değişimi

$$M_{\max} = -T \left(\frac{\sinh \mu(L-z)}{\cosh \mu L} \right) \quad (4.1)$$

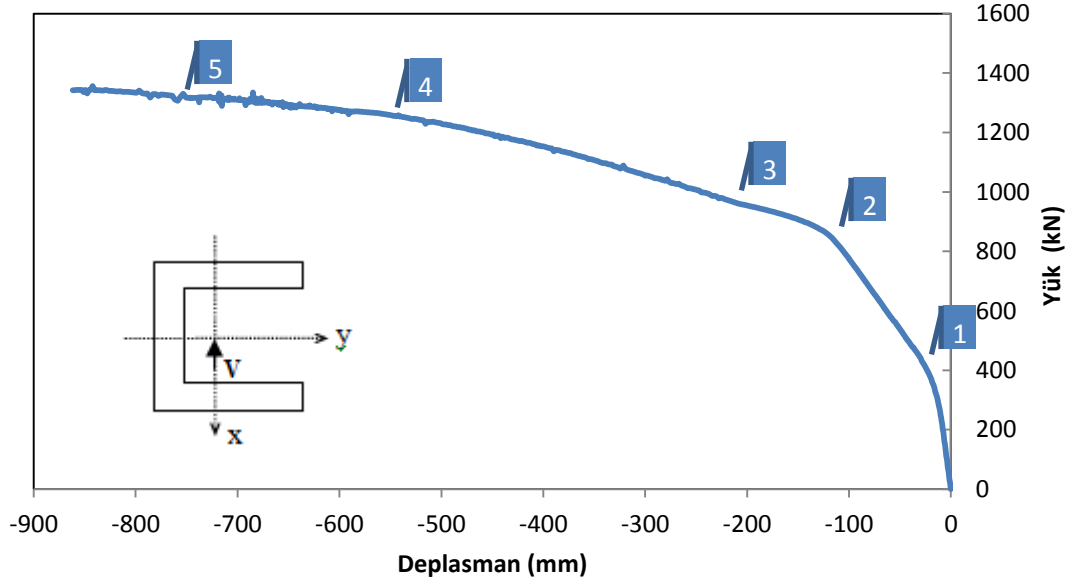
Burada μ ; genişlik azaltma faktörüdür. Çizelge 4.1'de b/t oranına göre belirlenen μ katsayıları gösterilmektedir. b/t >10 durumunda μ katsayısı sabit bir değer almaktadır.

Çizelge 4.1. Genişlik azaltma faktörü

b/t	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	10,0	∞
μ	0,423	0,588	0,687	0,747	0,789	0,843	0,873	0,897	0,936	0,999

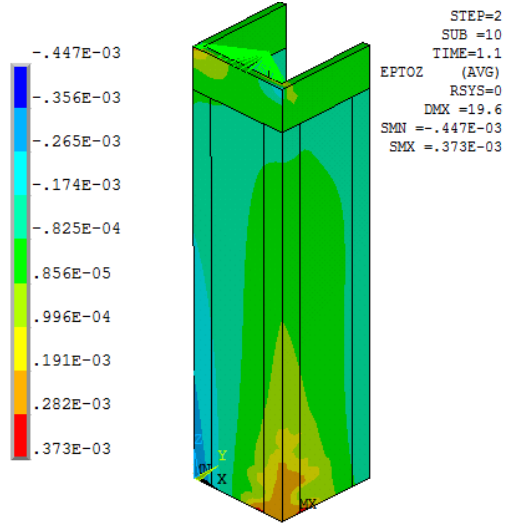
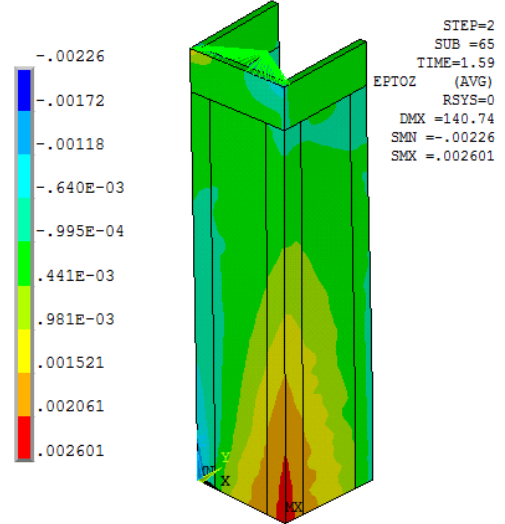
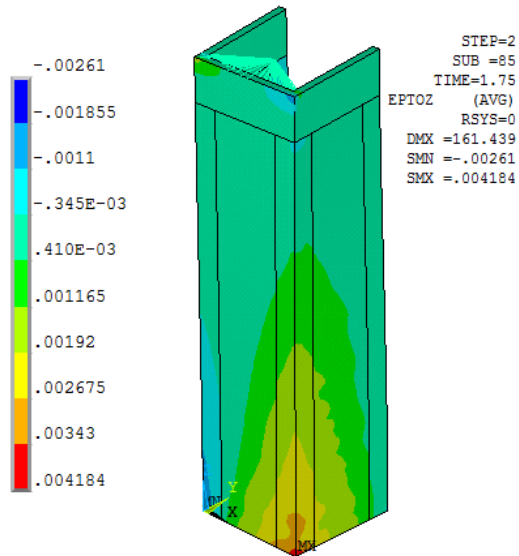
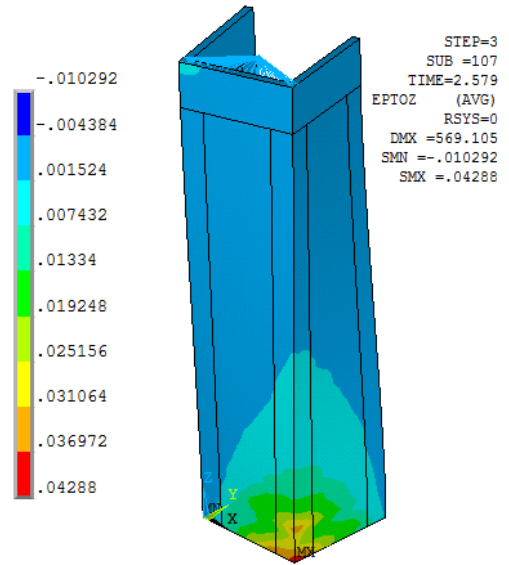
Burulma momentinden dolayı perdenin alt ve üst flanşlarında oluşan eğilme momenti birbirine eşit ve aynı yönlüdür. Bu nedenle kesitteki toplam eğilme momentinin belirlenmesinde hem kesme kuvvetinden dolayı oluşan eğilme momenti hem de burulmadan dolayı flanşlarda oluşan eğilme momenti dikkate alınmıştır.

4.1.1. Model 1 yük-deplasman ilişkisi



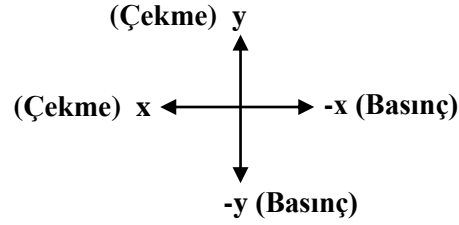
Şekil 4.3. Model 1 yük-deplasman eğrisi

Şekil 4.3'de, Model 1'e ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Model 1'de U kesitli betonarme perde Çizelge 3.5'de gösterildiği gibi x doğrultusunda kesme kuvveti etkisine maruz bırakılmış ve oluşan deformasyon şekilleri sırasıyla çatlama, akma ve ezilme durumları için Şekil 4.4'de gösterilmiştir. U kesitli betonarme perdenin ağırlık merkezine (G) uygulanan kesme kuvveti, kesitte hem eğilme hem de burulma etkisi meydana getirmiştir. $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine karşılık gelen 2 numaralı anda P1 ile gösterilen flanşta çekme, P2 ile gösterilen flanşta basınç etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu etkilere bağlı olarak P1 flanşının gövde ile birleştiği alt bölgedeki donatılarda akma meydana gelmiştir. Betonun birim şekil değiştirmesinin $\varepsilon_c = 0,0038$ değerine ulaştığı 3 numaralı andan itibaren kesitte ezilme ve beraberinde burulma etkileri daha belirgin hale gelmiştir.

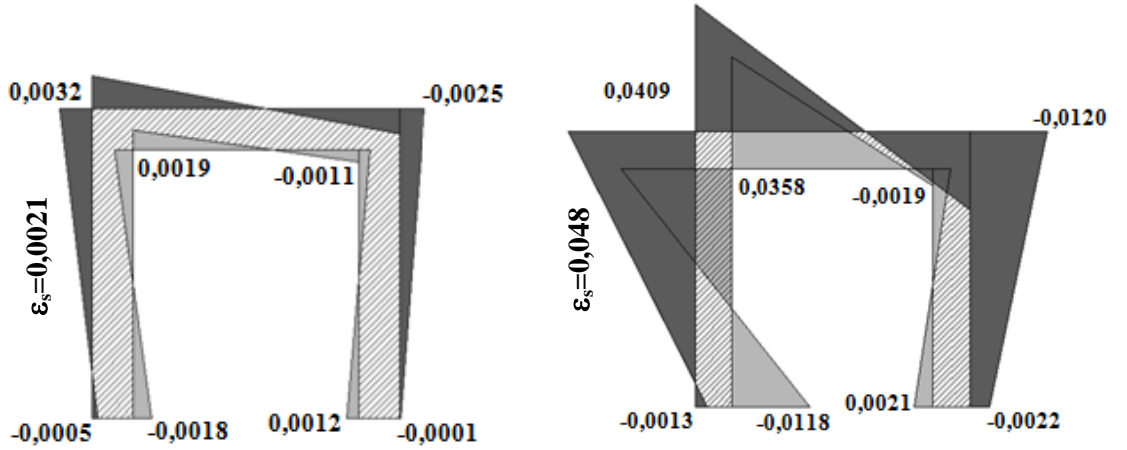
Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+****Şekil 4.4.** Birim şekil değiştirmeler (Model 1)

Şekil 4.6'da ANSYS'de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için

verilmektedir. U kesitli perdenin ANSYS’de oluşturulan modelinde, 4 dış köşe ve 4 iç köşede olmak üzere birinci kat seviyesi içerisinde (alttan ilk 3 m’de) maksimum birim şekil değiştirme değerleri hesaplanarak Şekil 4.6’daki diyagramlar oluşturulmuştur. Diyagramlarda ele alınan pozitif ve negatif yön kabulü Şekil 4.5’de açıklanmıştır. Buna göre x ve y ile gösterilen yönler çekme, -x ve -y ile gösterilen yönler basınç olarak ele alınmıştır. Bu diyagramlar Şekil 4.4’ü açıklayıcı olması için yapılmış olup, diğer tüm modellerde de yukarıda anlatılan esaslara uyulmuştur.

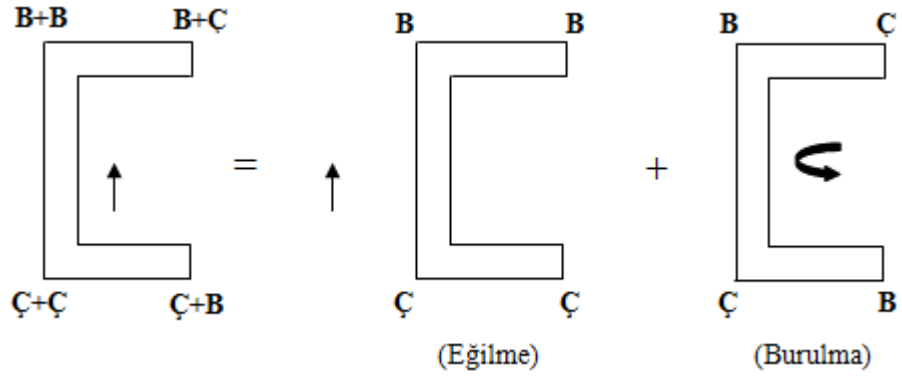


Şekil 4.5. Birim şekil değiştirme pozitif ve negatif yön kabulü



Şekil 4.6. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 1)

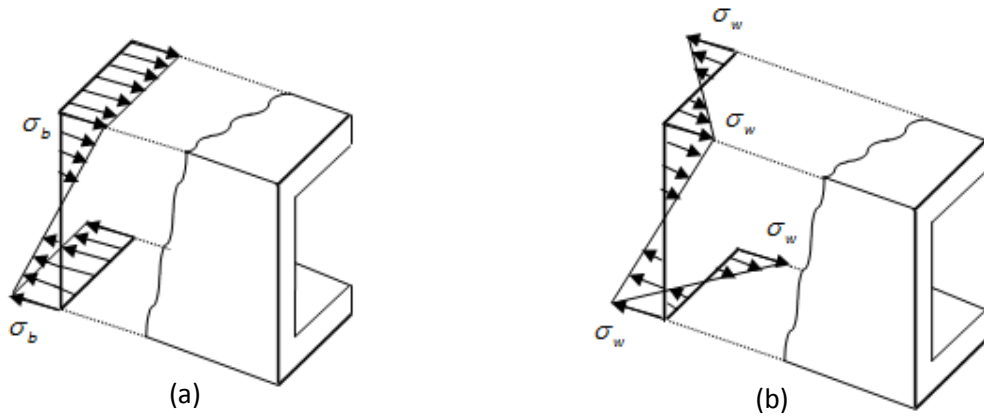
Şekil 4.6’da gösterilen birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde Model 1 analizi sonucunda U kesitli betonarme perdede hem eğilme hem de burulma etkisinin olduğu görülmektedir. Perdenin geometrik merkezine uygulanan kesme kuvveti, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma etkisi de gözlemlenebilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 1)

Yalnız eğilme momentinin etkisi altında tarafsız eksen belli iken, burulmanın da oluşması halinde tarafsız eksenin tanımlanması kesit analizi ile mümkün olamamaktadır. Çünkü, ANSYS ile yapılan nonlinear analiz sonucunda belirlenen gerçek davranış ile perdede oluşacak deformasyon durumu kesit analizi ile yansıtılamamıştır.

Eğilme momentinin etkisinde, perde kesitinde oluşacak normal gerilmeler ile burulma momentinin etkisinden dolayı perdede oluşacak normal gerilmeler Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Bu normal gerilmeler perdede oluşan basınç ve çekme yığılmalarının yerlerini açıkça göstermekte, o noktadaki birim şekil değiştirme değerleri ile desteklenmektedir.



Şekil 4.8. Normal gerilme dağılımları (Model 1)

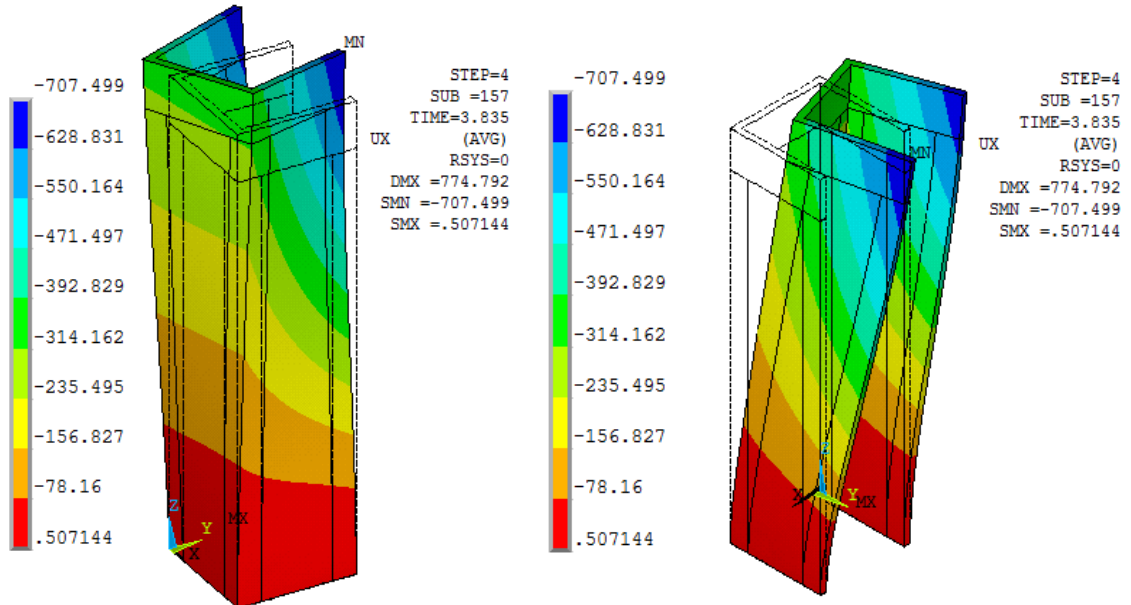
(a) Eğilme Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler (b) Burulma Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler

Çizelge 4.2’de U kesitli betonarme perdenin x, y ve z doğrultusunda yaptığı deplasman değerleri ve perdede oluşan burulma açıları; betonun çatlaması, donatıların akması ve betonun ezilmesi durumlarında ayrı ayrı gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Model 1’e ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)		
				UX	UY	UZ
1	0,00037	Çatlama	0,227	-13,11	0,31	-1,00
2	0,0021	Akma	1,418	-95,50	14,01	0,63
3	0,0038	Ezilme	1,613	-109,60	16,89	0,97
4	0,04	Ezilme+	5,07	-386,42	107,21	5,03

Çizelge 4.2’ye göre, U kesitli betonarme perdenin ağırlık merkezinden uygulanan kesme yükü, kesitte burulma etkisi oluşturmaktadır. Oluşan burulma momenti sonucunda, perdenin uygulanan kesme yükü doğrultusunda yapmış olduğu deplasman ile deformasyona uğramamış durumu Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 1)

U kesitli betonarme perdenin ağırlık merkezinden etkiyen kesme kuvveti sonucunda perdenin flanş ile gövde kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.3’de, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Perdelerin gövde ve flanş kısımlarının aldıkları kesme kuvvetlerinin pozitif yönleri ile bunlara ait mesafeler Şekil 3.8’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.3. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 1)

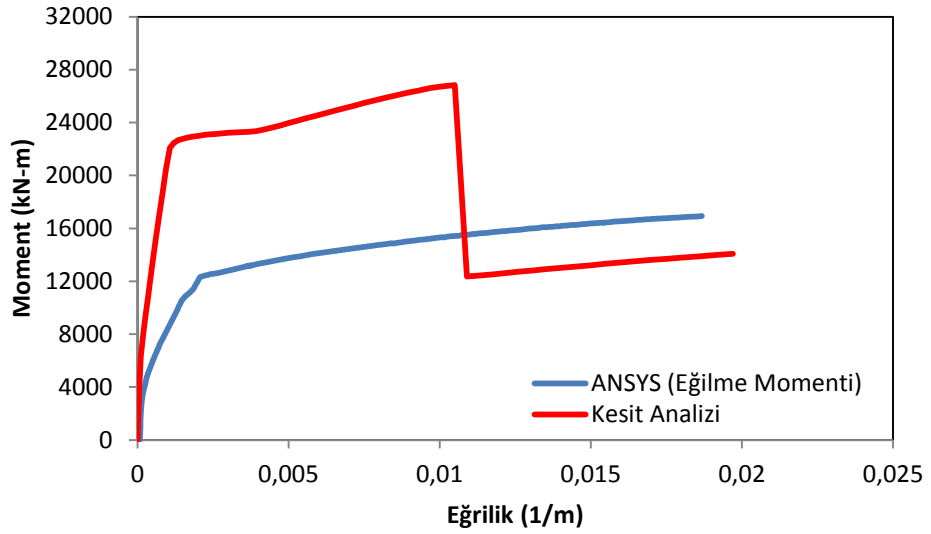
Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	6,83	63,21	319,96	-116,48	94,82	21,66	1242,70	2278,66	1878,65
2	-0,31	180,52	660,48	-275,01	215,96	59,02	1013,21	2928,72	1458,01
3	-18,98	236,87	737,16	-325,82	260,14	65,68	726,77	3621,76	1051,47
4	-29,70	229,14	1057,89	-276,48	161,01	115,48	-612,67	5755,23	257,44
5	2,01	46,85	1277,20	-262,28	23,54	238,74	-1296,98	5886,31	810,67

Çizelge 4.3’e göre, x doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir bölümünü perdenin o doğrultuda yer alan ve P3 ile gösterilen gövde kısmının taşıdığı görülmektedir. Oluşan burulma etkisi sonucunda P2 ile belirtilen flanşın da kesme kuvvetinin bir kısmını aldığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.4. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 1)

Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃
1	4,836	1,017	0,113	0,092	0,081	0,216	2,923	0,868	0,105
2	-48,188	0,880	0,116	0,103	0,080	0,565	4,762	0,310	0,101
3	0,314	0,927	0,109	0,099	0,062	0,860	6,592	0,306	0,106
4	0,392	0,888	0,112	0,071	-0,140	0,708	-3,307	0,801	0,033
5	35,119	-0,213	0,119	0,037	-1,492	0,607	-0,367	1,102	0,010

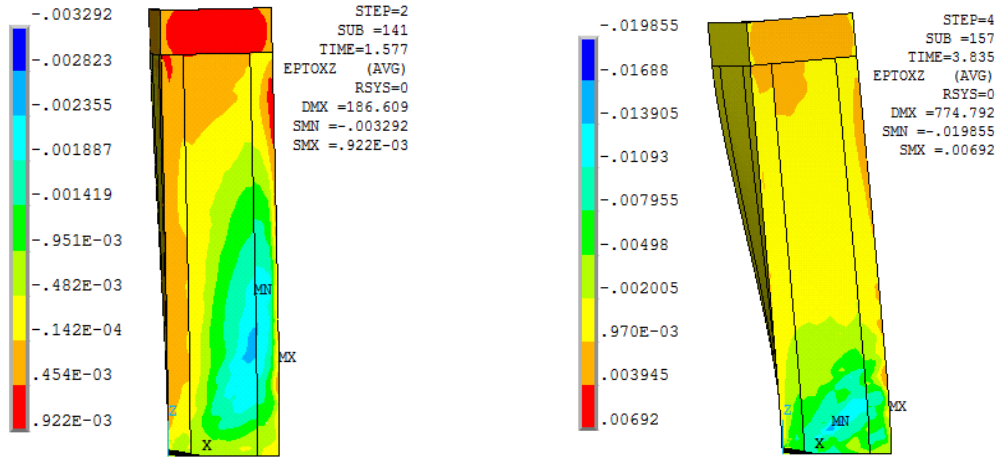
Eğilme ve eksenel yük ya da yalnız eğilme etkisindeki bir kesitin davranışı en sağlıklı biçimde, gerçek malzeme davranışı temel alınarak hesaplanmış veya deneysel verilerden elde edilmiş moment-eğrilik ilişkisi ile izlenebilir. Bu açıdan U kesitli betonarme perdenin ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan nonlineer analizinden elde edilen deneysel veriler ile moment-eğrilik ilişkisi belirlenmiştir (Şekil 4.10).



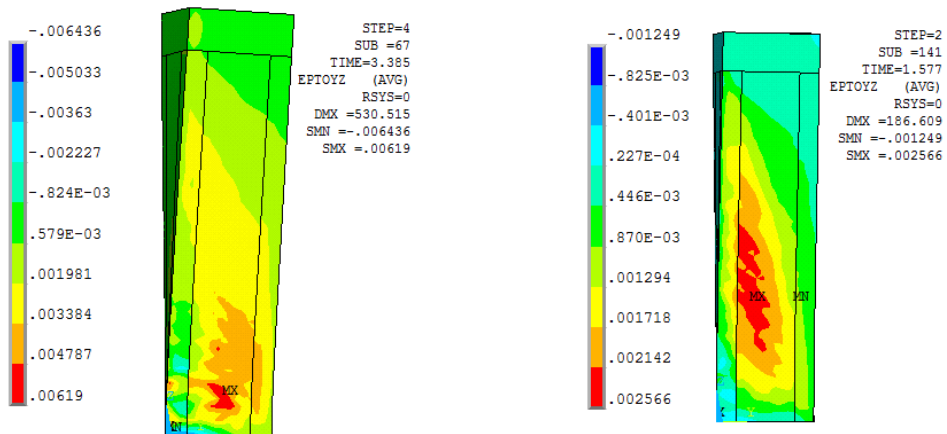
Şekil 4.10. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 1)

Şekil 4.10'a göre, U kesitli betonarme perdenin x doğrultusundaki kesme kuvveti etkisi altında ve mevcut donatılandırılmış durumu ile taşıyabileceği maksimum moment $M_{max} = 16920 \text{ kN-m}$ dir. Çelik donatının akması anındaki eğrilik $K_{akma} = 0,0010 / m$ betonun göçme anındaki eğriliği $K_{göçme} = 0,018 / m$ olarak belirlenmiştir. Göçme eğriliğine ulaşıldıktan sonra beton ezilmekte ve moment taşıma kapasitesi tükenmektedir.

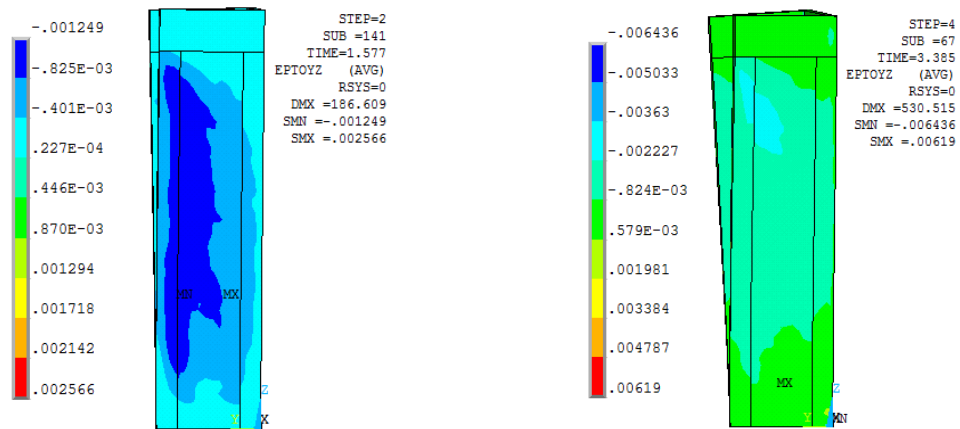
U kesitli betonarme perdeye x doğrultusunda etkiyen kesme yükü altında perdenin gövde ve flanş kısımlarında kayma gerilmeleri oluşmakta ve sonucunda kayma deformasyonları meydana gelmektedir. Şekil 4.11'de gövde üzerinde, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de ise flanşlar üzerinde oluşan kayma şekil değiştirmeler görülmektedir.



Şekil 4.11. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 1)

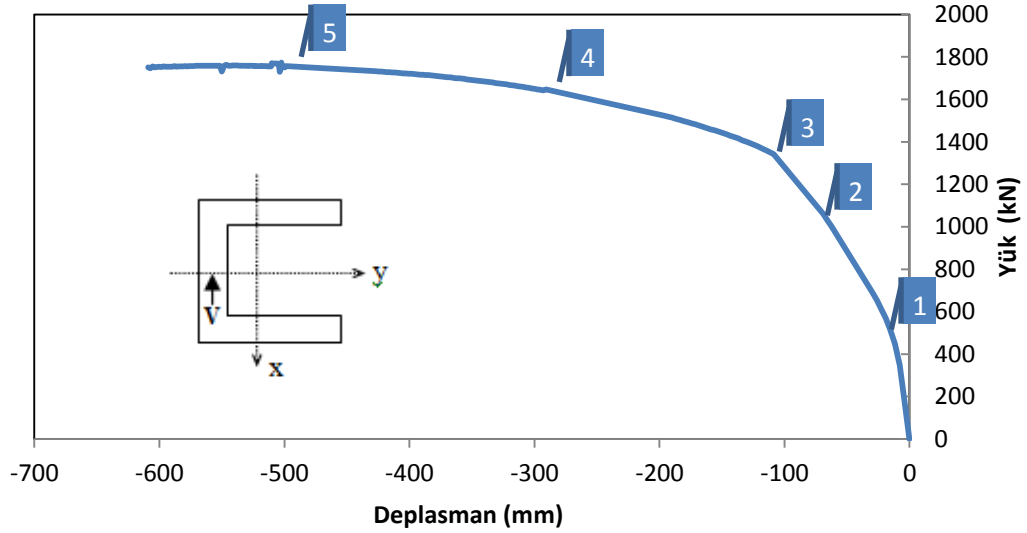


Şekil 4.12. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 1)



Şekil 4.13. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 1)

4.1.2. Model 2 yük-deplasman ilişkisi



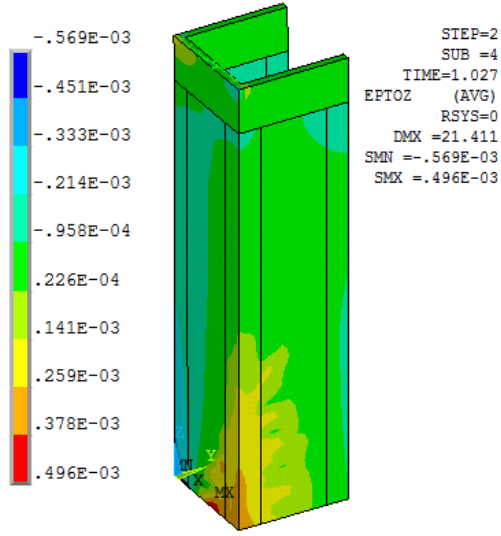
Şekil 4.14. Model 2 yük-deplasman eğrisi

Şekil 4.14'de Model 2'e ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlama önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ve 5 ile gösterilen noktalar ise betonun ezilmesinden sonraki durumlarına karşılık gelmektedir.

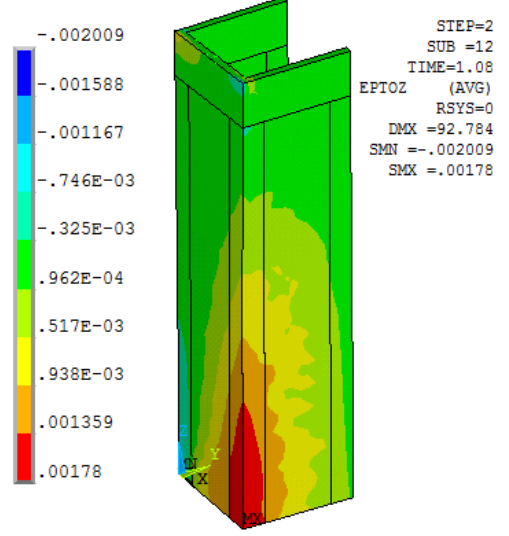
Model 2'de U kesitli betonarme perde, Çizelge 3.5'de gösterildiği gibi, perdenin gövde kısmının tam ortasında bir noktadan x doğrultusunda kesme kuvveti etkisine maruz bırakılmış ve oluşan deformasyon şekilleri sırasıyla çatlama, akma ve ezilme durumları için Şekil 4.15'de gösterilmiştir. 1 numaralı durumda kesitte çatlak oluşumu başlamıştır. $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine karşılık gelen 2 numaralı anda Model 1'de olduğu gibi P1 ile gösterilen flanşta çekme, P2 ile gösterilen flanşta basınç etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu etkilere bağlı olarak P1 flanşının gövde ile birleştiği alt bölgedeki donatılarda akma meydana gelmiştir. Betonun birim şekil değiştirmesinin $\varepsilon_c = 0,0038$ değerine ulaştığı 3

numaralı andan itibaren kesitte ezilme ve beraberinde burulma etkileri daha belirgin hale gelmiştir.

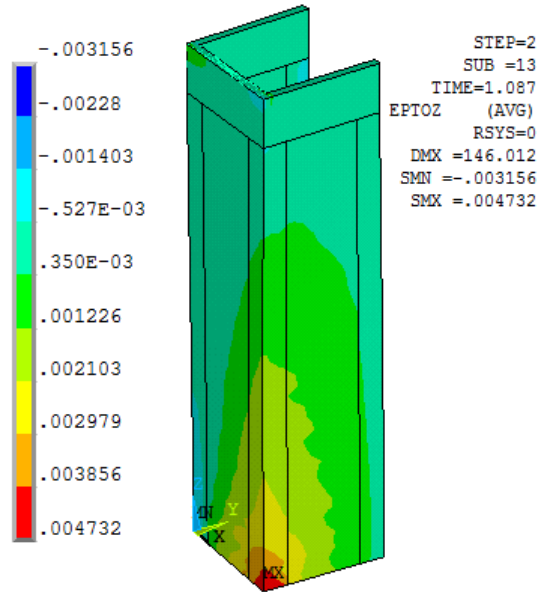
Çatlama



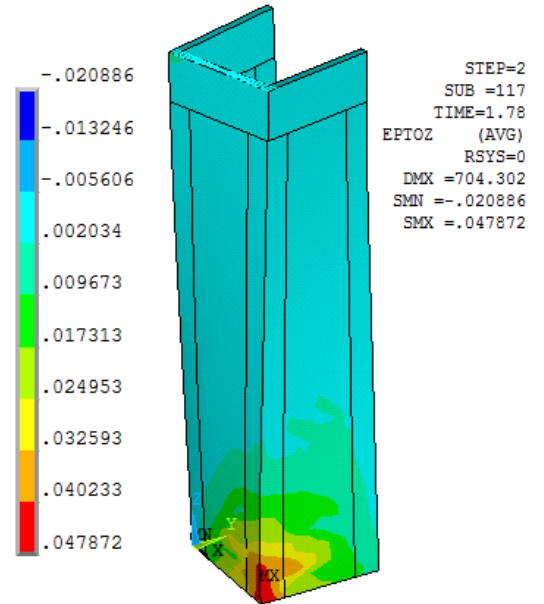
Akma



Ezilme



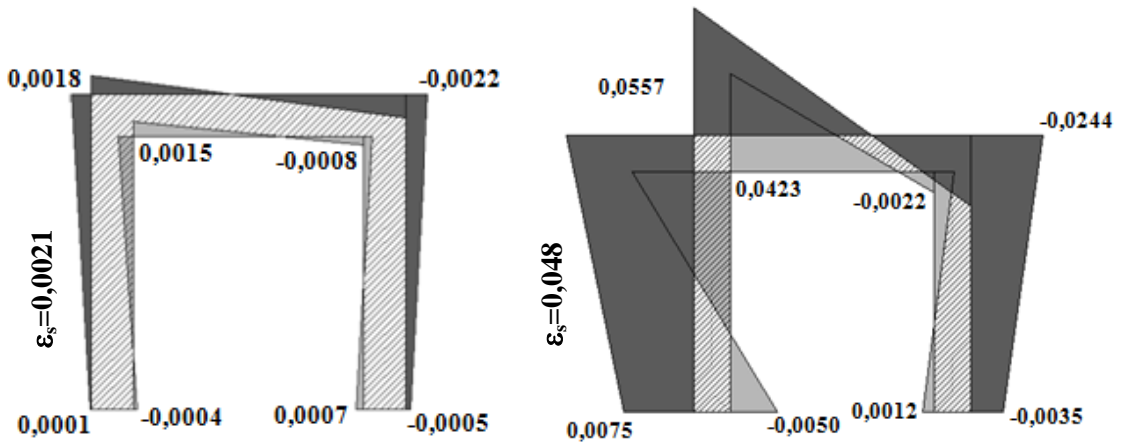
Ezilme+



Şekil 4.15. Birim şekil değiştirmeler (Model 2)

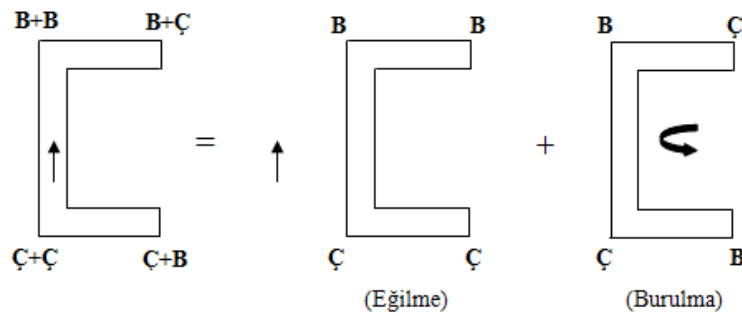
Uygulanan kesme kuvveti U kesitli perdenin kayma merkezine yaklaştığından, burulma momenti değerlerinin Model 1'e göre daha az olması beklenmektedir. Böylece burulma açısı değeri de azalacaktır.

Şekil 4.16'da ANSYS'de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir.



Şekil 4.16. ANSYS'de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 2)

Şekil 4.16'da gösterilen birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde Model 2 analizi sonucunda U kesitli betonarme perdede hem eğilme hem de burulma etkisinin olduğu görülmektedir. Perdenin geometrik merkezine uygulanan kesme kuvveti, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma etkisi de gözlemlenebilir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 2)

Model 2 analizi sonucu meydana gelen deformasyon şekilleri Model 1 analizine benzemektedir. Yalnız eğilme momentinin etkisi altında tarafsız eksen belli iken, burulmanın da oluşması halinde tarafsız eksenin tanımlanması kesit analizi ile mümkün olamamaktadır. Bu sebeple Şekil 4.16’da görülen birim şekil değiştirme diyagramları oluşmaktadır. Burulma momentinin etkisi kesitte deformasyon şeklinde kendini göstermekte, buna karşın hesaplarda bir değişiklik yaratmamaktadır.

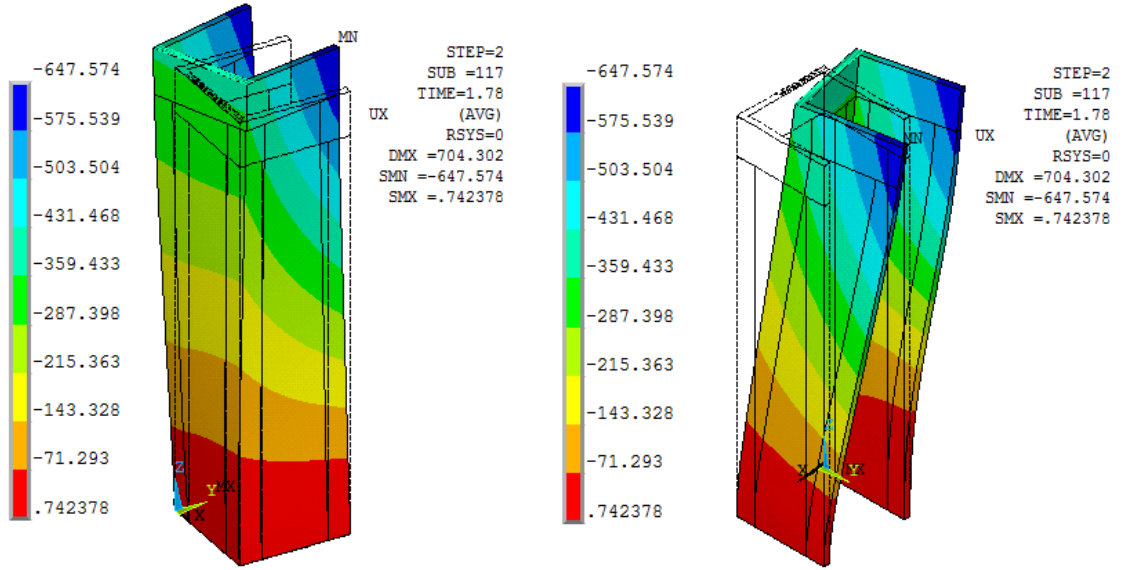
Eğilme momentinin etkisinde, perde kesitinde oluşacak normal gerilmeler ile burulma momentinin etkisinden dolayı perdede oluşacak normal gerilmeler Şekil 4.8’de gösterilen durum ile aynıdır. Bu normal gerilmeler perdede oluşan basınç ve çekme yığılmalarının yerlerini açıkça göstermekte, o noktadaki birim şekil değiştirme değerleri ile de desteklenmektedir.

Çizelge 4.5’de, U kesitli betonarme perdede Model 2 analizi sonucunda x,y ve z doğrultusunda oluşan deplasman değerleri ile burulma açıları; betonun çatlaması, donatıların akması ve betonun ezilmesi durumlarında ayrı ayrı gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Model 2’ye ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değiştirme (ϵ_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)		
				UX	UY	UZ
1	0,00049	Çatlama	0,213	-15,34	0,82	-0,93
2	0,0021	Akma	0,769	-68,94	9,39	0,50
3	0,0038	Ezilme	1,210	-111,76	17,91	1,77
4	0,04	Ezilme+	5,668	-507,95	141,76	7,40

Şekil 4.18’de U kesitli betonarme perdenin uygulanan kesme kuvveti etkisinde uğradığı deformasyon şekli ile deplasman miktarı gösterilmiştir. Kesme kuvveti etkisinde kesitte eğilme ve burulma momenti oluşmaktadır.



Şekil 4.18. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 2)

U kesitli betonarme perdenin gövde kısmının ortasından etkiyen kesme kuvveti sonucunda perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.6’da, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Perdelerin gövde ve flanş kısımlarının aldıkları kesme kuvvetlerinin pozitif yönleri ile bunlara ait mesafeler Şekil 3.8’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.6. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 2)

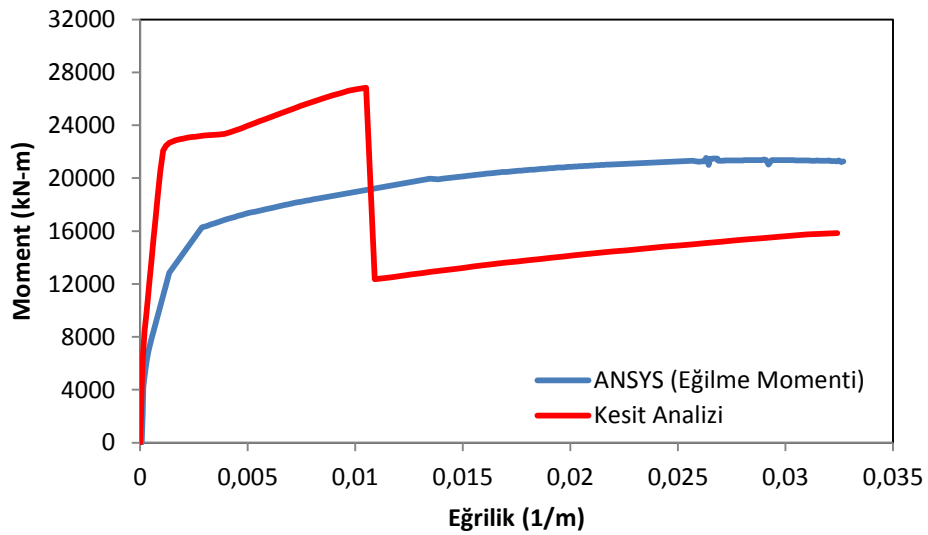
Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	6,74	56,48	453,04	18,85	-43,08	24,23	623,55	3018,92	1718,69
2	5,02	173,93	851,08	38,78	-87,72	48,94	-300,07	4651,72	1009,51
3	-3,18	215,76	1138,92	17,59	-98,68	81,08	-1007,82	5555,39	813,58
4	21,88	258,90	1368,92	-3,14	-97,92	101,07	-2167,78	7385,19	143,75
5	100,32	107,50	1550,35	-108,26	-37,99	146,49	-2871,20	8618,02	-386,73

Çizelge 4.6’ya göre, x doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir bölümünü Model 1’de olduğu gibi perdenin o doğrultuda yer alan gövde kısmının taşıdığı görülmektedir.

Çizelge 4.7. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 2)

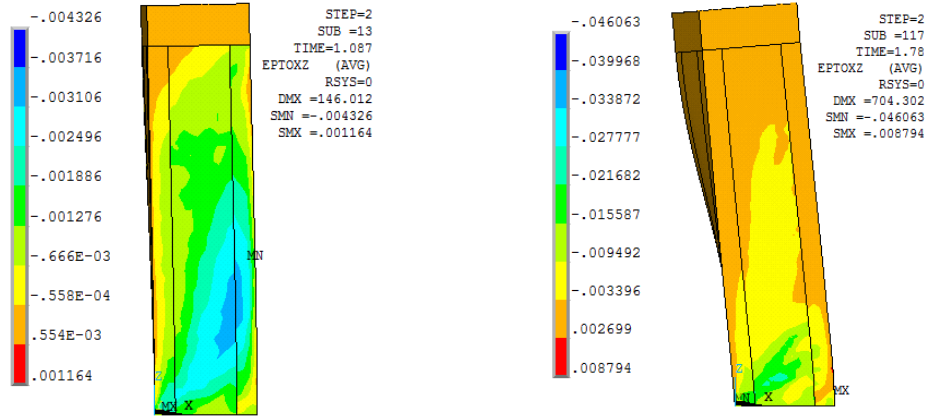
Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃
1	2,267	0,881	0,107	0,045	0,158	0,402	2,888	1,253	0,105
2	0,054	0,917	0,100	-0,046	0,270	0,400	-1,091	1,156	0,098
3	2,500	0,767	0,096	-0,568	0,289	0,727	0,585	1,147	0,085
4	3,857	0,444	0,096	6,400	0,388	0,486	1,457	1,261	0,069
5	2,579	-1,500	0,090	0,448	1,275	0,528	1,662	1,328	0,117

Kesit davranışının daha iyi biçimde belirlenebilmesi adına Şekil 4.19’da moment-eğrilik ilişkisi gösterilmiştir. Çelik donatının aktığı andaki eğrilik $\kappa_{akma} = 0,00136 / m$ ve betonun göçmesi durumundaki eğrilik $\kappa_{göçme} = 0,0175 / m$ olarak belirlenmiştir. U kesitli betonarme perdenin altında taşıyabileceği maksimum moment değeri $M_{max} = 21490 \text{ kN} - m$ olarak bulunmuştur.

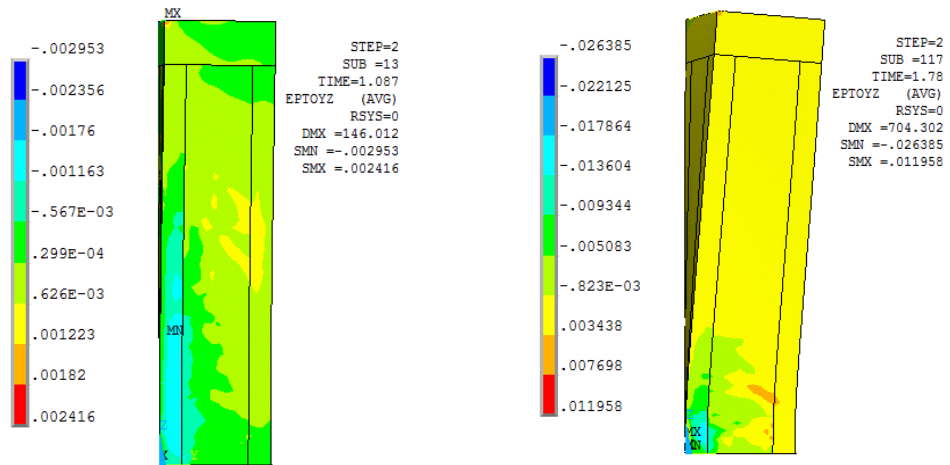


Şekil 4.19. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 2)

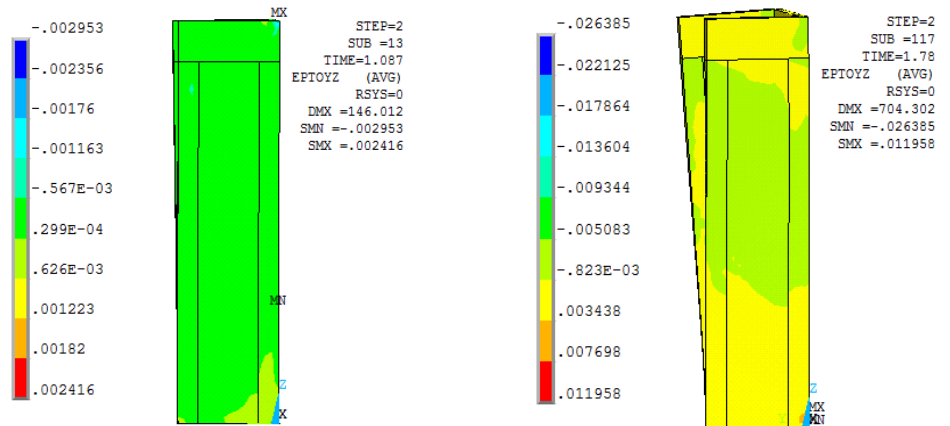
Perdeye etkileyen kesme kuvveti altında flanş ve gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 2)

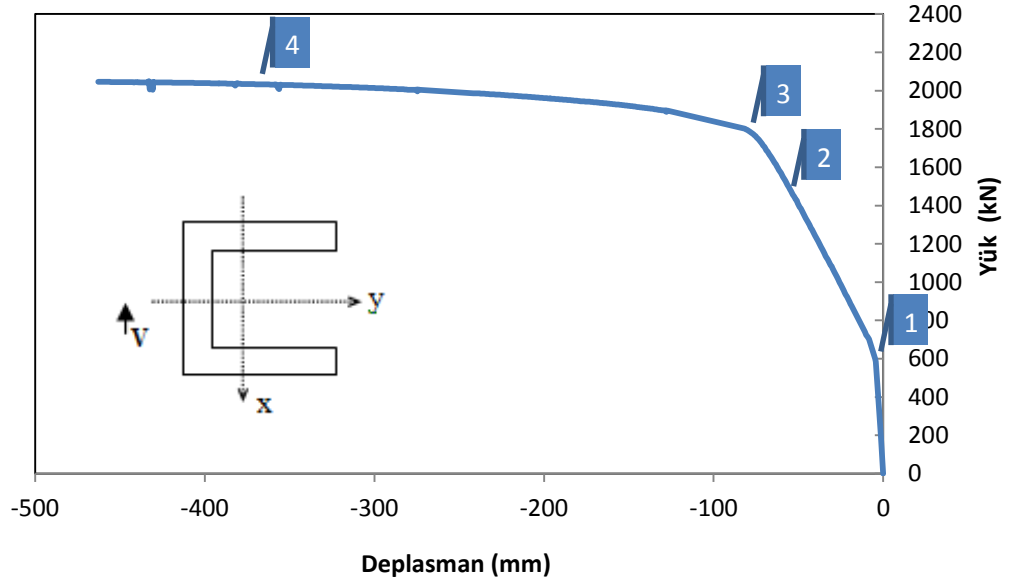


Şekil 4.21. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 2)



Şekil 4.22. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 2)

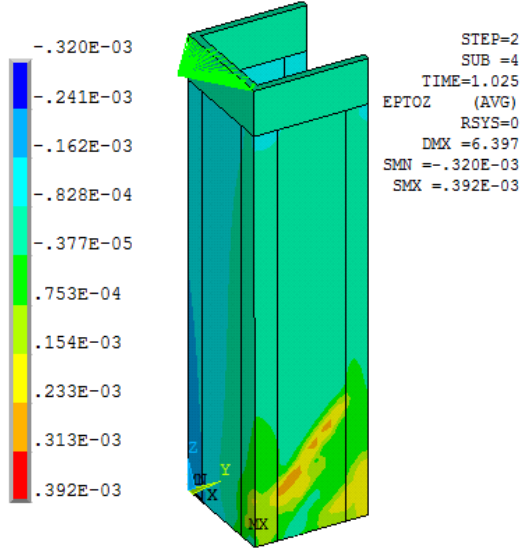
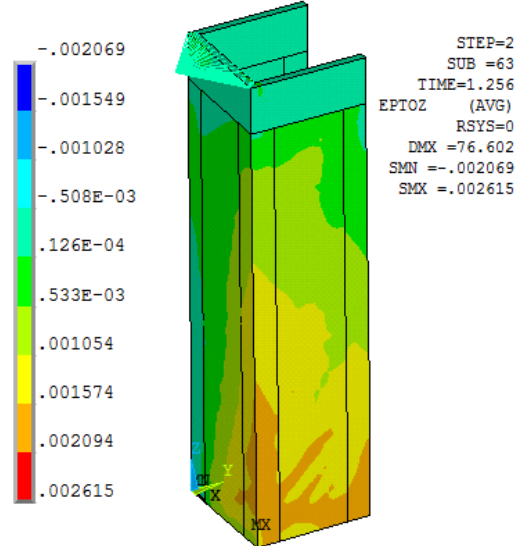
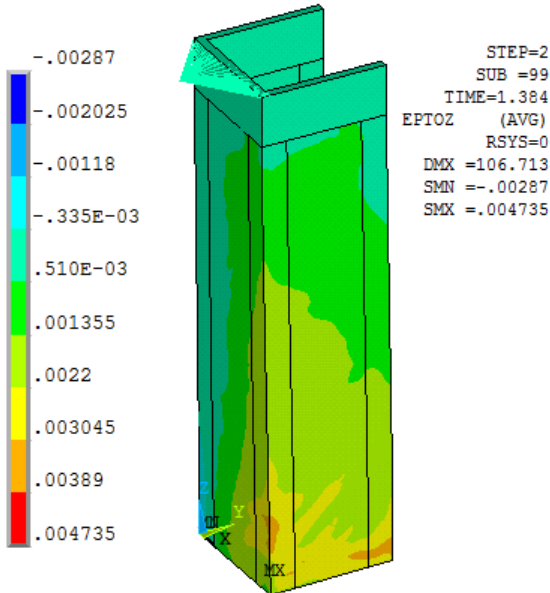
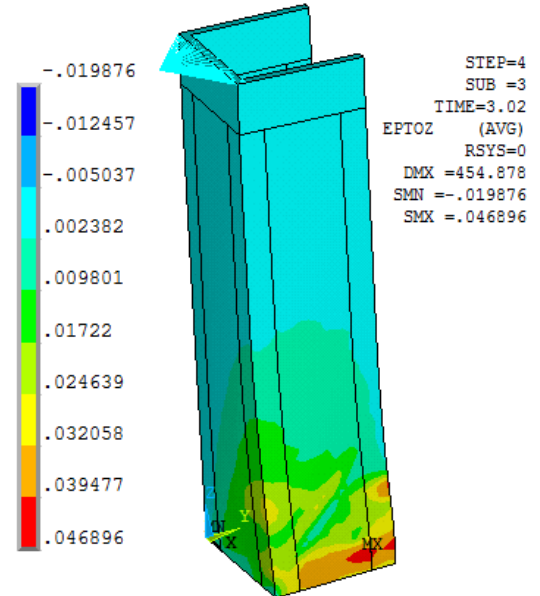
4.1.3. Model 6 yük-deplasman ilişkisi



Şekil 4.23. Model 6 yük-deplasman eğrisi

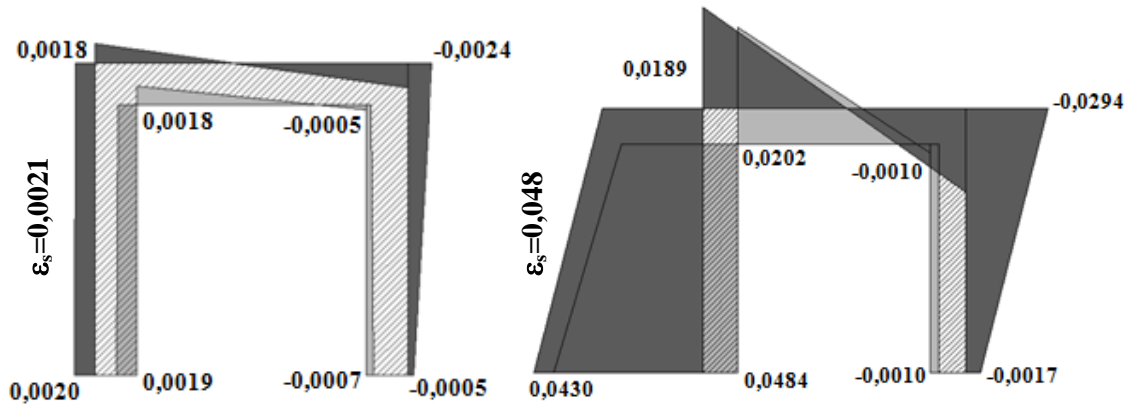
Şekil 4.23'de Model 6'ya ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlamların önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\epsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\epsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki duruma karşılık gelmektedir.

Model 6'de U kesitli betonarme perde, Çizelge 3.5'de gösterildiği gibi kayma merkezinden x doğrultusunda kesme kuvveti etkisine maruz bırakılmış ve oluşan deformasyon şekilleri sırasıyla çatlama, akma ve ezilme durumları için Şekil 4.24'de gösterilmiştir. 1 numaralı durumda kesitte çatlak oluşumu başlamıştır. $\epsilon_s = 0,0021$ değerine karşılık gelen 2 numaralı anda P1 flanşında çekme, P2 flanşının gövde ile birleştiği noktalarda yoğun olmak üzere basınç etkileri oluşmaktadır. Bu etkilere bağlı olarak P1 flanşının alt kısmında geniş bir bölgedeki donatılarda akma meydana gelmiştir.

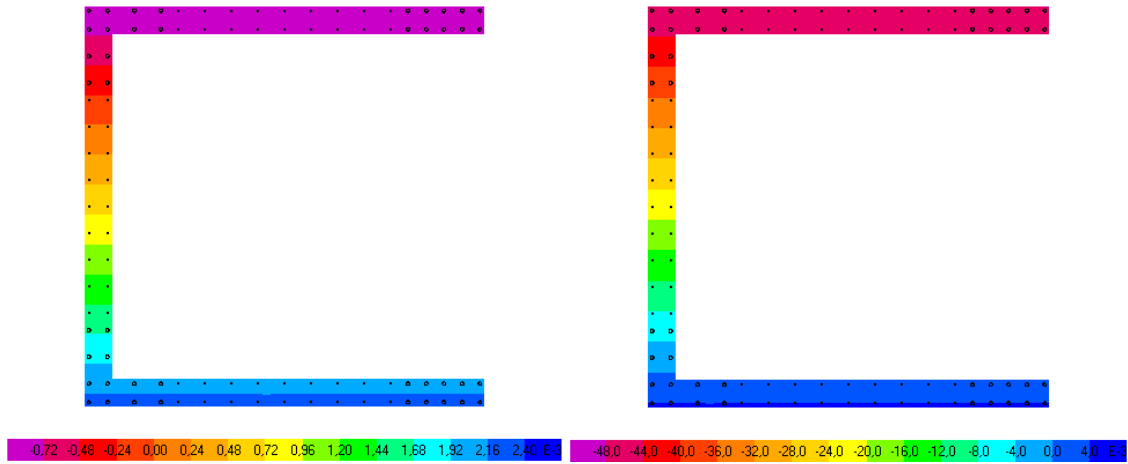
Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+**

Şekil 4.24. Birim şekil değiştirmeler (Model 6)

Şekil 4.25’de ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir. Model 6 analizinde kesme kuvveti U kesitli betonarme perdenin kayma merkezinden uygulandığı için burulma etkisi gözlemlenmemiştir. Kesitte sadece düz eğilme etkisi vardır. Perdenin SAP2000 programı kullanılarak yapılan kesit analizi sonucu elde edilen birim şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.25. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 6)



Şekil 4.26. Kesit analizi ile birim şekil değiştirme diyagramı (Model 6)

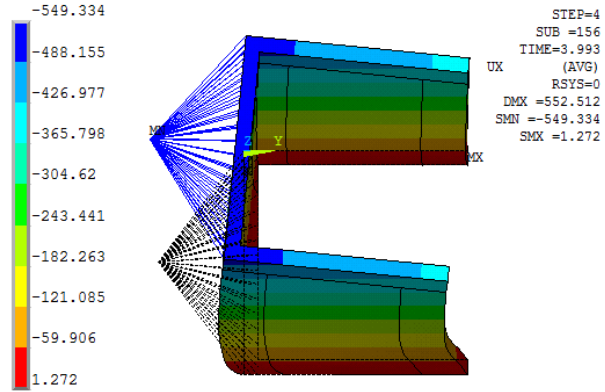
Şekil 4.26’da görüldüğü gibi U kesitli perdenin kayma merkezinden etkiyen kesme kuvveti sonucunda kesit analizinden elde edilen bilgiler doğrultusunda P1 flanşında

çekme, P2 flanşında ise basınç etkileri oluşmaktadır. Tarafsız eksen Şekil 4.26'da sarı renk ile gösterilen bölgeden geçmekte, bu sebeple o bölgede birim şekil değiştirme değerleri sıfıra yaklaşmaktadır. Model 6 analizinde sadece düz eğilme halinin olması nedeniyle kesit analizinden elde edilen deformasyon şekilleri ile ANSYS'de elde edilen deformasyon şekilleri birbiriyle benzerlik göstermektedir. Model 1 ve Model 2'de düz eğilmeye ek olarak burulma etkisinin de oluşması sonucunda perdenin deformasyon şekilleri kesit analizi ile açıklanamamaktadır.

Çizelge 4.8'de, U kesitli betonarme perdede x, y ve z doğrultusunda oluşan deplasman değerleri ile çatlama, akma ve ezilme durumlarındaki burulma açıları verilmektedir. Kesme kuvvetinin kesitin kayma merkezinden uygulanması sebebiyle burulma etkisinin oluşmaması beklenen bir sonuçtur. Ancak Model 6'da sonlu eleman analizinde perdenin kayma merkezi noktasının çok hassas bir şekilde belirlenmemiş olması nedeniyle az da olsa burulma etkisi ortaya çıkmıştır. Şekil 4.27'de perdenin x doğrultusundaki kesme kuvveti etkisinde yapmış olduğu deplasman ve deforme olmuş hali verilmiştir.

Çizelge 4.8. Model 6'ya ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değiştirme (ϵ_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)		
				UX	UY	UZ
1	0,00040	Çatlama	0,03	-4,84	-0,82	-0,93
2	0,0021	Akma	0,42	-56,49	-5,88	4,00
3	0,0038	Ezilme	0,55	-80,27	-5,34	6,06
4	0,04	Ezilme+	1,00	-373,83	-33,69	32,57



Şekil 4.27. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 6)

U kesitli betonarme perdenin kayma merkezinden etkiyen kesme kuvveti sonucunda perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.9’da, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.10’da gösterilmiştir. Perdelerin gövde ve flanş kısımlarının aldıkları kesme kuvvetlerinin pozitif yönleri ile bunlara ait mesafeler Şekil 3.8’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.9. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 6)

Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	-25,20	22,50	602,99	192,03	-281,88	89,85	-167,08	3661,95	1905,14
2	-67,18	120,06	1455,75	477,22	-697,31	220,00	-2665,45	6804,60	1260,86
3	-65,64	123,64	1736,65	580,02	-828,84	248,74	-3445,49	7709,33	1135,79
4	-84,76	54,97	2064,43	484,39	-937,37	452,98	-4658,19	9474,16	584,02

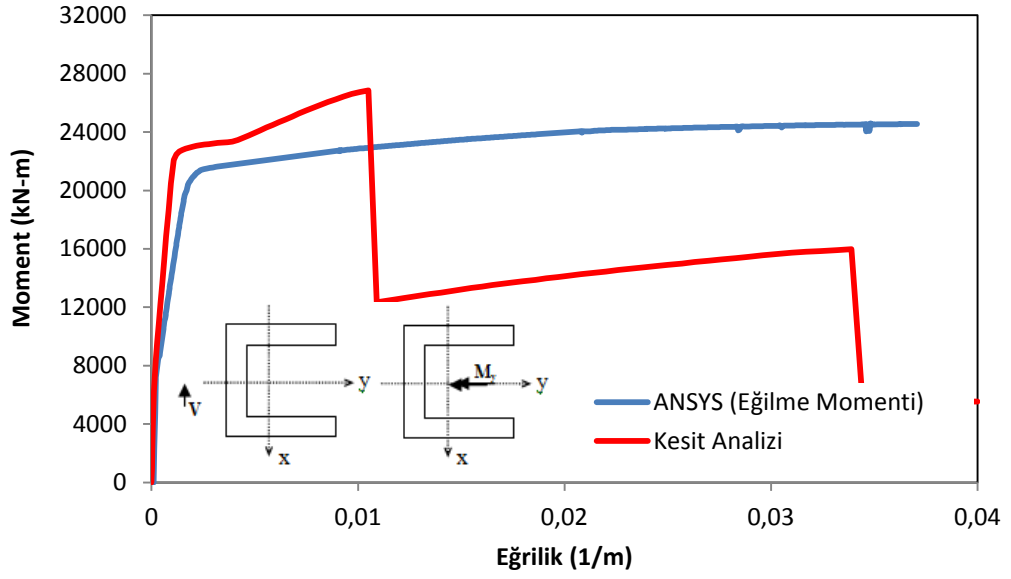
Çizelge 4.9’a göre perdenin kayma merkezinden x doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir bölümünü Model 1 ve Model 2’de olduğu gibi perdenin o doğrultuda yer alan gövde kısmının taşıdığı görülmektedir.

Çizelge 4.10. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 6)

Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃
1	0,654	0,019	0,066	0,085	0,108	2,038	3,060	1,676	0,088
2	0,327	-0,501	0,067	0,110	0,125	1,879	2,127	1,675	0,034
3	0,241	-0,706	0,066	0,102	0,125	1,822	2,117	1,692	0,018
4	-1,250	-6,676	0,022	0,068	0,152	1,843	1,930	1,553	-0,181

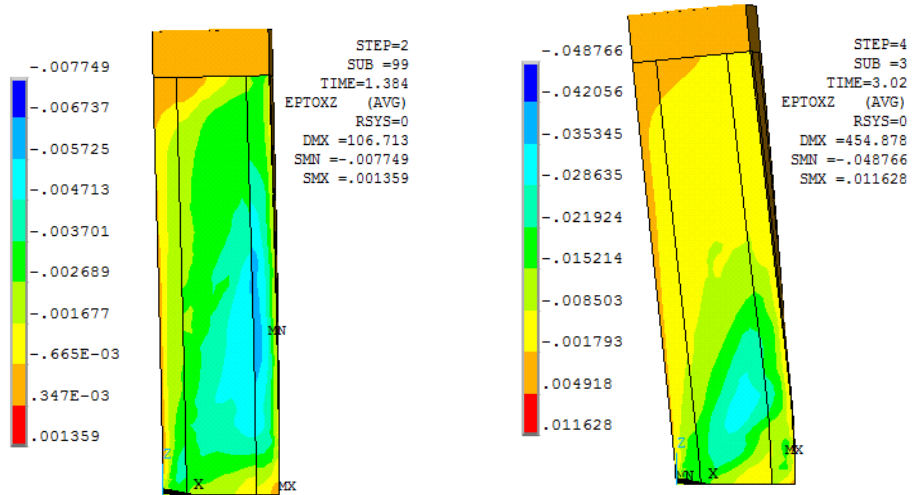
U kesitli betonarme perdenin kayma merkezinden uygulanan kesme kuvvetinin etkisinde perde elemanının davranışın belirlenmesi için Şekil 4.28’de hem ANSYS’den elde edilen moment-eğrilik ilişkisi hem de SAP2000’de yapılan kesit analizinden elde edilen moment-eğrilik ilişkisi gösterilmiştir. Perdenin maksimum taşıma gücü ANSYS’de $M_{\max} = 24500 \text{ kN-m}$ kesit analizinde ise $M_{\max} = 27000 \text{ kN-m}$ olarak belirlenmiştir. Burulma etkisinin olmaması önceki iki modele göre kesitin taşıma kapasitesini arttırmıştır.

Çelik donatının akmasından sonra eğrilik giderek artmış ve moment değeri hemen hemen sabit kalmıştır. Bu haliyle U kesitli betonarme perdenin sünek davranış yaptığı belirlenmiştir.

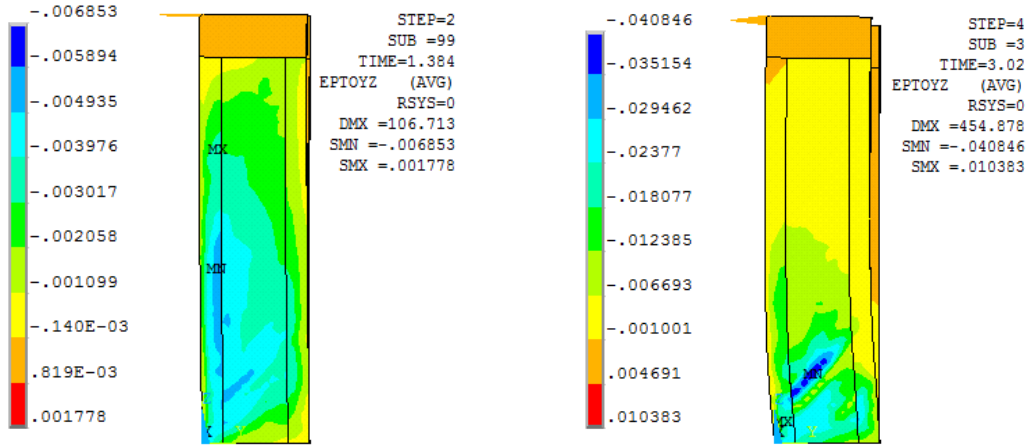


Şekil 4.28. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 6)

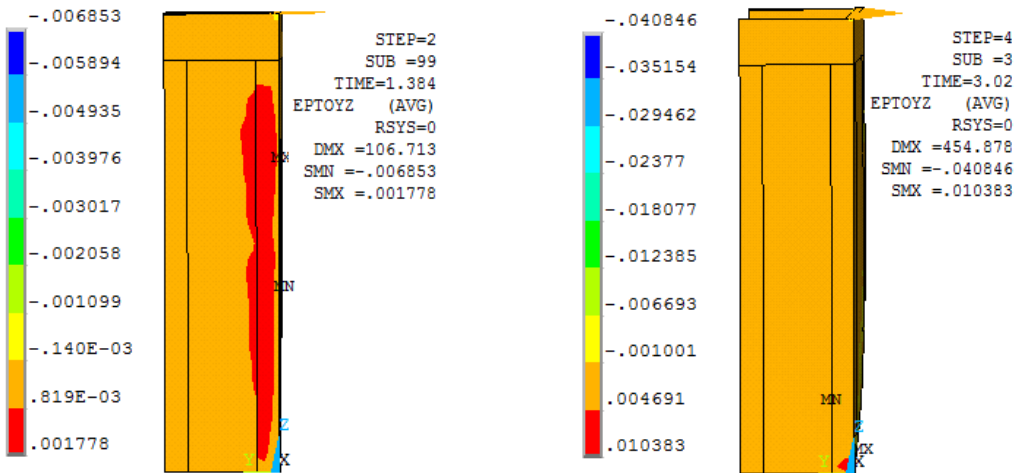
Perdeye etkileyen kesme kuvveti altında flanş ve gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 6)

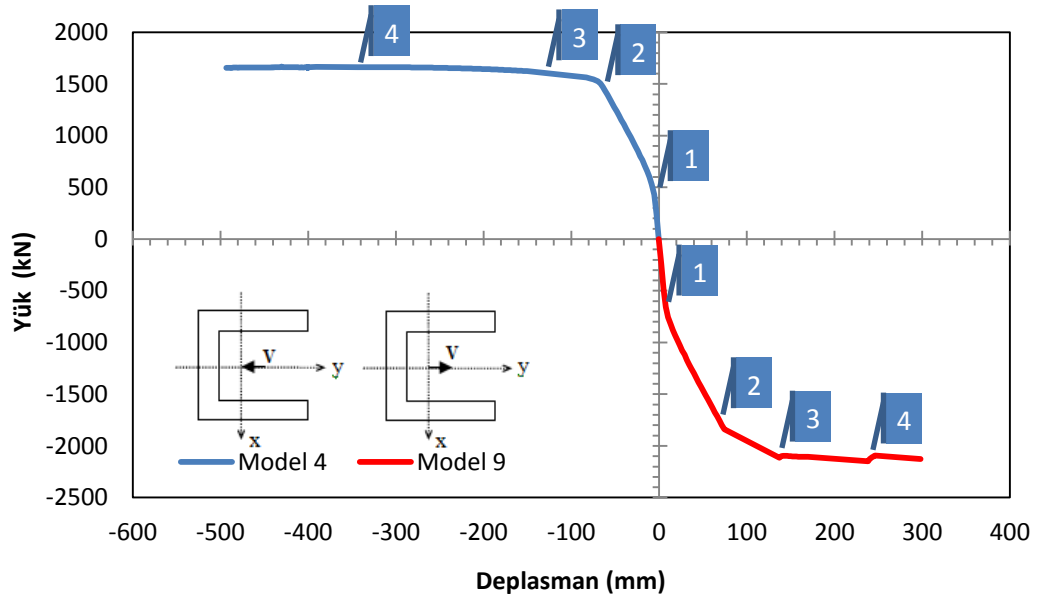


Şekil 4.30. P1 Flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 6)



Şekil 4.31. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 6)

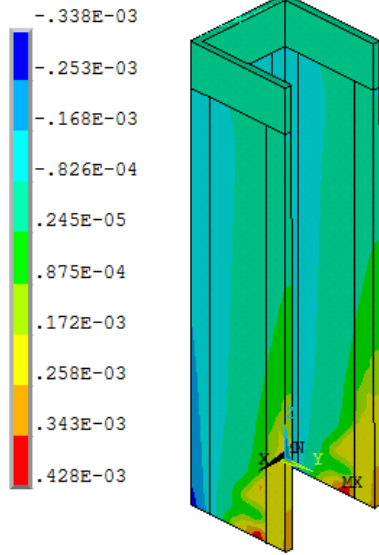
4.1.4. Model 4 ve Model 9 yük-deplasman ilişkileri



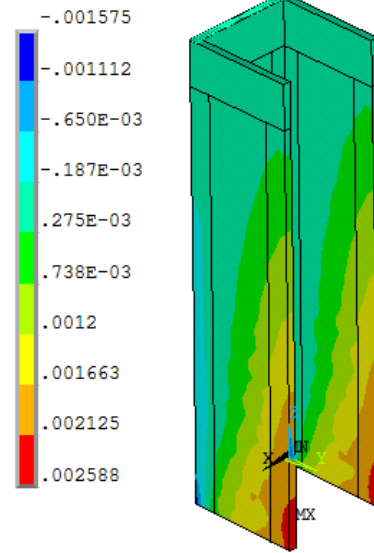
Şekil 4.32. Model 4 ve model 9 yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.32'de Model 4 ve Model 9'a ait yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Çizelge 3.5'de belirtildiği gibi Model 4 ve Model 9'daki yüklemeler tersinir olacak şekilde yapılmıştır. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlama önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki durumlarına karşılık gelmektedir.

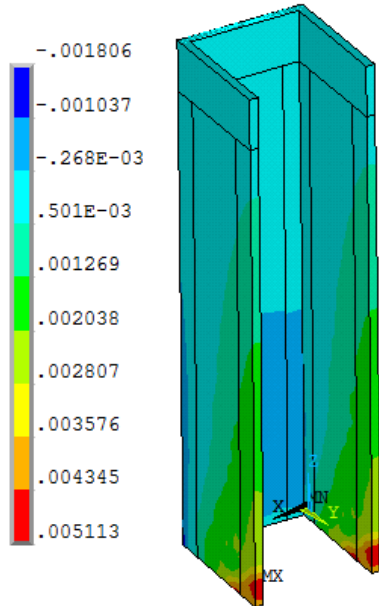
Şekil 4.33'de gösterildiği gibi Model 4 analizinde uygulanan kesme kuvveti $-y$ yönünde etki etmekte ve U kesitli perdenin flanş uçlarında çekme, gövde kısmında ise basınç etkileri meydana gelmektedir. Model 9 analizinde ise kesme kuvveti y yönünde etki etmekte ve flanş uçlarında basınç, gövde bölgesinde ise çekme etkileri oluşmaktadır (Şekil 4.34).

Çatlama

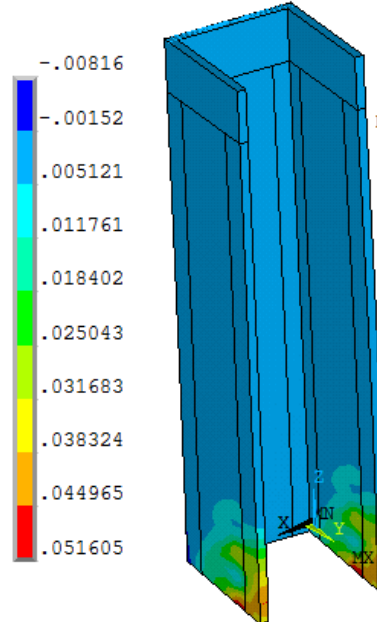
STEP=2
SUB =3
TIME=1.02
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =8.346
SMN =-.338E-03
SMX =.428E-03

Akma

STEP=2
SUB =24
TIME=1.16
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =65.726
SMN =-.001575
SMX =.002588

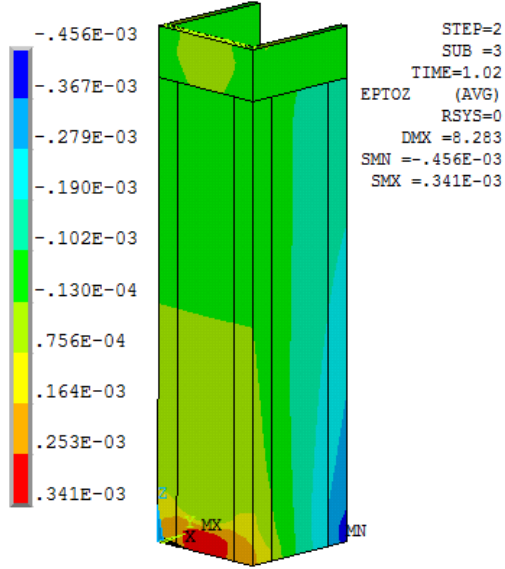
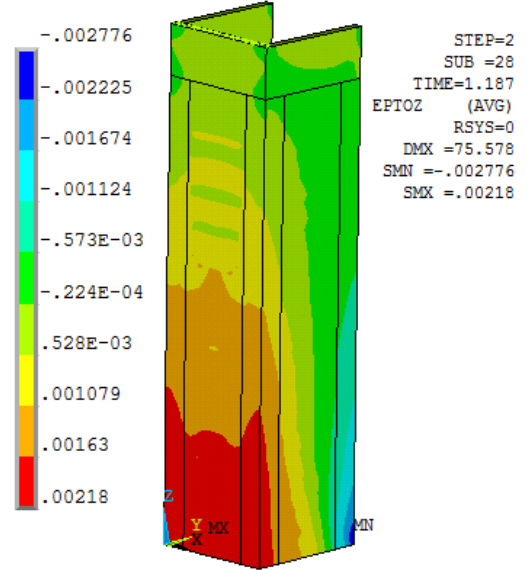
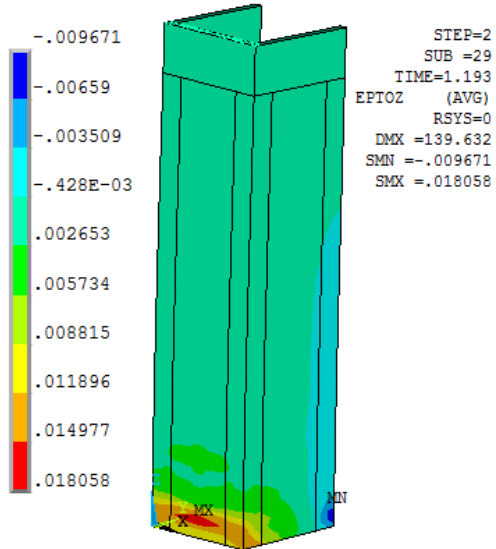
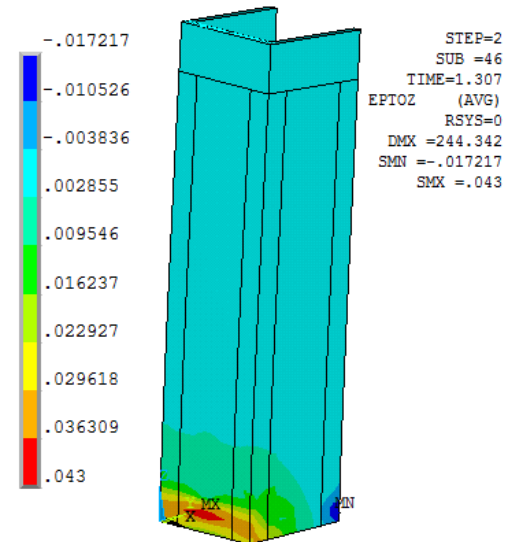
Ezilme

STEP=2
SUB =28
TIME=1.187
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =76.718
SMN =-.001806
SMX =.005113

Ezilme+

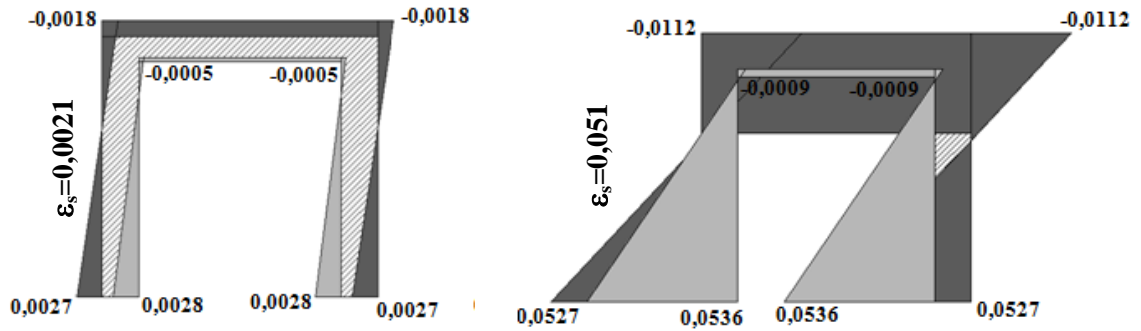
STEP=2
SUB =107
TIME=1.713
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =318.028
SMN =-.00816
SMX =.051605

Şekil 4.33. Birim şekil değiştirmeler (Model 4)

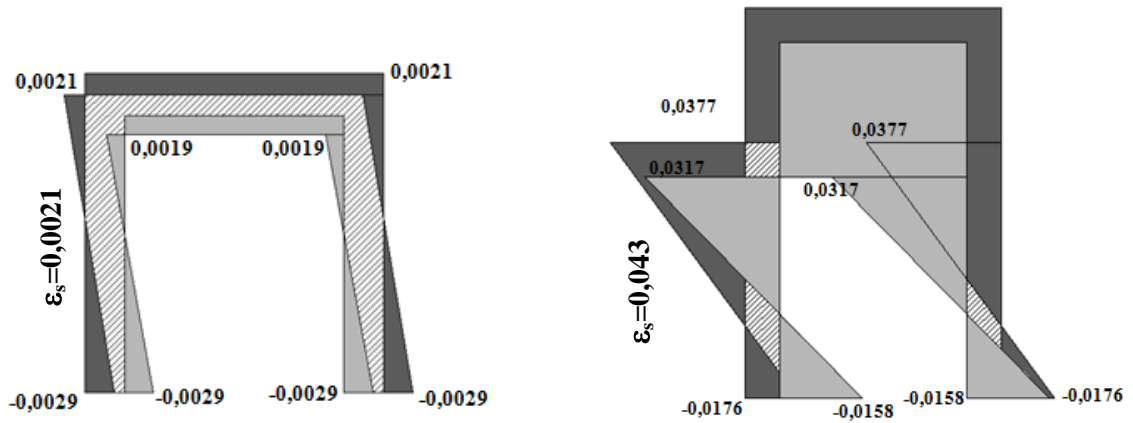
Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+**

Şekil 4.34. Birim şekil değiştirmeler (Model 9)

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir. Model 4 ve Model 9 analizlerinde kesme kuvveti U kesitli betonarme perdenin simetri eksenini üzerinden etkilediği için perdelerde burulma etkisi gözlemlenmemiştir. Kesitte sadece düz eğilme etkisi vardır.

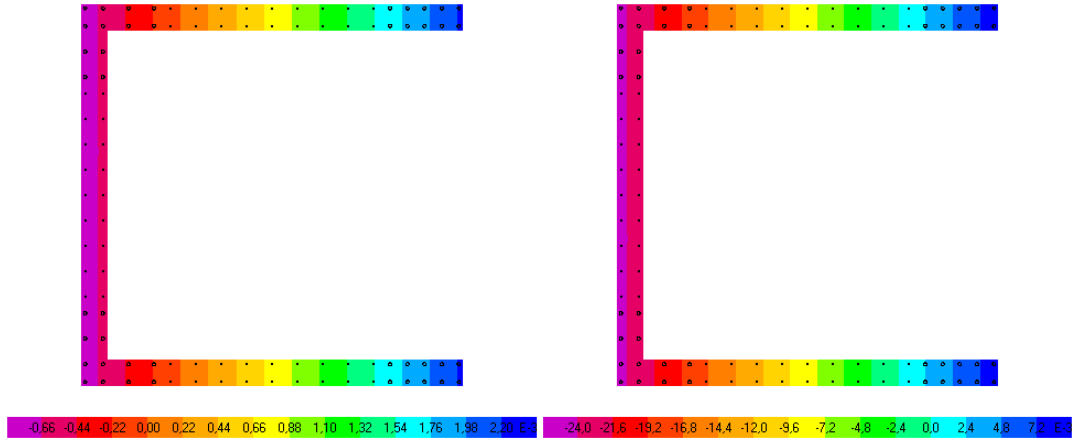


Şekil 4.35. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 4)

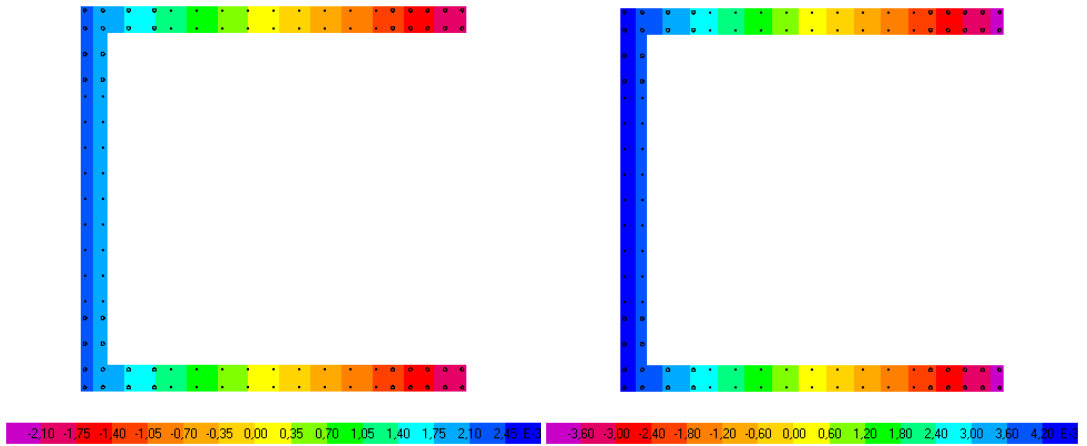


Şekil 4.36. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 9)

Perdenin SAP2000 programı kullanılarak yapılan kesit analizi sonucu elde edilen birim şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de gösterilmiştir. Perdede burulma etkisinin olmaması nedeniyle tarafsız eksenin yeri bellidir. Kesit analizinden elde edilen deformasyon şekilleri ile gerçek davranıştan elde edilen deformasyon şekilleri benzerlik göstermektedir.

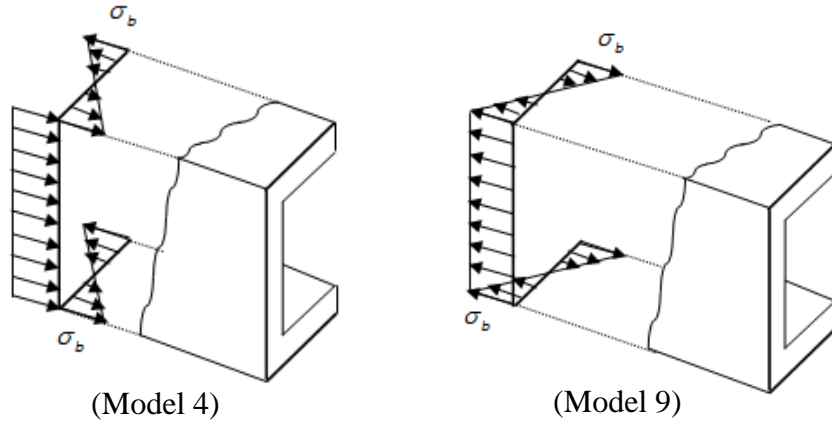


Şekil 4.37. Kesit analizi ile birim şekil değıştirme diyagramı (Model 4)



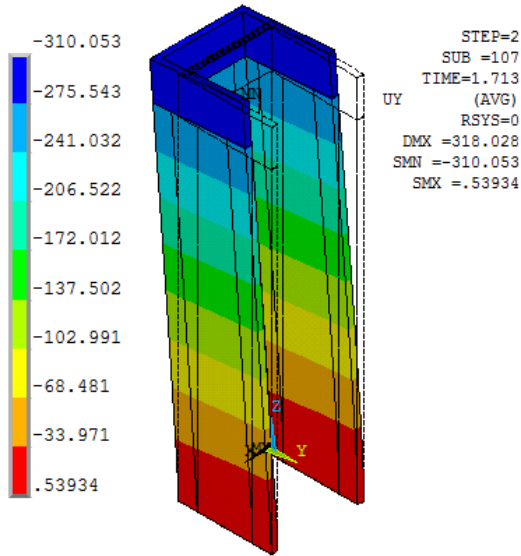
Şekil 4.38. Kesit analizi ile birim şekil değıştirme diyagramı (Model 9)

U kesitli betonarme perdenin simetri eksenini üzerinden uygulanan kesme kuvveti etkisinde perde üzerinde sadece eğilme momenti oluşmaktadır. Perde kesitinde eğilme etkisinin oluşturduğu normal gerilmeler Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Kesitte sadece eğilme momenti olduğundan Model 4 analizinde flanş uçlarında çekme birim şekil değıştirmeleri, gövde üzerinde basınç birim şekil değıştirmeleri oluşmakta, Model 9 analizinde ise tam tersi bir durum meydana gelmektedir.

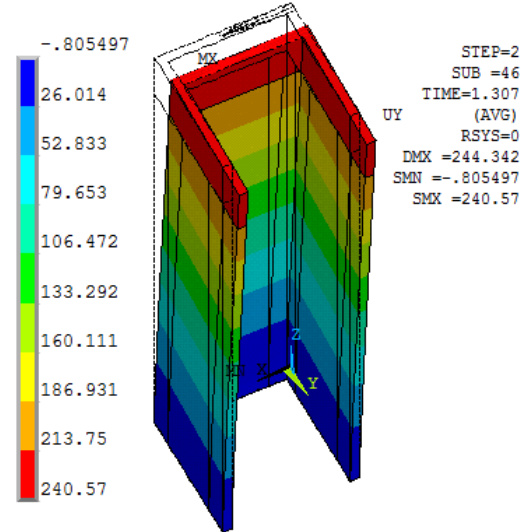


Şekil 4.39. Normal gerilme dağılımları (Model 4 ve Model 9)

Model 4



Model 9



Şekil 4.40. Y doğrultusunda deplasman ve deformasyon (Model 4 ve Model 9)

Model 4 ve Model 9'da U kesitli betonarme perdeye y doğrultusunda tersinir olarak kesme kuvveti uygulanmaktadır. Şekil 4.40'da görüldüğü gibi her iki analizde de perde kesitinde burulma etkileri oluşmamaktadır. Bu durumda hesaplanan burulma açısı değerleri de, çatlama, akma ve ezilme anlarında sıfır olmaktadır. Kesitlerde hesaplanan burulma açıları ile x, y ve z doğrultusundaki deplasman değerleri Çizelge 4.11'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.11. Model 4 ve Model 9'a ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)			Tür
				UX	UY	UZ	
1	0,00043	Çatlama	0	0,00	-8,12	-0,54	Model 4
2	0,0021	Akma	0	0,00	-64,10	5,22	
3	0,0038	Ezilme	0	0,00	-74,77	6,37	
4	0,04	Ezilme+	0	0,00	-343,49	32,64	
1	0,00034	Çatlama	0	0,00	7,86	-1,32	Model 9
2	0,0021	Akma	0	0,00	74,49	1,10	
3	0,0038	Ezilme	0	0,00	141,66	4,60	
4	0,04	Ezilme+	0	0,00	240,18	9,72	

U kesitli betonarme perde gövdesinin tam ortasından y doğrultusunda etkiyen kesme kuvveti sonucunda, perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.12'de, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.13'de gösterilmiştir. Perdelerin gövde ve flanş kısımlarının aldıkları kesme kuvvetlerinin pozitif yönleri ile bunlara ait mesafeler Şekil 3.8'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.12'e göre, U kesitli betonarme perdenin P3 ile gösterilen gövde bölgesi orta noktasından, y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir kısmı, aynı doğrultuda bulunan P1 ve P2 flanşları tarafından alınmaktadır.

Çizelge 4.12. Flanş ve gövdedeki toplam kesme kuvvetleri (Model 4 ve Model 9)

Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)			Tür
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
1	-15,74	15,74	0,0	237,41	237,41	53,77	179,76	179,76	5001,62	Model 4
2	-26,11	26,11	0,0	600,68	600,68	272,70	-2569,12	-2569,12	10499,39	
3	-29,71	29,71	0,0	622,95	622,95	299,48	-2846,65	-2846,65	11054,46	
4	-33,97	33,97	0,0	670,54	670,54	322,44	-4295,85	-4295,85	13952,84	
1	2,44	-2,44	0,0	-327,11	-327,11	-1,60	2884,25	2884,25	-407,10	Model 9
2	0,66	-0,66	0,0	-912,09	-912,09	-14,95	4760,59	4760,59	-4159,97	
3	-7,41	7,41	0,0	-1048,72	-1048,72	2,36	5053,25	5053,25	-4745,37	
4	-12,63	12,63	0,0	-1067,30	-1067,30	7,20	5138,44	5138,44	-4916,89	

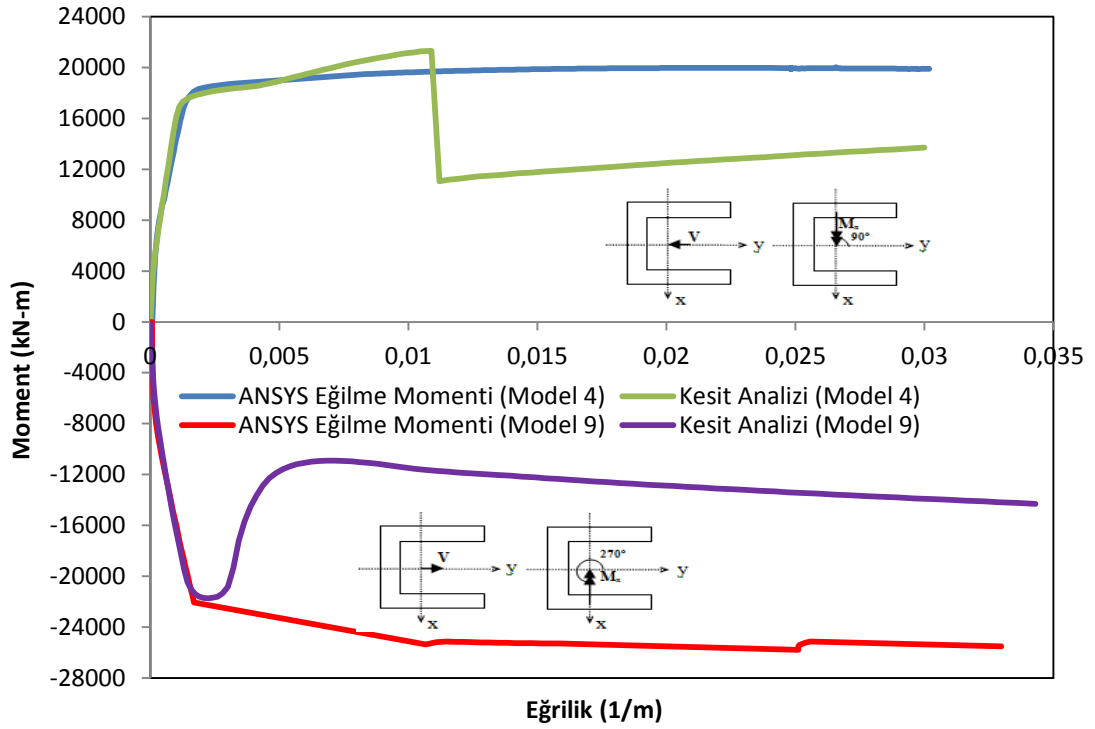
Kesme kuvveti perdenin simetri ekseninden uygulandığı için her iki flanşın taşıdığı kesme kuvvetleri ile bunların perde üzerindeki yerleri aynıdır.

Çizelge 4.13. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 4 ve Model 9)

Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)			Tür
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃	
1	0,528	0,528	0,000	0,093	0,093	1,500	-3,063	-3,063	0,095	Model 4
2	0,507	0,507	0,000	0,100	0,100	1,500	2,529	2,529	0,069	
3	0,448	0,448	0,000	0,104	0,104	1,500	2,445	2,445	0,067	
4	0,920	0,920	0,000	0,102	0,102	1,500	1,938	1,938	0,044	
1	0,160	0,160	0,000	0,099	0,099	1,500	2,377	2,377	0,106	Model 9
2	-13,536	-13,536	0,000	0,100	0,100	1,500	3,013	3,013	0,107	
3	1,488	1,488	0,000	0,101	0,101	1,500	3,191	3,191	0,114	
4	1,302	1,302	0,000	0,103	0,103	1,500	3,235	3,235	0,118	

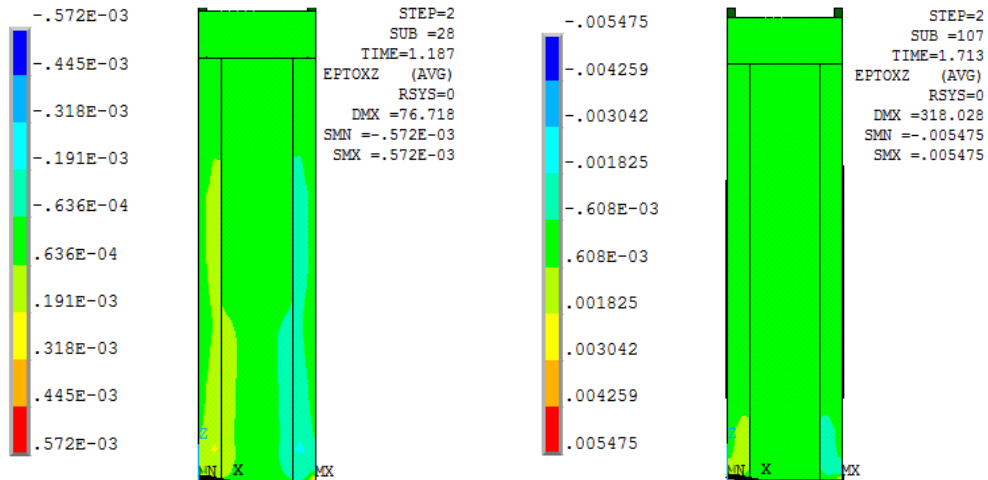
U kesitli betonarme perdenin y doğrultusunda uygulanan kesme kuvveti etkisindeki moment-eğrilik ilişkisi Şekil 4.41’de gösterilmektedir. ANSYS’de yapılan nonlineer analizlerde Model 4 için perdenin maksimum taşıma gücü $M_{\max} = 20000 \text{ kN-m}$, Model 9 için ise maksimum taşıma gücü $M_{\max} = 25000 \text{ kN-m}$ dir. Model 4’de çelik donatının akması anındaki eğrilik $K_{akma} = 0,00117/m$, betonun göçmesi durumundaki eğrilik $K_{göçme} = 0,021/m$ olarak belirlenmiştir. Model 9’da ise çelik donatının akması anında eğrilik $K_{akma} = 0,00168/m$, betonun göçmesi durumundaki eğrilik $K_{göçme} = 0,014/m$ olarak belirlenmiştir.

Perdelerin SAP2000’de yapılan kesit analizlerinden elde edilen moment-eğrilik grafikleri gerçek davranışa yakın sonuçlar vermiştir. Model 4 için kesit analizinden elde edilen maksimum moment taşıma kapasitesi $M_{\max} = 21000 \text{ kN-m}$ iken Model 9 için kesit analizinden elde edilen maksimum moment taşıma kapasitesi $M_{\max} = 22300 \text{ kN-m}$ olarak belirlenmiştir.

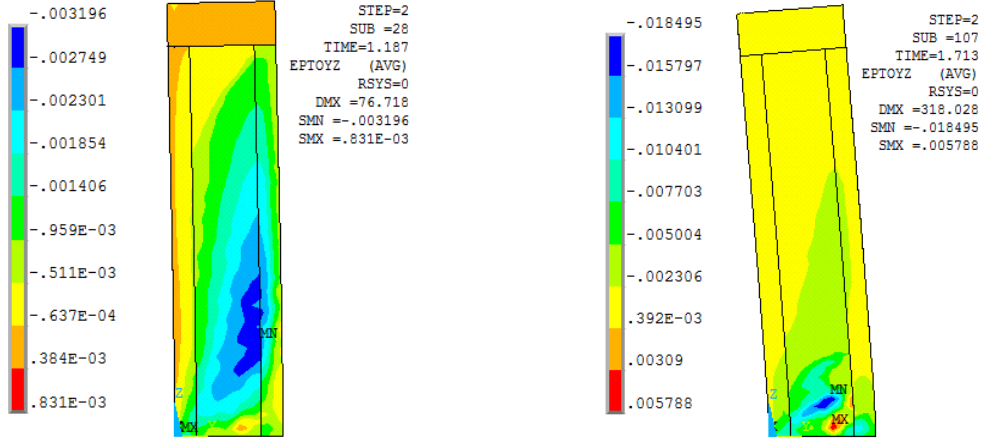


Şekil 4.41. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 4 ve Model 9)

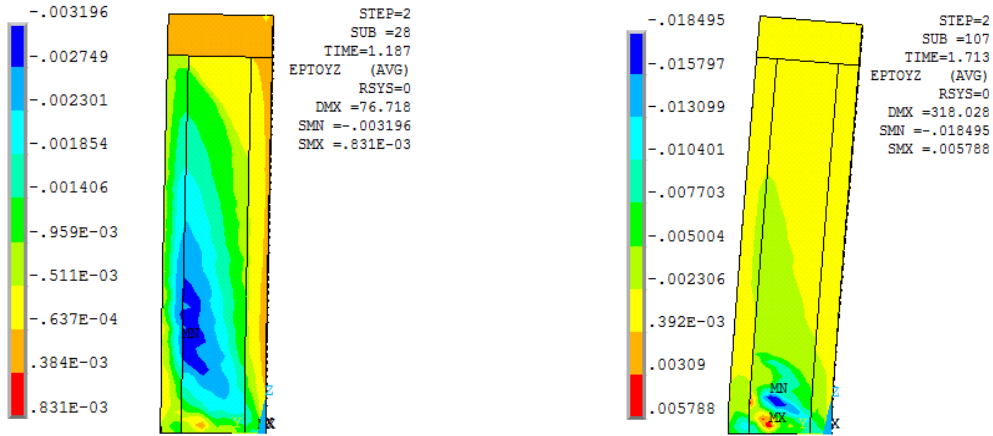
Perdeye etkiyen kesme kuvveti altında flanş ve gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları Model 4 ve Model 9 için sırasıyla Şekil 4.42, Şekil 4.43 ve Şekil 4.44 ile Şekil 4.45, Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de gösterilmiştir.



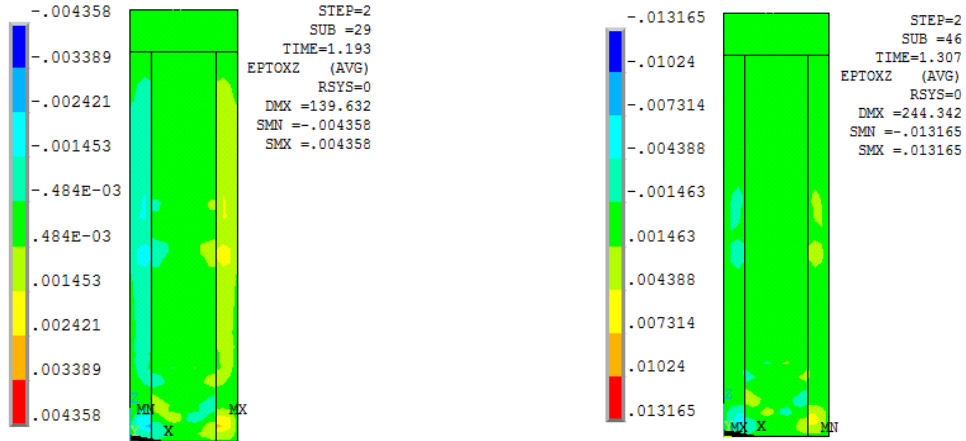
Şekil 4.42. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 4)



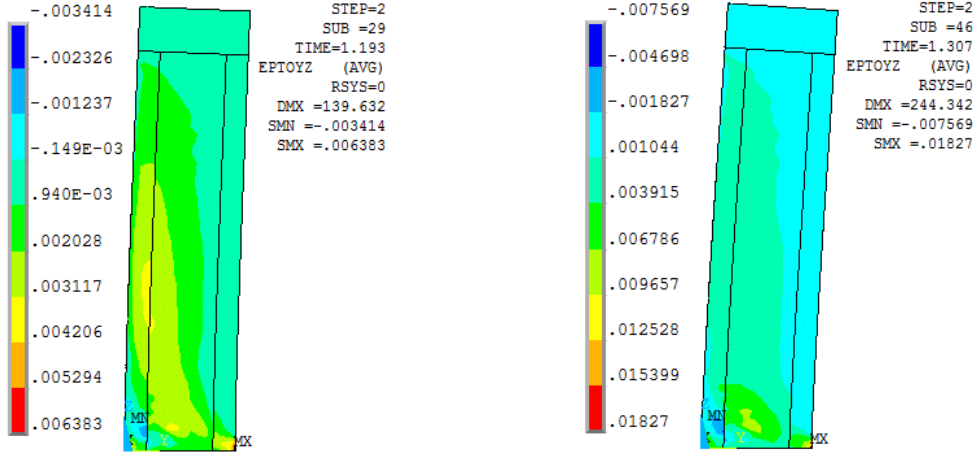
Şekil 4.43. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 4)



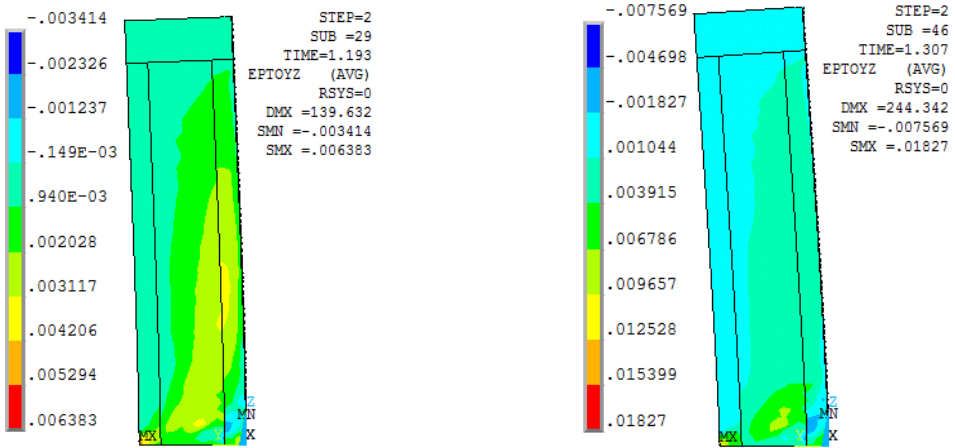
Şekil 4.44. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 4)



Şekil 4.45. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 9)

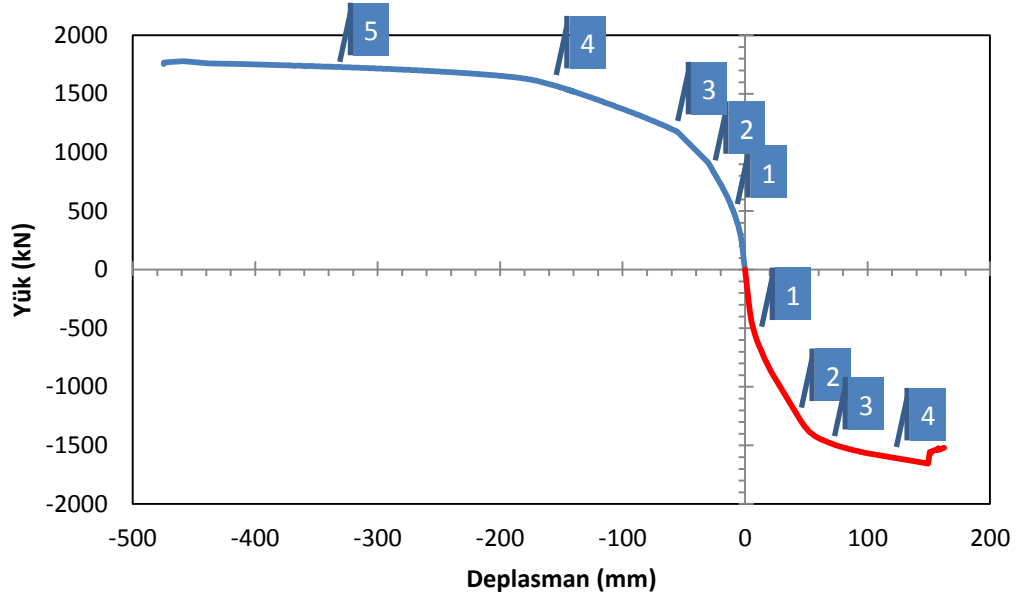


Şekil 4.46. P1 Flaşında oluşan kayma deformasyonları (Model 9)



Şekil 4.47. P2 Flaşında oluşan kayma deformasyonları (Model 9)

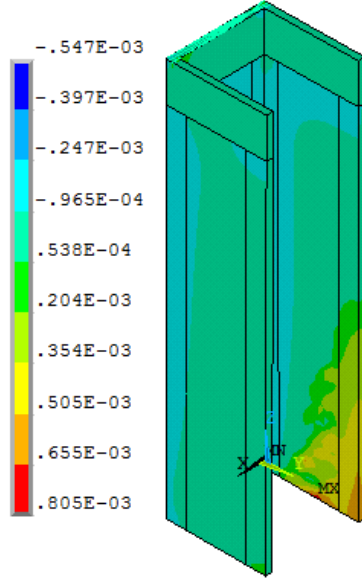
4.1.5. Model 5 ve Model 10 yük-deplasman ilişkileri



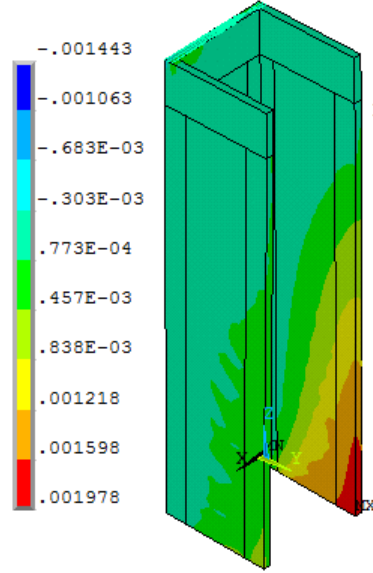
Şekil 4.48. Model 5 ve Model 10 yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.48'de Model 5 ve Model 10'a ait yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Çizelge 3.5'de belirtildiği gibi, Model 5 ve Model 10'daki yüklemeler tersinir olacak şekilde yapılmış ve kesitte burulma etkisi oluşması için kesme kuvveti perdenin ağırlık merkezinden 1 m yukarıdan uygulanmıştır. Eğrilerin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlamların önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ve 5 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki durumlarına karşılık gelmektedir

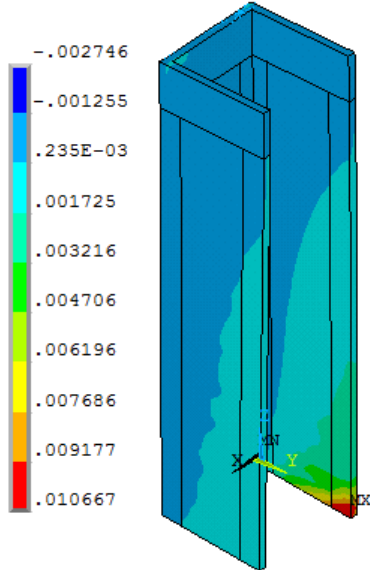
Model 5 analizinde kesme kuvveti -y yönünde uygulanmış ve Şekil 4.49'da çatlama, akma ve ezilme durumlarında kesitte meydana gelen deformasyon şekilleri gösterilmiştir. U kesitli betonarme perdede -y yönündeki kesme kuvveti etkisinde P2 flanşının uç kısmında yoğun olmak üzere çekme etkileri oluşmaktadır.

Çatlama

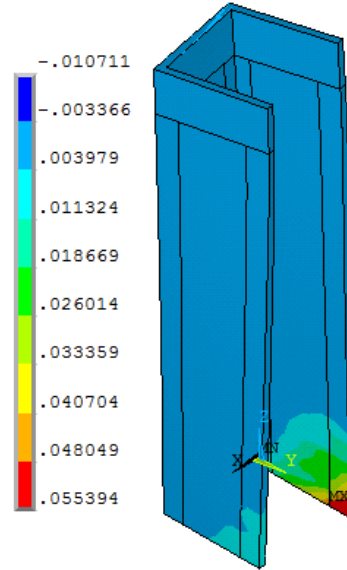
STEP=2
SUB =9
TIME=1.06
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =19.187
SMN =-.547E-03
SMX =.805E-03

Akma

STEP=2
SUB =32
TIME=1.213
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =63.239
SMN =-.001443
SMX =.001978

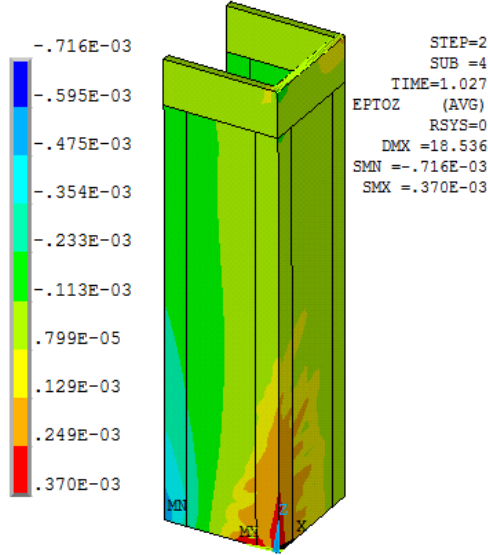
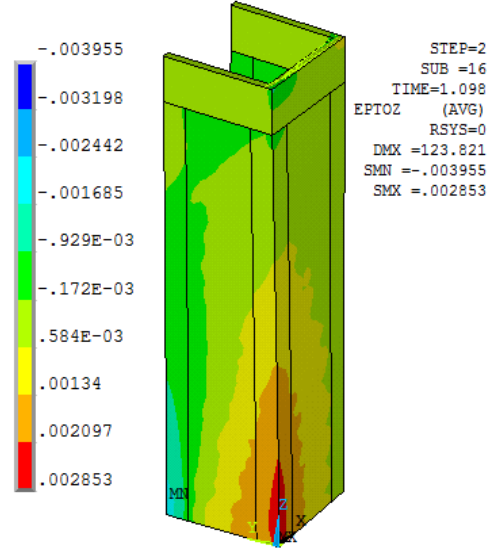
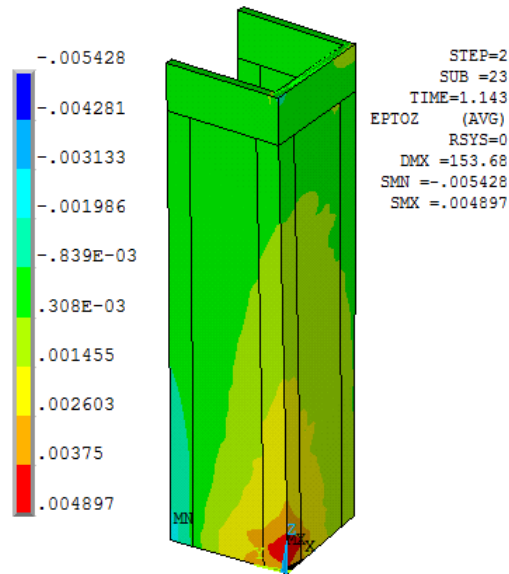
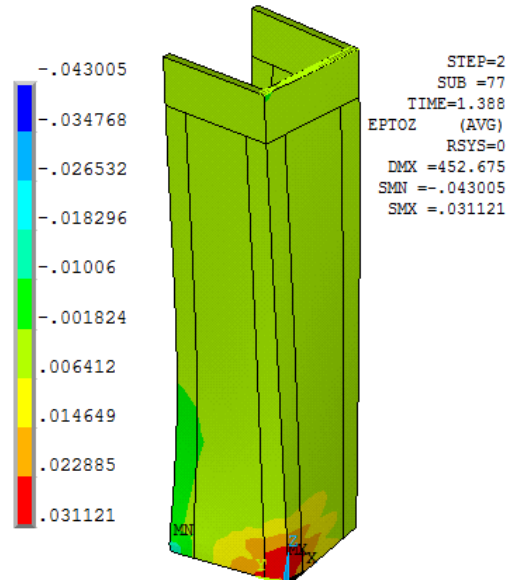
Ezilme

STEP=2
SUB =33
TIME=1.22
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =110.995
SMN =-.002746
SMX =.010667

Ezilme+

STEP=3
SUB =38
TIME=2.253
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =358.144
SMN =-.010711
SMX =.055394

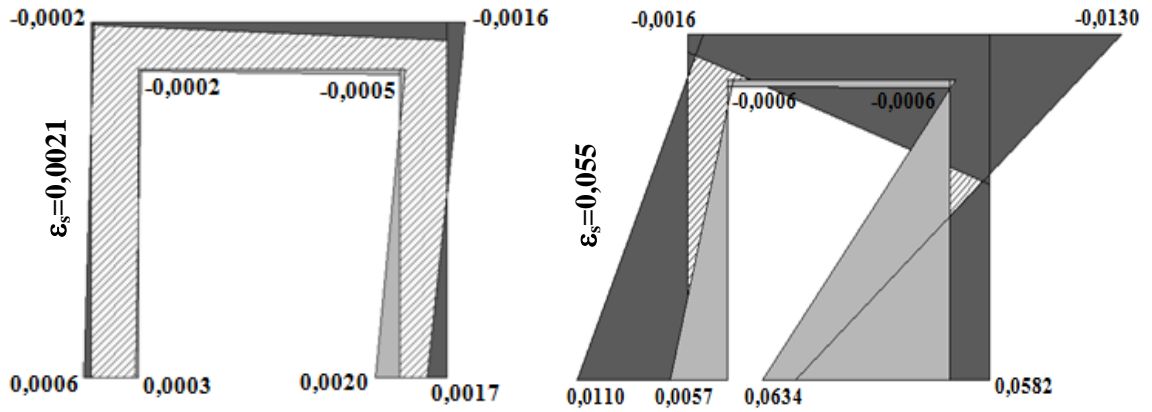
Şekil 4.49. Birim şekil değiştirmeler (Model 5)

Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+**

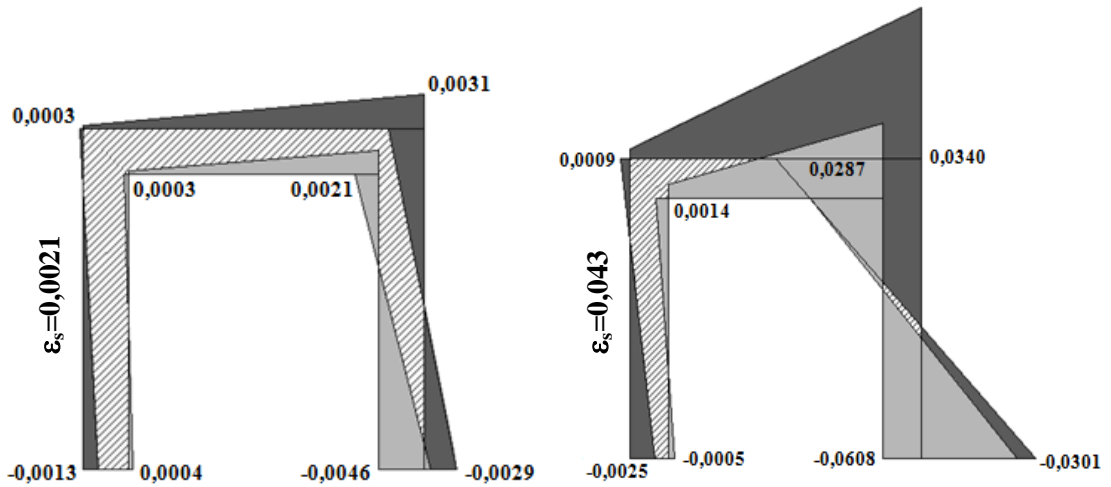
Şekil 4.50. Birim şekil değiştirmeler (Model 10)

Model 10 analizinde ise kesme kuvveti y yönünde uygulanmış ve Şekil 4.50’de çatlama, akma ve ezilme durumlarında kesitte meydana gelen deformasyon şekilleri gösterilmiştir. Kesme kuvvetinin y yönünde uygulanması halinde P2 flanşı ile gövde birleşim noktasında çekme etkileri oluşmakta, burulma momentinin etkisi ile çekme etkisi daha da artmaktadır.

Şekil 4.51 ve Şekil 4.52’de ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir.



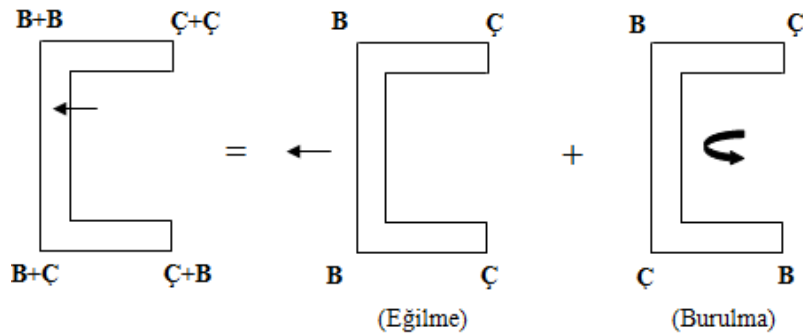
Şekil 4.51. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 5)



Şekil 4.52. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 10)

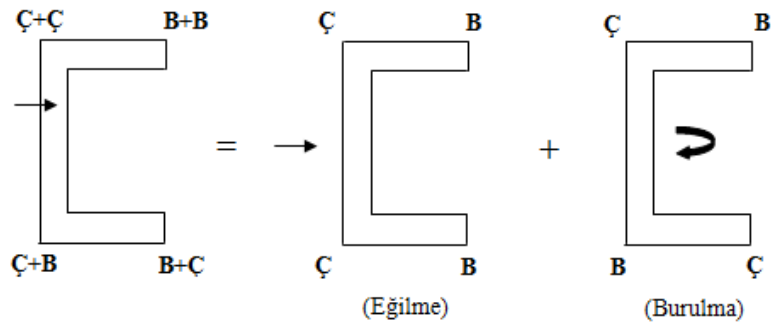
Birim şekil değiştirme diyagramlarında görüldüğü gibi $-y$ yönünde uygulanan kesme kuvveti etkisinde perdede hem eğilme hem de burulma etkisi meydana gelmektedir. P2 flanşının uç kısmında en büyük çekme ve basınç birim şekil değiştirmeleri oluşmaktadır. Perdeye etki eden kesme kuvvetinin yönünün değişmesi halinde yine en büyük çekme ve basınç birim şekil değiştirmeleri P2 flanşının uç kısmında meydana gelmekte fakat çekme olan yerde basınç, basınç olan yerde çekme oluşmaktadır.

U kesitli perdenin simetri ekseninin 1 m dışından $-y$ ve y yönünde uygulanan kesme kuvveti, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma ve eğilme etkisi Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'deki gibi gösterilebilir.



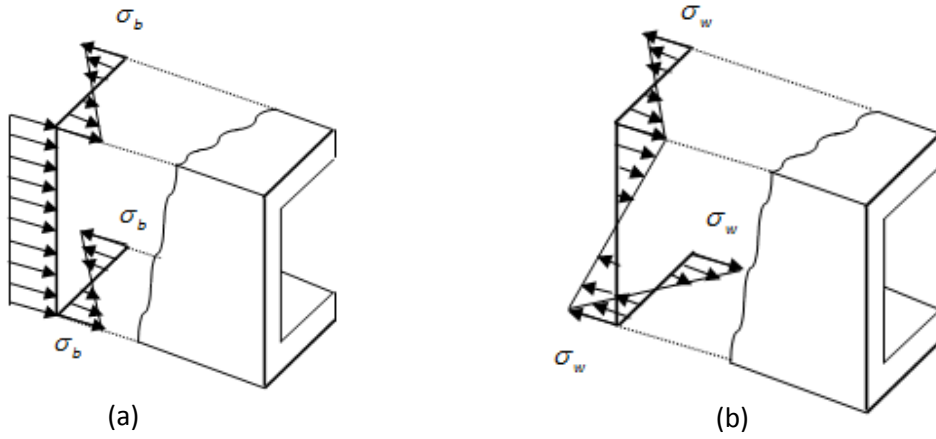
Şekil 4.53. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 5)

Eğilme momentinden dolayı perdede oluşan çekme ve basınç etkilerine ek olarak burulma momentinin oluşturduğu etkinin gelmesiyle perde üzerinde Şekil 4.53 ve Şekil 4.54'de gösterilen bölgelerde çekme ve basınç yığılmaları oluşmaktadır.



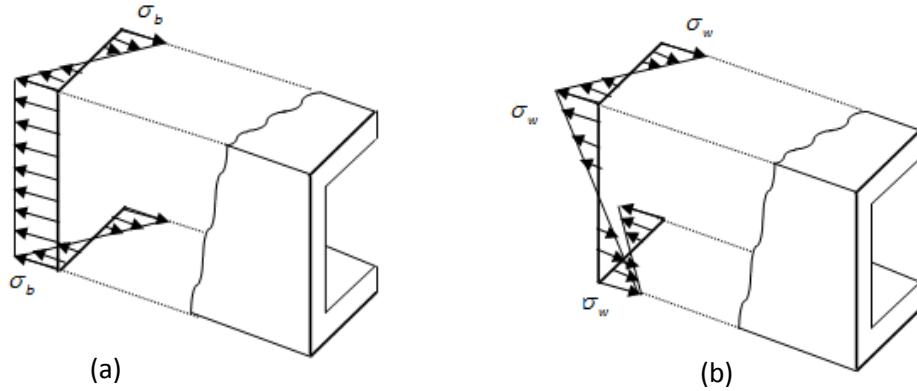
Şekil 4.54. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 10)

Eğilme momentinin etkisinde tarafsız eksenin yeri belli iken burulma etkisinin oluşması ile tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle deformasyon şekilleri kesit analizi yapılarak açıklanamamıştır. Eğilme ve burulma momentinin oluşturduğu normal gerilmelerin dağılımı Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da gösterilmiştir.



Şekil 4.55. Normal gerilme dağılımları (Model 5)

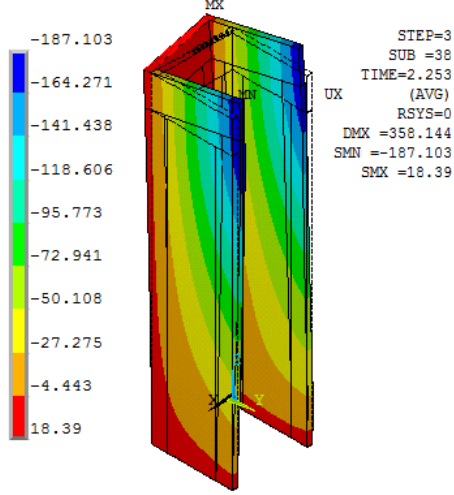
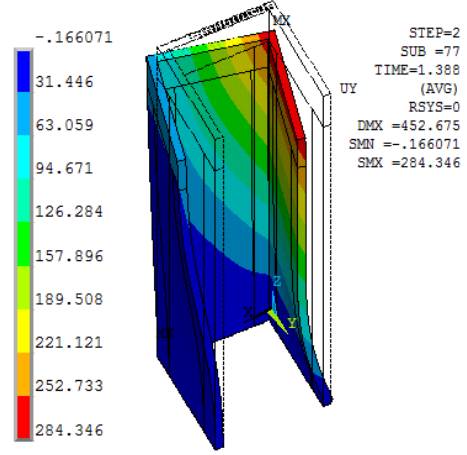
(a) Eğilme Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler (b) Burulma Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler



Şekil 4.56. Normal gerilme dağılımları (Model 10)

(a) Eğilme Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler (b) Burulma Etkisi ile Oluşan Normal Gerilmeler

Model 5 ve Model 10 analizlerinde kesitte oluşan burulma etkileri ve kesitlerin deformasyona uğramamış durumları Şekil 4.57'de gösterilmiştir.

Model 5**Model 10****Şekil 4.57.** Y doğrultusundaki deplasman ve deformasyon (Model 5 ve Model 10)

Çizelge 4.14’de görüldüğü gibi U kesitli betonarme perdede y doğrultusunda etkiyen kesme kuvveti etkisinde perdenin x,y ve z doğrultularındaki deplasman değerleri ile burulma açıları; çatlama, akma ve ezilme anlarında gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Model 5 ve Model 10’a ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	UX	UY	UZ	Tür
1	0,00080	Çatlama	0,224	-7,55	-8,21	-0,47	Model 5
2	0,0021	Akma	0,735	-20,42	-30,02	1,63	
3	0,0038	Ezilme	1,253	-33,22	-55,77	4,23	
4	0,04	Ezilme+	3,950	-84,32	-195,97	18,36	
1	0,0004	Çatlama	0,199	8,85	7,05	-1,23	Model 10
2	0,0021	Akma	1,304	62,56	49,17	0,05	
3	0,0038	Ezilme	1,600	79,69	60,88	0,57	
4	0,03	Ezilme+	4,518	239,24	161,55	0,56	

U kesitli betonarme perdeye y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin perdenin flanş ve gövde kısımları tarafından karşılanan değerleri Çizelge 4.15’de, bunların perde üzerindeki yerleri Çizelge 4.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Flanş ve gövdedeki toplam kesme kuvvetleri (Model 5 ve Model 10)

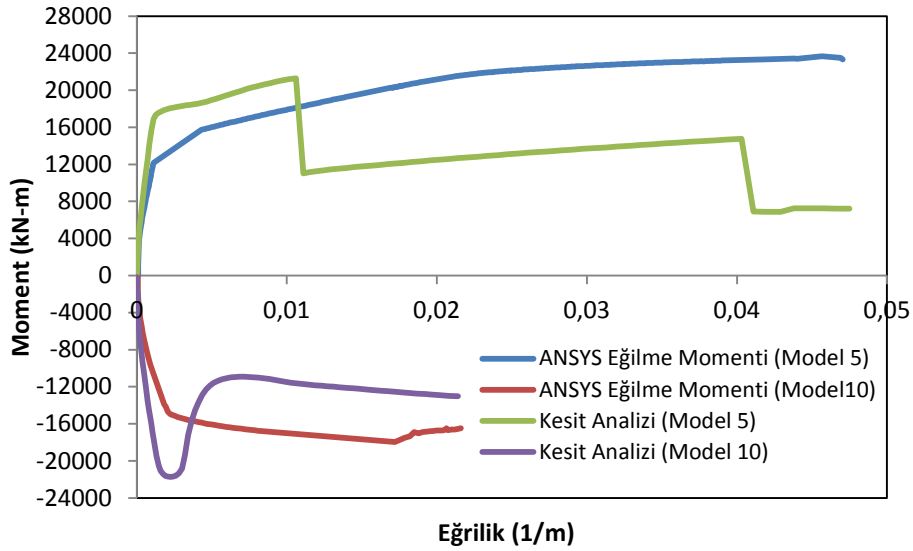
Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)			Tür
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
1	7,98	30,39	-38,37	70,83	338,40	50,78	909,00	-243,70	4695,89	Model 5
2	15,24	38,77	-54,01	117,99	647,88	147,22	-124,63	-1831,44	7317,21	
3	8,97	69,04	-78,01	155,44	858,88	165,99	-840,42	-2847,59	9049,16	
4	41,17	103,9	-145,10	227,99	1084,56	294,64	-2662,83	-4156,37	12180,02	
5	51,92	147,8	-199,76	253,95	1206,04	294,23	-4250,59	-4870,33	14482,06	
1	-15,04	-4,29	19,33	-91,86	-419,18	-3,54	2371,57	2902,69	86,90	Model 10
2	-9,58	4,47	5,12	-242,88	-1103,82	4,30	3247,85	4682,38	-2569,09	
3	-16,51	9,59	6,92	-261,92	-1186,66	6,01	3461,60	4836,27	-2936,72	
4	-18,86	92,92	-74,06	-231,50	-1405,44	23,75	4427,22	4825,72	-3891,78	

Çizelge 4.15'e göre y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin büyük bir bölümü, aynı doğrultuda yer alan P1 ve P2 flanşları tarafından karşılanmaktadır. Ancak kesitte oluşan burulma etkisi Model 5'de P1 in taşıdığı kesme kuvveti etkisini azaltıp, bu etkinin bir kısmını perdenin P3 ile gösterilen gövdesine vermektedir. Model 10'da ise y yönünde uygulanan kesme kuvvetinin oluşturduğu burulma etkisi, gövdenin taşıdığı kesme kuvvetini azaltıp, P1 flanşının taşıdığı kesme kuvvetini arttırmaktadır.

Çizelge 4.16. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 5 ve Model 10)

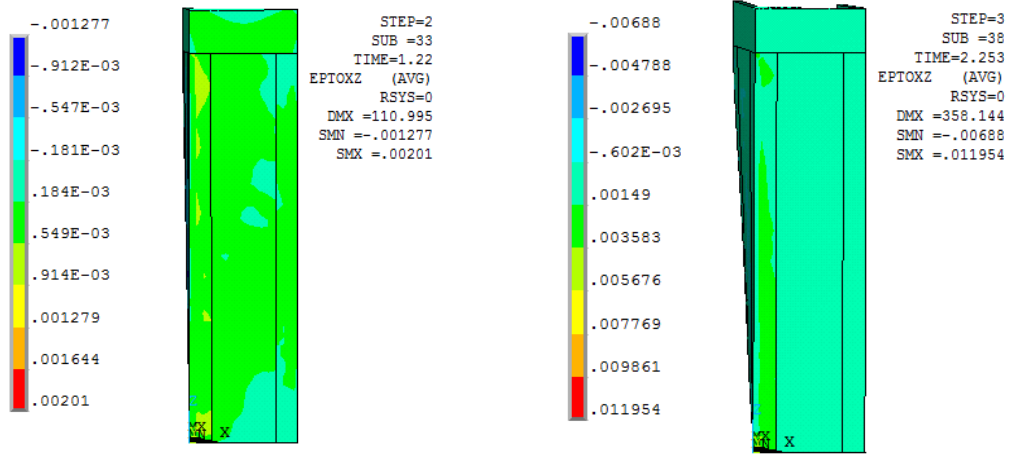
Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)			Tür
	y1	y2	y3	x1	x2	x3	y11	y22	y33	
1	4,230	0,589	0,022	0,074	0,114	0,928	1,186	5,443	0,094	Model 5
2	1,416	0,733	-0,096	0,038	0,114	0,802	7,795	2,712	0,079	
3	0,561	0,656	-0,104	0,022	0,121	0,825	2,732	2,490	0,076	
4	2,071	0,859	-0,095	0,050	0,135	0,967	2,553	2,017	0,062	
5	2,141	0,758	-0,005	0,082	0,148	1,150	2,075	1,937	0,055	
1	1,969	4,858	0,099	0,094	0,106	0,768	1,889	2,574	0,201	Model 10
2	7,013	-2,834	1,083	0,064	0,109	1,548	2,446	3,092	0,109	
3	4,515	0,134	1,303	0,061	0,109	1,548	2,459	3,148	0,109	
4	-1,015	2,195	-0,043	0,088	0,087	0,986	2,452	3,224	0,112	

U kesitli betonarme perdenin uygulanan kesme kuvveti etkisindeki moment-eğrilik ilişkisi Şekil 4.58’de gösterilmektedir. Model 5’de perdenin maksimum taşıma gücü $M_{\max} = 23600 \text{ kN-m}$, Model 10’da ise maksimum taşıma gücü $M_{\max} = 17950 \text{ kN-m}$ dir. Model 5’de çelik donatının akması anındaki eğrilik $\kappa_{akma} = 0,0024 / m$, betonun göçmesi durumundaki eğrilik $\kappa_{göçme} = 0,026 / m$ olarak belirlenmiştir. Model 10’da ise çelik donatının akması anında eğrilik $\kappa_{akma} = 0,0015 / m$, betonun göçmesi durumundaki eğrilik $\kappa_{göçme} = 0,012 / m$ olarak belirlenmiştir.

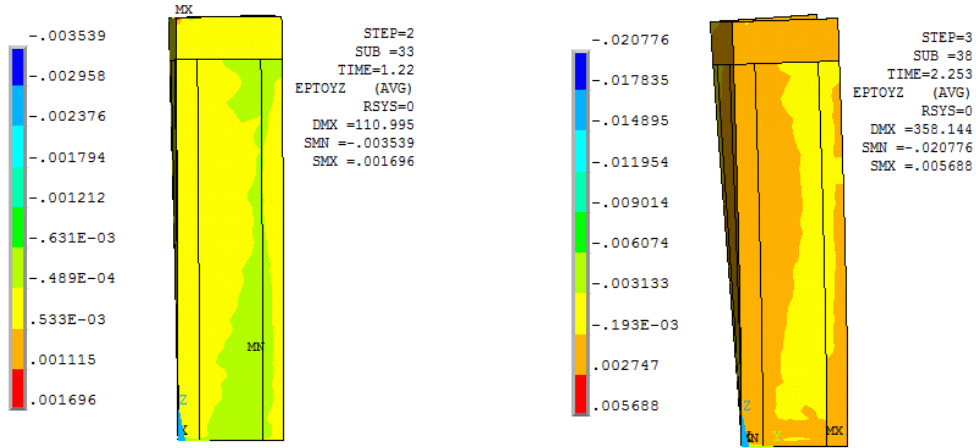


Şekil 4.58. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 5 ve Model 10)

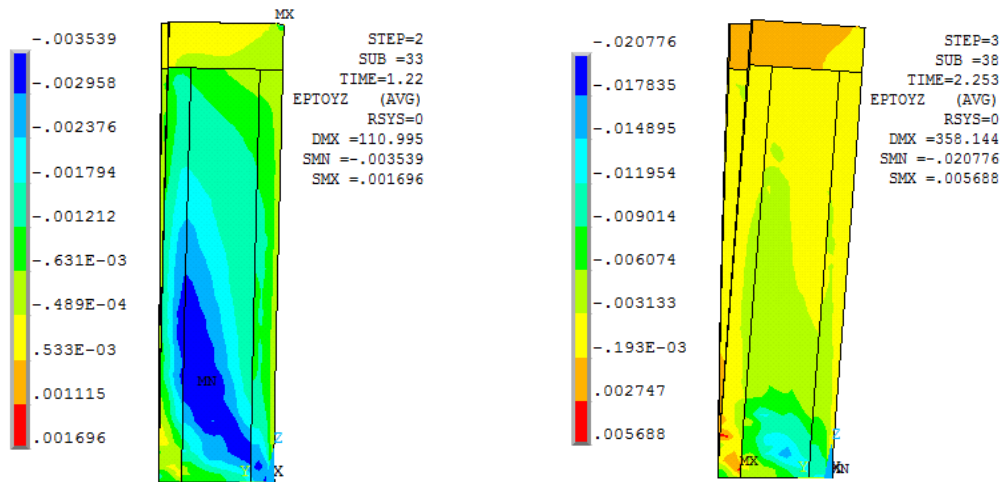
Şekil 4.58’ye bakıldığında, Model 5 analizinde U kesitli perdenin daha sünek davranış sergilediği belirlenmiştir. Bu haliyle Model 10 analizinde perdenin gevrek davranış gösterdiği söylenebilir. U kesitli perdeye etki eden kesme kuvvetinin -y yönünde uygulanması halinde perdenin moment taşıma kapasitesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Perdeye etkiyen kesme kuvveti altında flanş ve gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları Model 5 ve Model 10 için sırasıyla Şekil 4.59, Şekil 4.60 ve Şekil 4.61 ile Şekil 4.62, Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’de gösterilmiştir.



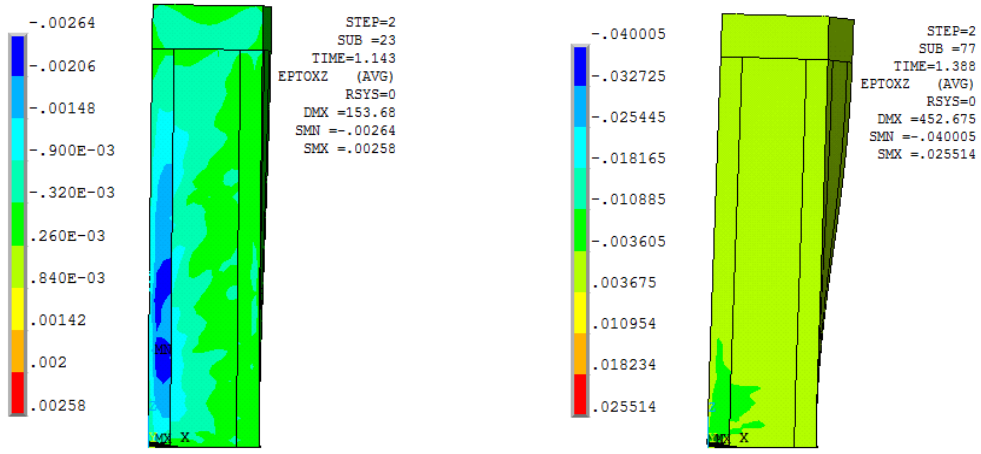
Şekil 4.59. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 5)



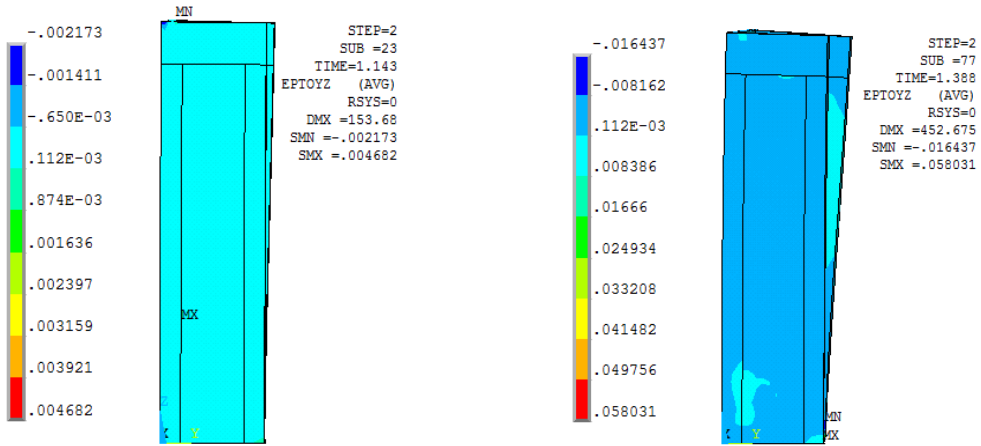
Şekil 4.60. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 5)



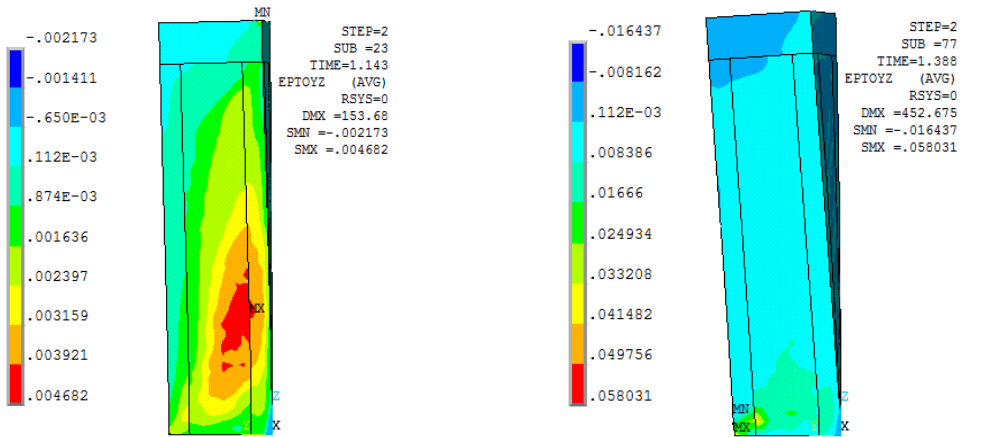
Şekil 4.61. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 5)



Şekil 4.62. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 10)

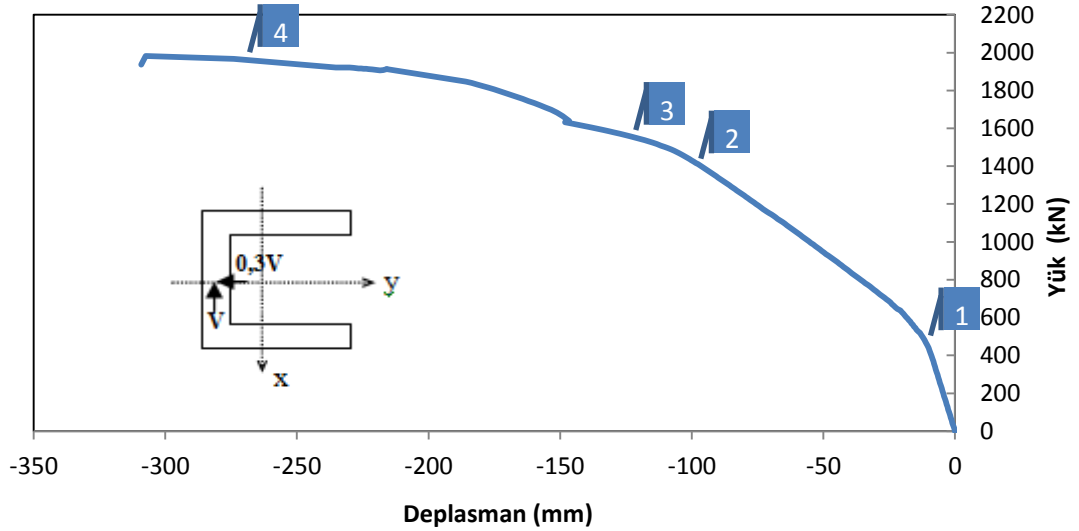


Şekil 4.63. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 10)



Şekil 4.64. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 10)

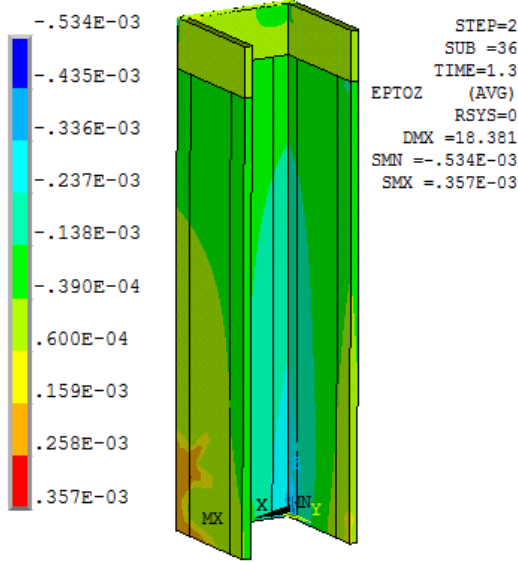
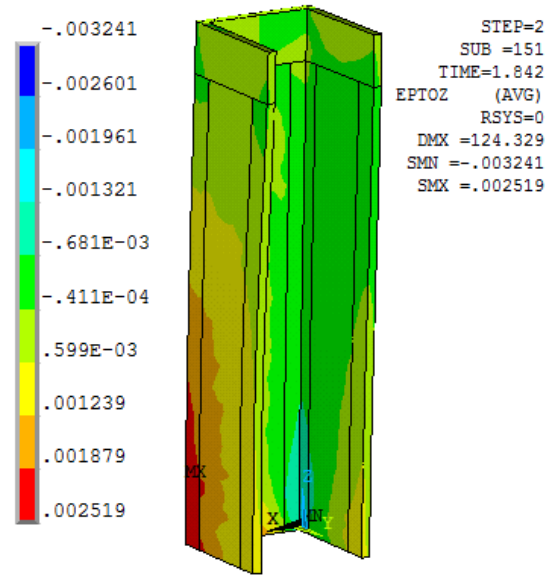
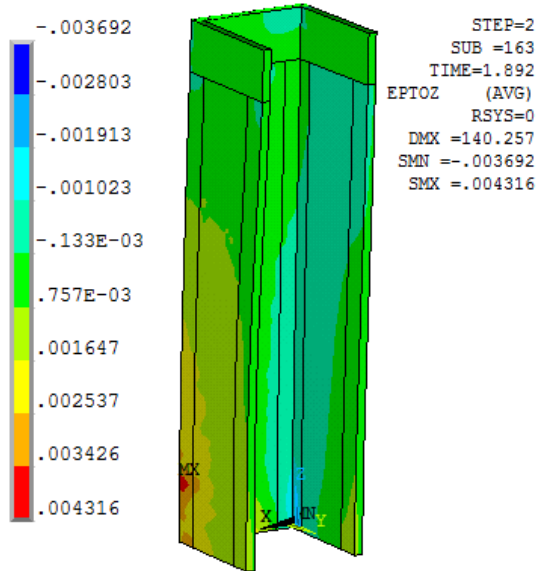
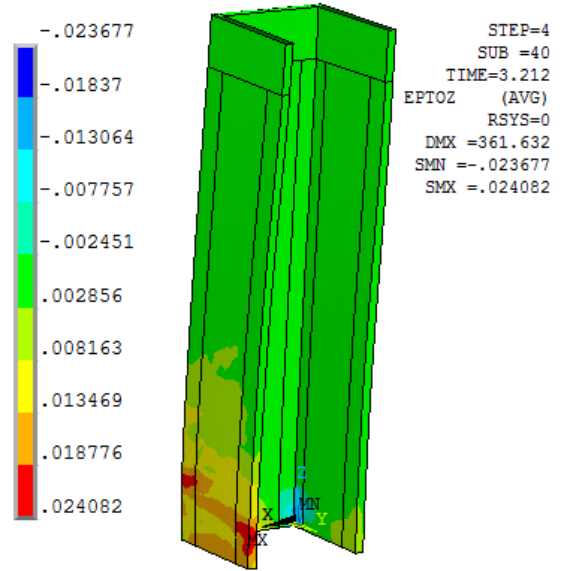
4.1.6. Model 3 yük-deplasman ilişkisi



Şekil 4.65. Model 3 yük-deplasman eğrisi

Şekil 4.65'de Model 3'e ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Model 3 analizinde Çizelge 3.5'de görüldüğü gibi perdeye hem x doğrultusunda hem de y doğrultusunda kesme kuvvetleri uygulanmıştır. Bu nedenle perde kesitinde hem eğik eğilme durumu hem de burulma etkisi söz konusudur. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlama önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki duruma karşılık gelmektedir.

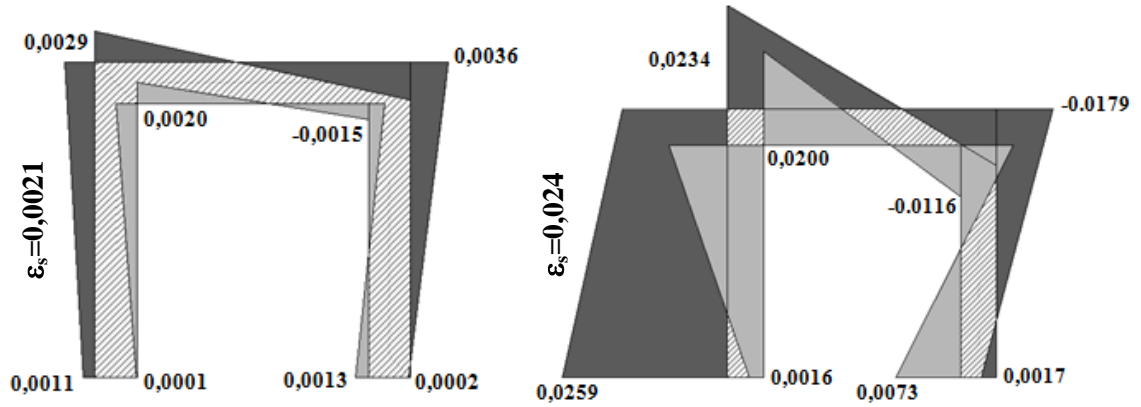
Şekil 4.66'da U kesitli betonarme perdede x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetleri etkisi altında oluşan deformasyon şekilleri çatlama, akma ve ezilme durumları için ayrı ayrı gösterilmiştir.

Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+**

Şekil 4.66. Birim şekil değiştirmeler (Model 3)

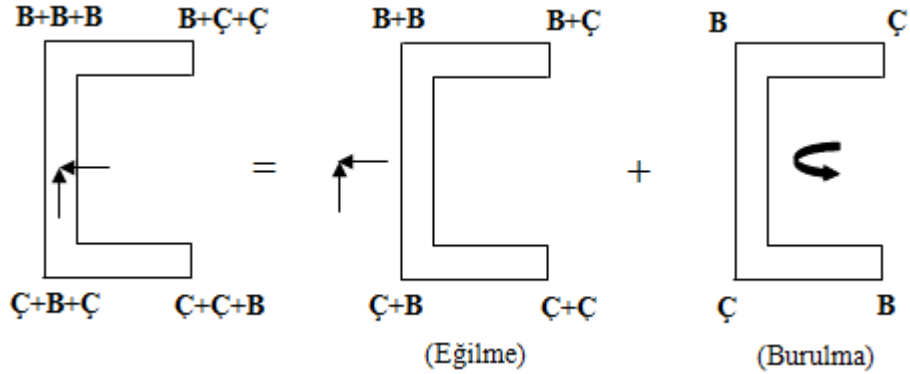
U kesitli betonarme perdede hem x hem de y doğrultusundaki kesme kuvveti etkisi altında P1 flanşı ile P2 flanşı uç bölgesinde yoğun olmak üzere çekme etkileri oluşurken, P2 flanşının gövde ile birleştiği bölgede basınç etkileri meydana gelmektedir.

Şekil 4.67’de ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir. Birim şekil değiştirme diyagramlarında da görüldüğü gibi perdenin P1 flanşında maksimum çekme birim şekil değiştirmeleri görülürken, P2 flanşının gövde ile birleştiği bölgede maksimum basınç birim şekil değiştirmeleri görülmektedir.



Şekil 4.67. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 3)

U kesitli perdenin P3 ile belirtilen gövdesinin ortasından hem x hem de y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma ve eğilme etkisi Şekil 4.68’deki gibi gösterilebilir. Uygulanan kesme kuvvetleri x ve y yönünde eğilme oluşturduklarından eğik eğilme durumuna ek olarak burulma etkisi de meydana gelmektedir. Şekil 4.68’deki durum perdede oluşan etkileri açıkça göstermekte ve birim şekil değiştirme diyagramlarını da doğrulamaktadır.



Şekil 4.68. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 3)

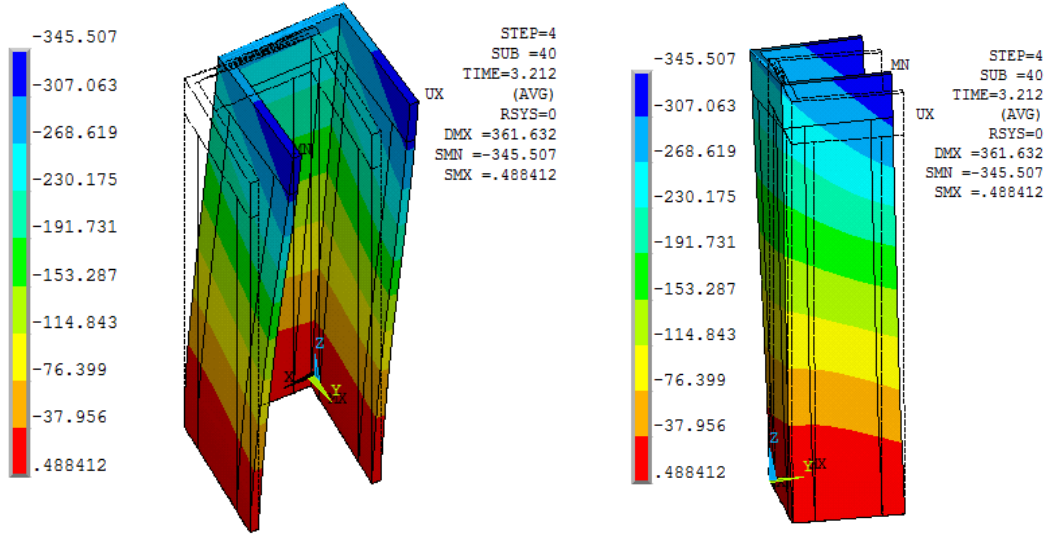
ANSYS ile yapılan nonlineer analizlerde gösterilen deformasyon durumunu kesit analizi yaparak belirlemek mümkün olmamaktadır. Model 3 analizinde hem eğik eğilme hem de burulma etkisi olduğundan tarafsız eksenin yerini belirlemek mümkün olmamıştır.

Model 3 analizi sonucunda U kesitli betonarme perdenin x,y ve z yönlerindeki deplasman değerleri ile burulma açıları sırasıyla çatlama, akma ve ezilme anlarında hesaplanmış ve Çizelge 4.17’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Model 3’e ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)		
				UX	UY	UZ
1	0,00036	Çatlama	0,185	-12,86	-1,53	-0,91
2	0,0021	Akma	0,880	-100,08	-4,63	2,61
3	0,0038	Ezilme	1,015	-116,27	-3,50	3,28
4	0,025	Ezilme+	2,111	-273,98	-55,66	14,76

Şekil 4.69 incelendiğinde x doğrultusunda uygulanan kesme kuvveti sonucu U kesitli perdede oluşacak burulma etkisinin bir kısmı y doğrultusunda uygulanan kesme kuvveti tarafından azaltılmaktadır.



Şekil 4.69. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 3)

U kesitli betonarme perdeye x ve y doğrultusunda etkiyen kesme kuvvetleri sonucunda perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.18’de, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.19’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.18. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 3)

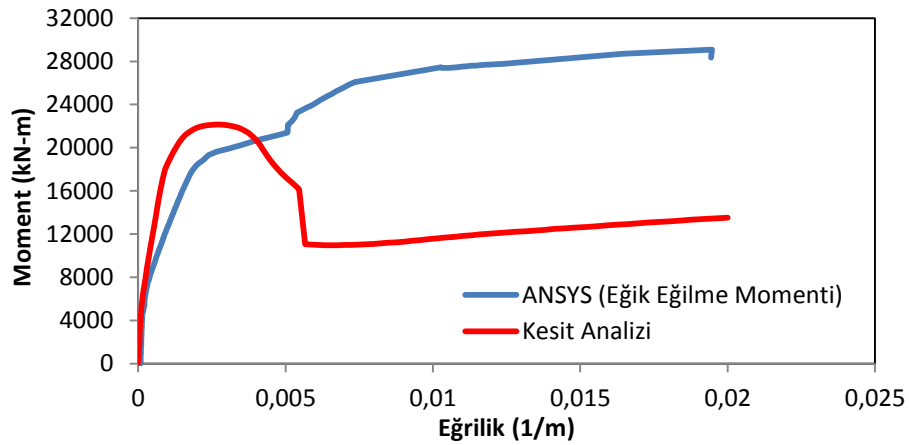
Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	2,88	46,17	460,95	85,54	32,16	35,31	322,32	2529,76	2509,07
2	-21,44	173,51	1279,33	158,84	102,42	168,15	-1776,97	4652,84	2485,28
3	-19,46	199,40	1445,26	177,66	121,00	188,90	-2377,13	5316,39	2421,89
4	-20,18	276,77	1709,94	361,16	259,33	452,48	-4283,08	5431,83	4212,41

Çizelge 4.18’de görüldüğü gibi U kesitli perdeye x doğrultusunda etkiyen kesme yükü, perdenin o doğrultuda yer alan ve P3 ile gösterilen gövde kısmı tarafından alınmakta, y doğrultusunda etkiyen kesme yükü ise perdenin o doğrultuda yer alan P1 ve P2 flanşları tarafından taşınmaktadır. Oluşan burulma etkisi P2 flanşının kesme yükünü azaltıp P3 gövdesinin kesme yükünü arttırmaktadır.

Çizelge 4.19. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 3)

Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃
1	5,355	0,873	0,102	0,052	0,029	0,885	2,919	1,075	0,100
2	0,494	0,680	0,088	0,069	-0,015	1,277	1,672	0,718	0,084
3	-0,249	0,661	0,087	0,031	-0,040	1,261	1,748	0,724	0,091
4	-2,997	0,692	0,072	0,000	-0,057	1,235	2,045	0,186	0,077

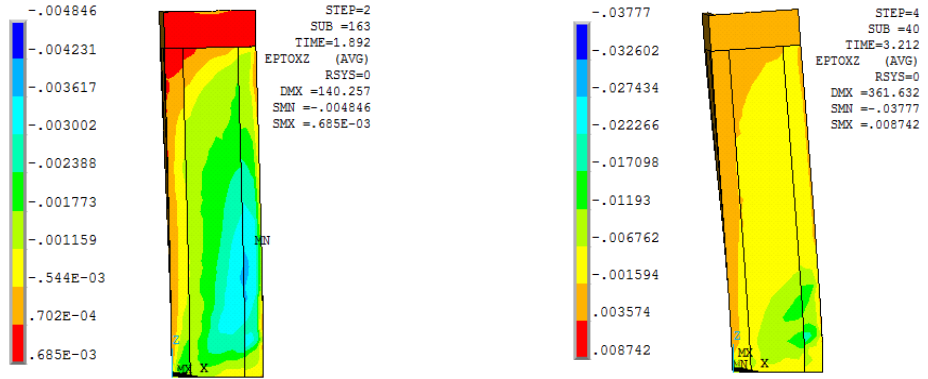
U kesitli betonarme perdenin gövde kısmından x ve y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri etkisindeki davranışının belirlenmesi için Şekil 4.70’de moment-eğrilik ilişkisi verilmiştir.



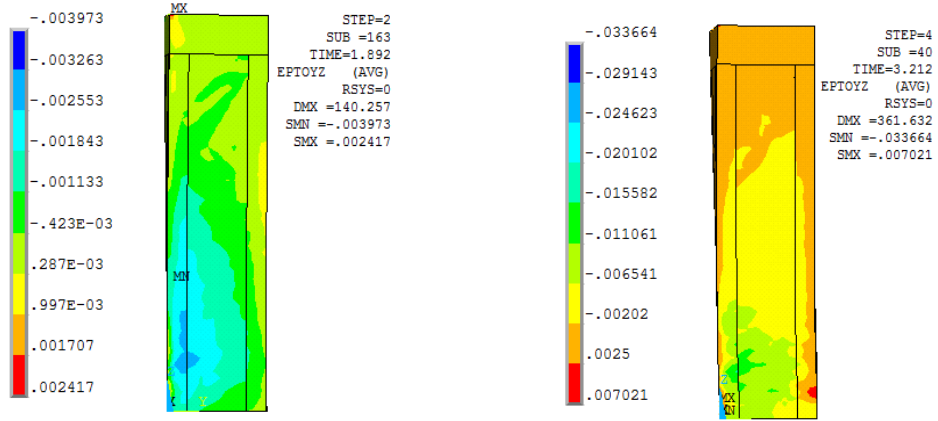
Şekil 4.70. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 3)

Şekil 4.70’ye göre çelik donatının aktığı andaki eğrilik $\kappa_{akma} = 0,00104 / m$ ve betonun göçmesi durumundaki eğrilik $\kappa_{göçme} = 0,0142 / m$ olarak belirlenmiştir. U kesitli betonarme perdenin uygulanan kesme kuvvetleri etkisi altında taşıyabileceği maksimum moment değeri $M_{max} = 29000 \text{ kN-m}$ olarak bulunmuştur. Burulma etkisinin olduğu perdelerde kesit analizi ile gerçek deformasyon durumu yansıtamamaktadır.

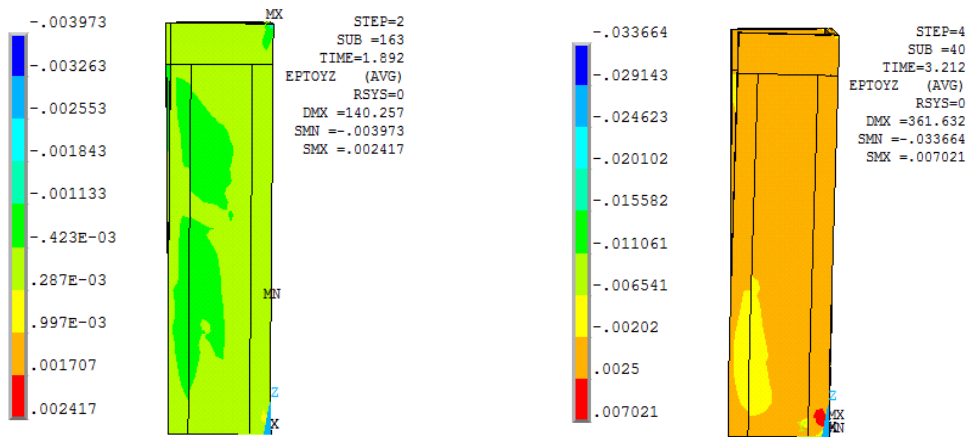
Perdeye etkileyen kesme kuvveti altında gövde ve flanş üzerinde oluşan kayma deformasyonları Şekil 4.71, Şekil 4.72 ve Şekil 4.73’de gösterilmiştir.



Şekil 4.71. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 3)

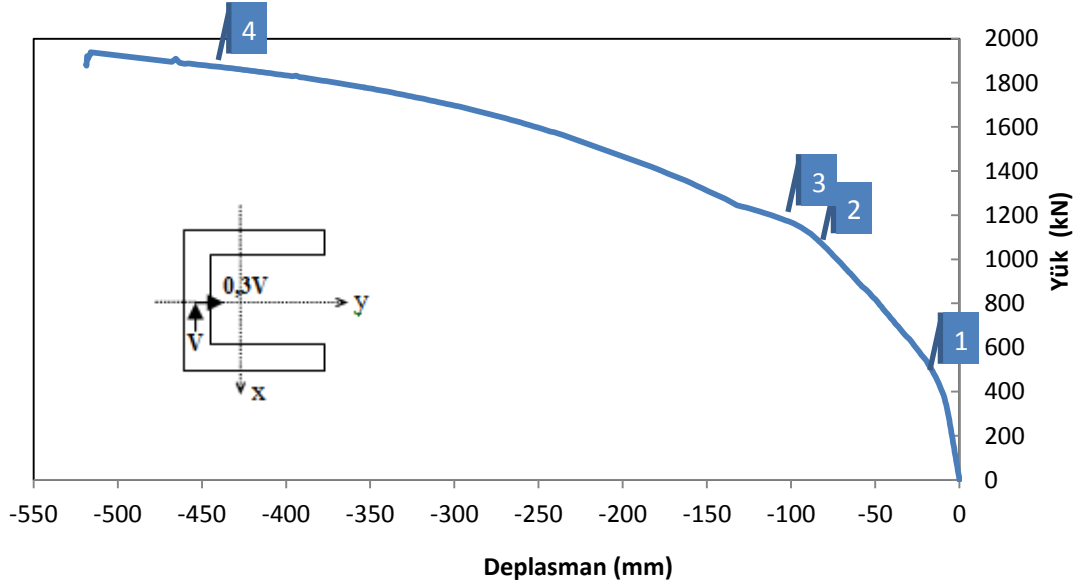


Şekil 4.72. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 3)



Şekil 4.73. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 3)

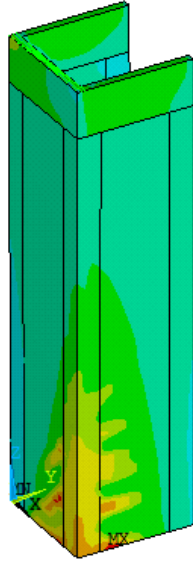
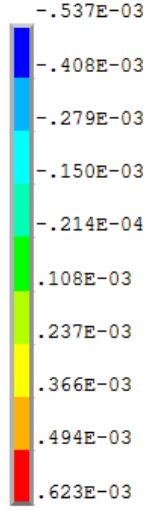
4.1.7. Model 8 yük-deplasman ilişkisi



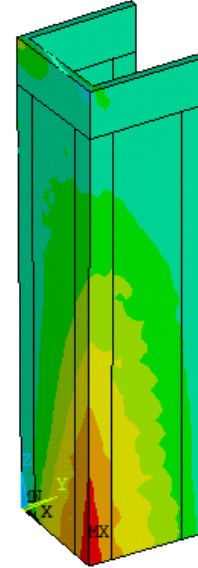
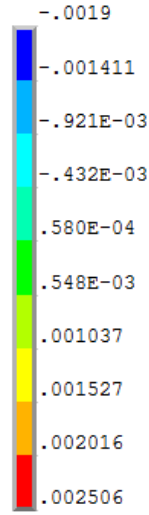
Şekil 4.74. Model 8 yük-deplasman eğrisi

Şekil 4.74’de Model 8’e ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Model 8 analizinde Çizelge 3.5’de görüldüğü gibi perdeye hem x doğrultusunda hem de y doğrultusunda kesme kuvvetleri uygulanmıştır. Model 8’in Model 3’den tek farkı y doğrultusunda uygulanan yükün yönüdür. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlamların önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki duruma karşılık gelmektedir.

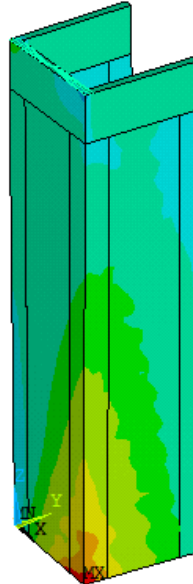
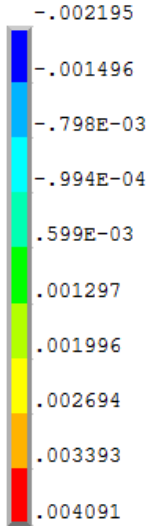
Şekil 4.75’de U kesitli betonarme perdenin x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetleri etkisi altında çatlama, akma ve ezilme durumlarındaki deformasyon şekilleri verilmiştir.

Çatlama

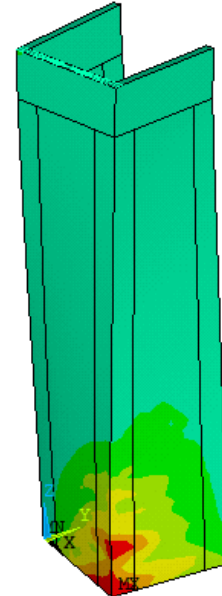
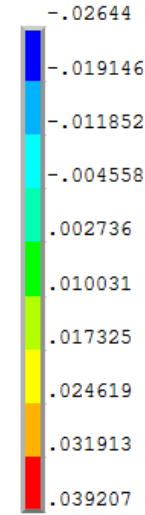
STEP=2
SUB =35
TIME=1.292
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =23.38
SMN =-.537E-03
SMX =.623E-03

Akma

STEP=2
SUB =103
TIME=1.626
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =114.06
SMN =-.0019
SMX =.002506

Ezilme

STEP=2
SUB =119
TIME=1.679
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =136.54
SMN =-.002195
SMX =.004091

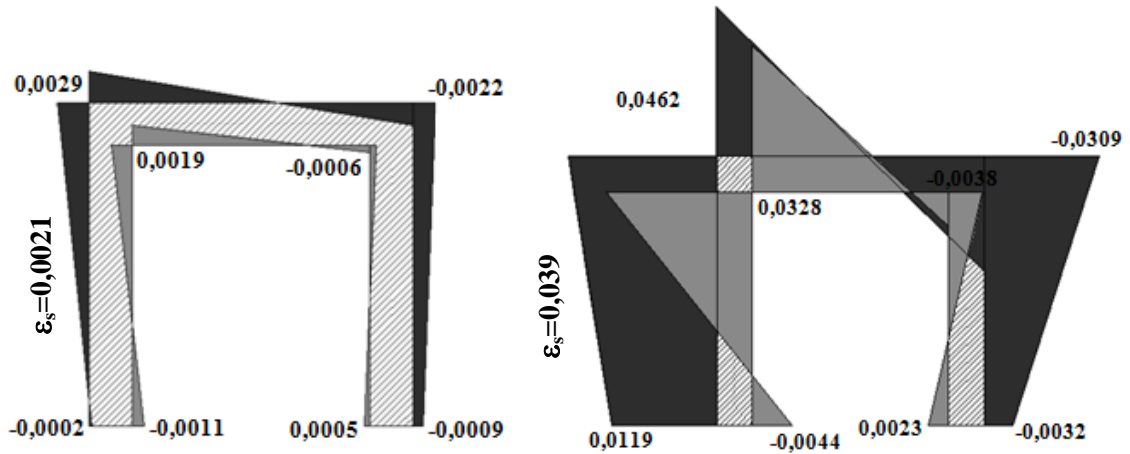
Ezilme+

STEP=4
SUB =118
TIME=3.833
EPTOZ (AVG)
RSYS=0
DMX =699.65
SMN =-.02644
SMX =.039207

Şekil 4.75. Birim şekil değiştirmeler (Model 8)

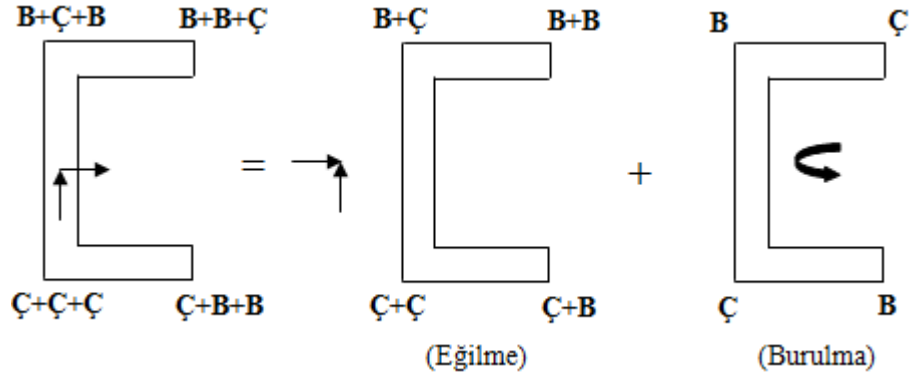
U kesitli perdede $-x$ yönündeki kesme kuvveti etkisi altında P1 flanşında çekme etkileri oluşmakta, P2 flanşının P3 gövdesi ile birleştiği bölgede ise basınç etkileri meydana gelmektedir. Ancak y yönünde uygulanan kesme kuvveti, perdenin P3 gövdesinde çekme etkisi oluştururken, flanş uç kısımlarında da basınç etkileri oluşturmaktadır.

Şekil 4.76'da ANSYS'de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir. Perde üzerinde $-x$ yönündeki kesme kuvveti ile y yönündeki kesme kuvveti sonucu P1 flanşı ile P3 gövdesinin birleşim bölgesinde maksimum çekme birim şekil değiştirmeleri, P2 flanşı ile P3 gövdesi birleşim bölgesinde ise maksimum basınç birim şekil değiştirmesi oluşmaktadır.



Şekil 4.76. ANSYS'de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 8)

U kesitli perdenin P3 ile belirtilen gövdesinin ortasından hem x hem de y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma ve eğilme etkisi Şekil 4.77'deki gibi gösterilebilir. Yalnız eğik eğilmeden dolayı oluşan çekme ve basınç bölgeleri dikkate alındığında tarafsız eksenin yerinin belirlenmesi mümkündür ancak burulma etkisinin de oluşması halinde gerçek deformasyon durumu kesit analizi yapılarak yansıtılamamaktadır.



Şekil 4.77. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 8)

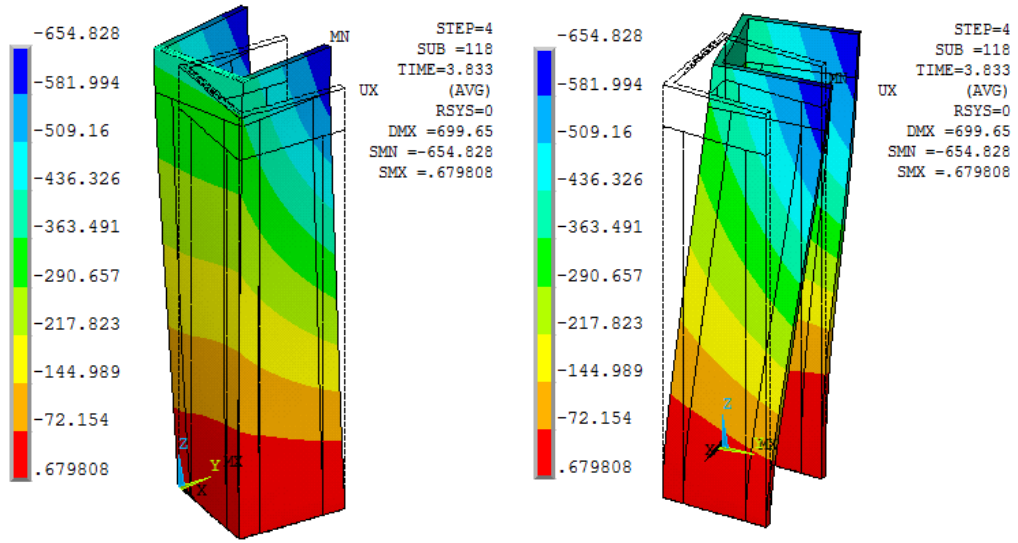
Perdeye etki eden kesme kuvvetleri, perde üzerinde burulma etkileri oluşturmakta, Çizelge 4.20’de perdede etkili olan burulma açıları ile x, y ve z yönlerinde oluşan deplasman değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.20. Model 8’e ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	Deplasman (mm)		
				UX	UY	UZ
1	0,00063	Çatlama	0,225	-16,18	3,11	-0,96
2	0,0021	Akma	0,945	-80,79	21,51	0,76
3	0,0038	Ezilme	1,161	-99,77	27,47	1,30
4	0,04	Ezilme+	4,850	-460,45	101,36	8,23

Şekil 4.78’de U kesitli betonarme perdenin x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetleri etkisi altında, x yönünde yaptığı deformasyon şekilleri gösterilmiştir. Bu şekillere bakıldığında perdede oluşan burulma etkileri de açıkça görülmektedir.

U kesitli betonarme perdeye x ve y doğrultusunda etkiyen kesme kuvvetleri sonucunda perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.21’de, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.78. X doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 8)

Çizelge 4.21. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 8)

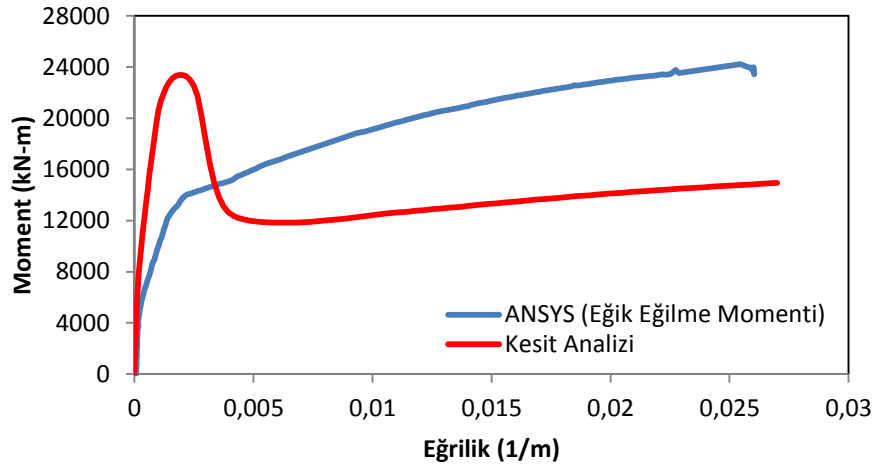
Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	4,98	62,36	428,49	-52,71	-116,27	20,23	887,03	3339,23	1134,90
2	7,74	169,68	886,50	-117,61	-243,97	42,40	111,09	5285,37	-35,31
3	1,59	183,39	969,61	-144,06	-260,45	58,14	-110,79	5606,82	-134,88
4	51,03	147,73	1687,4	19,18	43,60	176,59	-3388,77	8124,36	620,02

Çizelge 4.22. Perde üzerindeki yük bileşelerinin yerleri (Model 8)

Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y1	y2	y3	x1	x2	x3	y11	y22	y33
1	4,000	0,893	0,104	0,093	0,121	0,453	3,032	1,421	0,109
2	2,066	0,896	0,101	0,118	0,136	0,642	18,294	1,452	0,112
3	6,720	0,825	0,100	0,132	0,140	0,958	-17,225	1,457	0,143
4	4,242	-0,210	0,102	-1,773	-0,684	1,054	1,780	1,157	0,096

Çizelge 4.21’de görüldüğü gibi x doğrultusunda uygulanan kesme yükünü, perdenin yine aynı doğrultusunda bulunan P3 gövdesi karşılamakta, y doğrultusunda uygulanan kuvveti de perdenin P1 ve P2 flanşları karşılamaktadır. Oluşan burulma etkisi nedeniyle x doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetinin bir bölümünü de perdenin P2 flanşı karşılamaktadır.

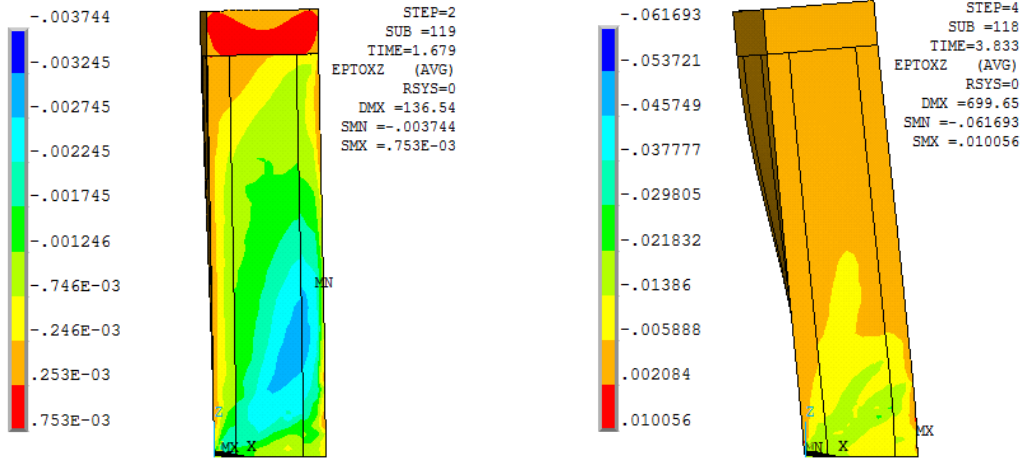
U kesitli betonarme perdenin gövde kısmından x ve y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri etkisindeki davranışının belirlenmesi için Şekil 4.79’da moment-eğrilik ilişkisi verilmiştir.



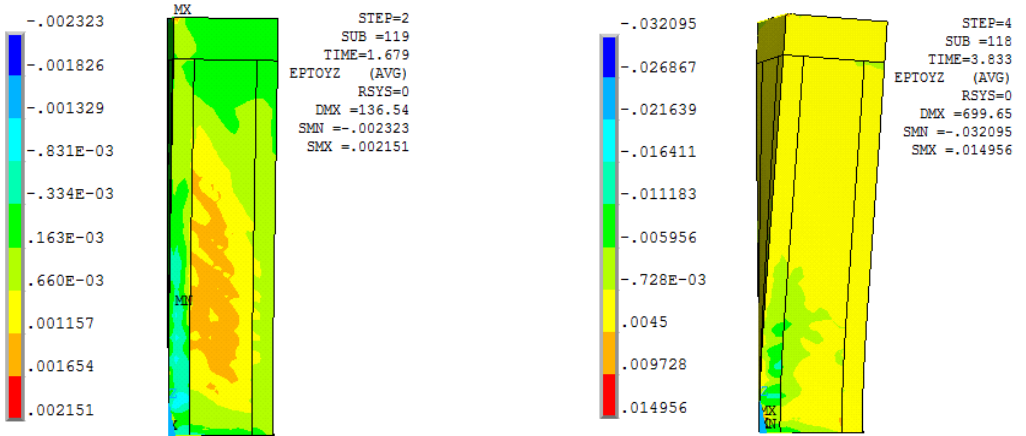
Şekil 4.79. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 8)

Şekil 4.79’a göre çelik donatının aktığı andaki eğrilik $K_{akma} = 0,0010 / m$ ve betonun göçmesi durumundaki eğrilik $K_{göçme} = 0,0156 / m$ olarak belirlenmiştir. U kesitli betonarme perdenin uygulanan kesme kuvvetleri etkisi altında taşıyabileceği maksimum moment değeri $M_{max} = 24000 \text{ kN-m}$ olarak bulunmuştur.

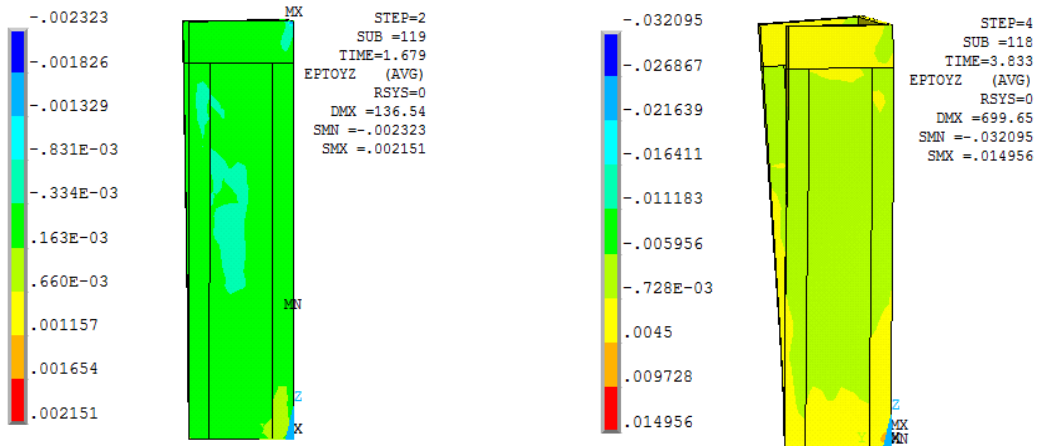
Perdeye etkileyen kesme kuvveti altında gövde ve flanş üzerinde oluşan kayma deformasyonları Şekil 4.80, Şekil 4.81 ve Şekil 4.82’de gösterilmiştir.



Şekil 4.80. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 8)

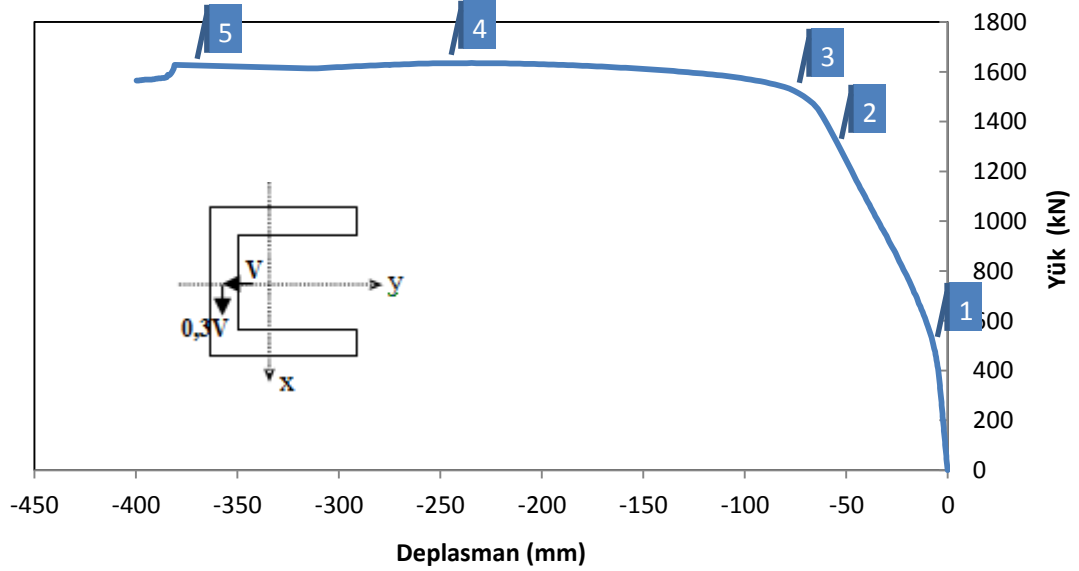


Şekil 4.81. P1 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 8)



Şekil 4.82. P2 flanşında oluşan kayma deformasyonları (Model 8)

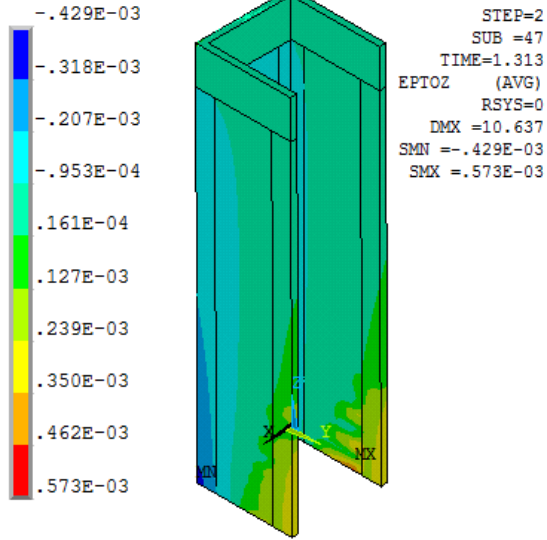
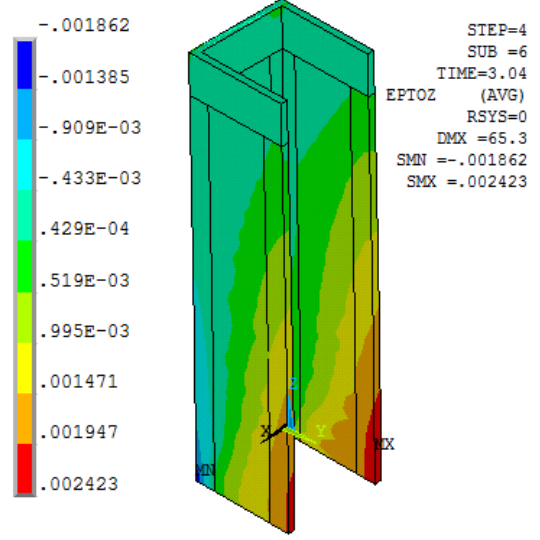
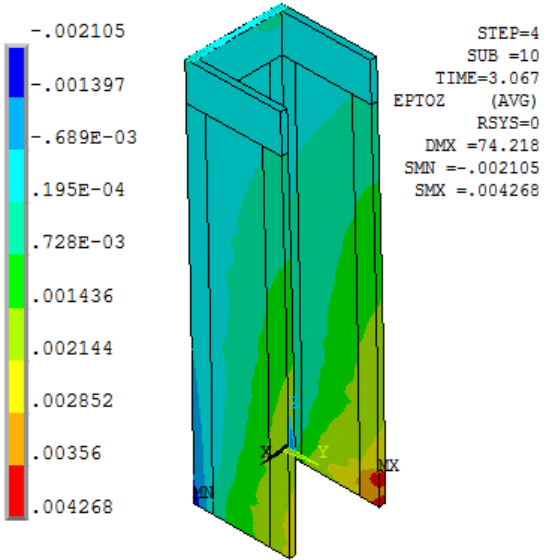
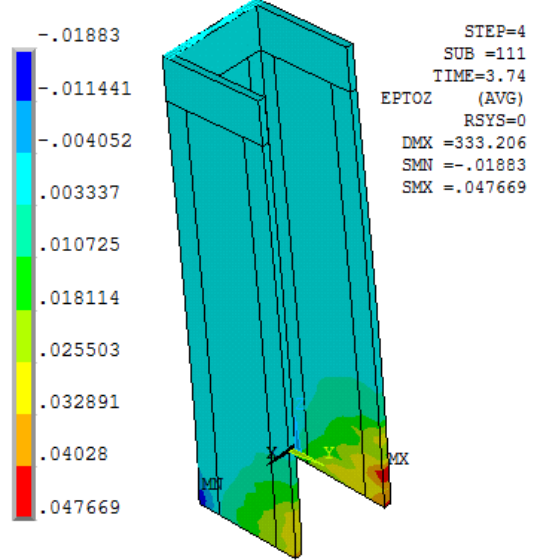
4.1.8. Model 7 yük-deplasman ilişkisi



Şekil 4.83. Model 7 yük-deplasman eğrisi

Şekil 4.83'de Model 7'e ait yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Model 7 analizinde Çizelge 3.5'de görüldüğü gibi perdeye hem x doğrultusunda hem de y doğrultusunda kesme kuvvetleri uygulanmıştır. Model 7'de Model 3 ve Model 8'den farklı olarak x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetlerinin değeri farklı olarak alınmıştır. Eğrinin 1 ile gösterilen noktasında U kesitli perdede çatlama önemli derecede arttığı belirlenmiştir. 2 noktası donatıların akmaya başladığı yani $\varepsilon_s = 0,0021$ değerine ulaştığı noktadır. Eğrinin 3 ile gösterilen noktasında $\varepsilon_s = 0,0038$ değerine ulaşılmış ve beton ezilmeye başlamıştır. 4 ile gösterilen nokta ise betonun ezilmesinden sonraki duruma karşılık gelmektedir.

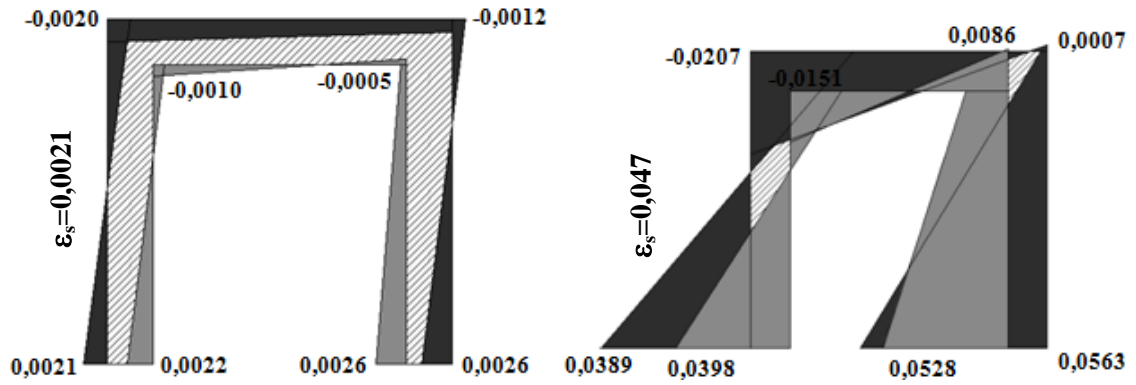
Şekil 4.84'de U kesitli betonarme perdenin x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetleri etkisi altında çatlama, akma ve ezilme durumlarındaki deformasyon şekilleri verilmiştir.

Çatlama**Akma****Ezilme****Ezilme+**

Şekil 4.84. Birim şekil değiştirmeler (Model 7)

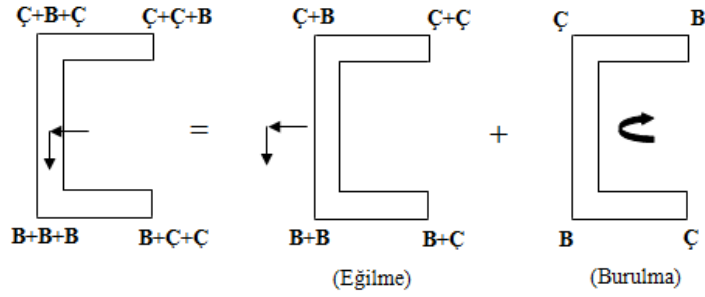
U kesitli betonarme perdede x yönündeki kesme kuvveti etkisi altında P2 flanşında çekme etkisi oluşurken, P1 flanşının gövde ile birleştiği bölgede basınç etkisi meydana gelmektedir. -y yönündeki kesme kuvveti perdenin flanş uçlarında çekme etkisi oluştururken, gövdenin tamamında basınç etkileri ön plana çıkmıştır.

Şekil 4.85’de ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin U kesitli perdenin tamamındaki dağılımı donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmektedir. Perdeye etki eden kesme kuvvetleri sonucunda maksimum çekme birim şekil değiştirmesi P2 flanşının uç kısmında oluşurken, maksimum basınç birim şekil değiştirmeleri P1 flanşının gövde ile birleştiği bölgede meydana gelmektedir.



Şekil 4.85. ANSYS’de hesaplanan birim şekil değiştirme diyagramı (Model 7)

U kesitli perdenin P3 ile belirtilen gövdesinin ortasından hem x hem de y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri, kayma merkezine taşınırsa, perdede oluşan burulma ve eğilme etkisi Şekil 4.86’deki gibi gösterilebilir. Her iki yöndeki kesme kuvvetleri etkisi altında kesitte eğik eğilme durumu oluşurken, x doğrultusundaki kesme kuvvetinden dolayı burulma etkisi de meydana gelmektedir.



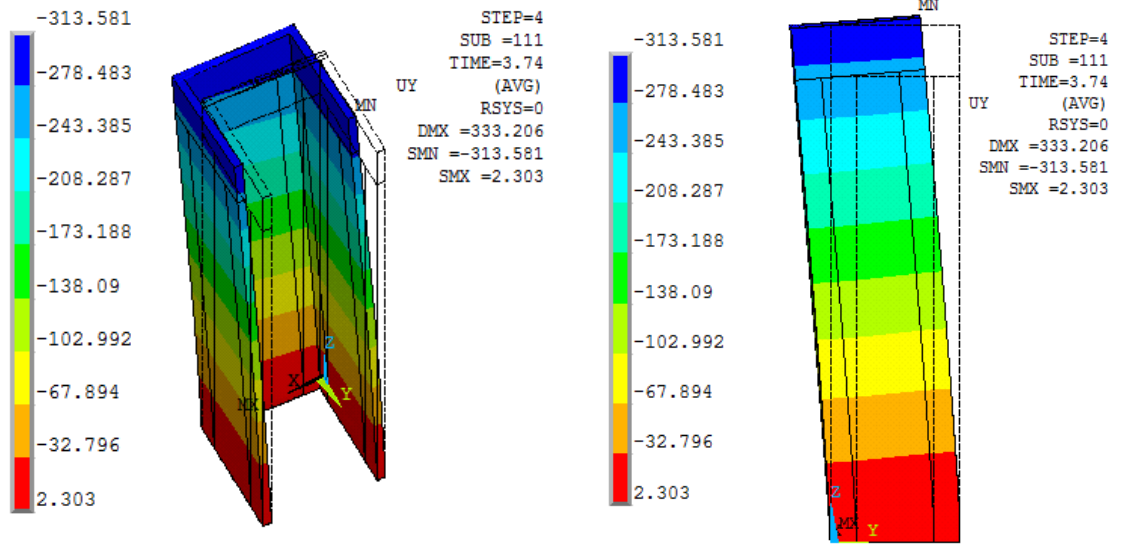
Şekil 4.86. Eğilme ve burulma etkisinde çekme ve basınç bölgeleri (Model 7)

Perdeye etki eden kesme kuvvetleri, perde üzerinde çok az miktarda burulma etkisi oluşturmaktadır. Çizelge 4.23’de perdede etkili olan burulma açıları ile x.y ve z doğrultularında oluşan deplasman değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.23. Model 7’ye ait burulma açıları

No	Birim Şekil Değişirme (ε_s)	Deformasyon	Burulma Açısı (ω°)	UX	UY	UZ
1	0,00058	Çatlama	0,054	3,71	-7,97	-0,56
2	0,0021	Akma	0,084	15,68	-56,81	4,44
3	0,0038	Ezilme	0,056	18,63	-68,65	5,69
4	0,04	Ezilme+	0,192	86,53	-308,17	27,93

Çizelge 4.23’de görüldüğü gibi U kesitli betonarme perdede, x ve y doğrultusundaki kesme kuvvetleri etkisinde burulma etkisi çok küçük değerlerde olmakta ve Şekil 4.87’deki deformasyon şeklinde de perde üzerinde burulma etkilerinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.87. Y doğrultusunda oluşan deplasman ve deformasyon (Model 7)

U kesitli betonarme perdeye x ve y doğrultusunda etkiyen kesme kuvvetleri sonucunda perdenin gövde ile flanş kısımlarında oluşacak kesme kuvveti değerleri Çizelge 4.24’de, bunların perde üzerindeki yerleri ise Çizelge 4.25’de gösterilmiştir.

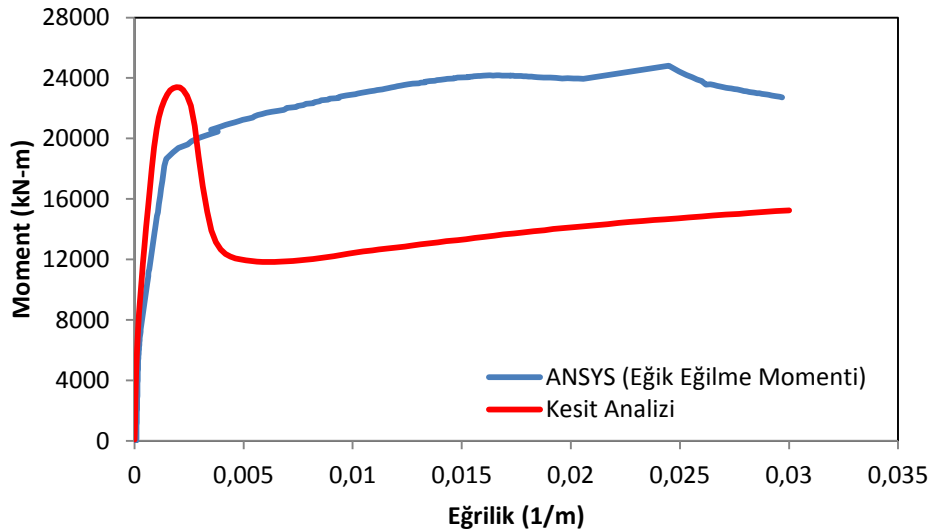
Çizelge 4.24. Flanş ve gövdenin aldığı toplam kesme kuvvetleri (Model 7)

Nonlinear	$\sum F_x$ (kN)			$\sum F_y$ (kN)			$\sum F_z$ (kN)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
1	235,95	243,32	53,39	235,95	243,32	53,39	550,26	-140,35	4951,24
2	542,60	548,75	259,18	542,60	548,75	259,18	-1581,25	-2607,60	9550,0
3	595,71	605,02	286,96	595,71	605,02	286,96	-1862,13	-3060,03	10283,3
4	577,59	641,26	415,66	577,59	641,26	415,66	-2735,43	-4295,12	12391,7
5	591,29	734,52	239,93	591,29	734,52	239,93	-1168,96	-4552,44	11082,5

Çizelge 4.25. Perde üzerindeki yük bileşkelerinin yerleri (Model 7)

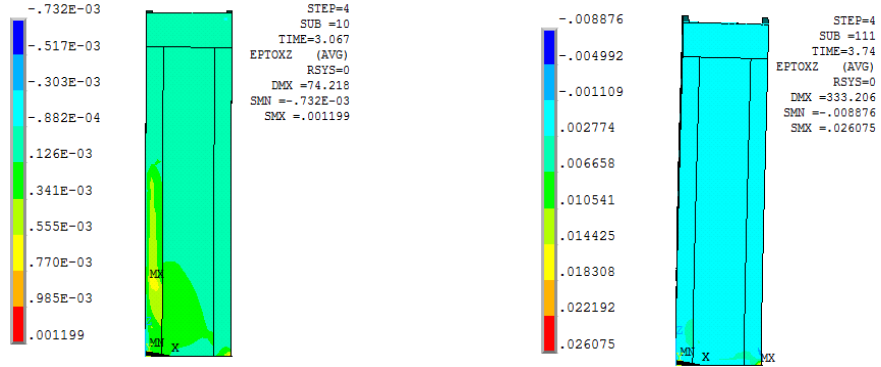
Nonlinear	y yönündeki mesafeler (m)			x yönündeki mesafeler (m)			z yönündeki mesafeler (m)		
	y ₁	y ₂	y ₃	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁₁	y ₂₂	y ₃₃
1	0,583	0,207	0,106	0,092	0,103	1,545	-0,584	5,883	0,095
2	0,453	0,415	0,102	0,089	0,115	1,509	3,303	2,383	0,072
3	0,445	0,525	0,105	0,086	0,113	1,527	3,275	2,318	0,071
4	0,361	3,814	0,103	0,087	0,072	1,420	2,751	1,962	0,064
5	0,499	-2,759	0,142	0,078	0,059	1,078	6,050	1,952	0,074

U kesitli betonarme perdenin gövde kısmından x ve y doğrultusunda uygulanan kesme kuvvetleri etkisindeki davranışının belirlenmesi için Şekil 4.88’de moment-eğrilik ilişkisi verilmiştir. Buna göre, çelik donatının aktığı andaki eğrilik $\kappa_{akma} = 0,00081/m$ ve betonun göçmesi durumundaki eğrilik $\kappa_{göçme} = 0,01/m$ olarak belirlenmiştir. U kesitli betonarme perdenin uygulanan kesme kuvvetleri etkisi altında taşıyabileceği maksimum moment değeri $M_{max} = 24600 \text{ kN-m}$ olarak bulunmuştur.

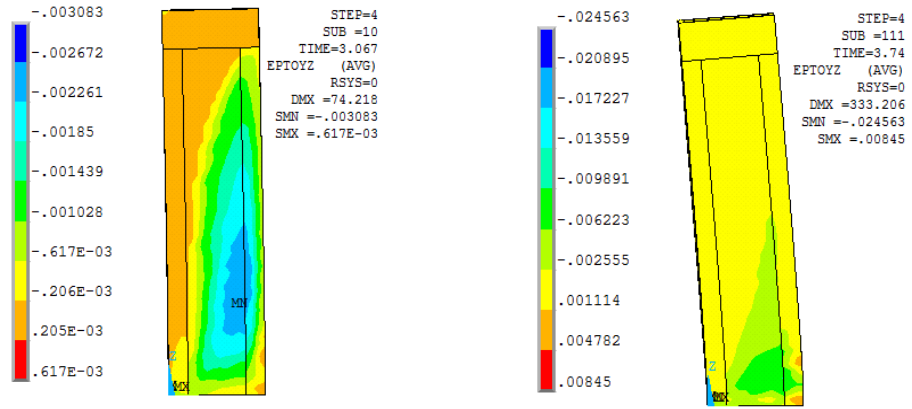


Şekil 4.88. Moment-eğrilik ilişkisi (Model 7)

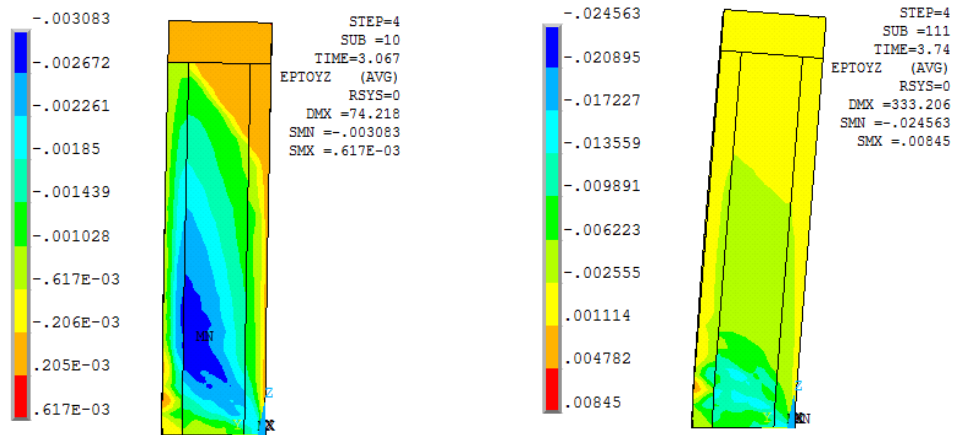
Perdeye etkileyen kesme kuvveti altında gövde ve flanş üzerinde oluşan kayma deformasyonları Şekil 4.89, Şekil 4.90 ve Şekil 4.91’de gösterilmiştir.



Şekil 4.89. Gövde üzerinde oluşan kayma deformasyonları (Model 7)



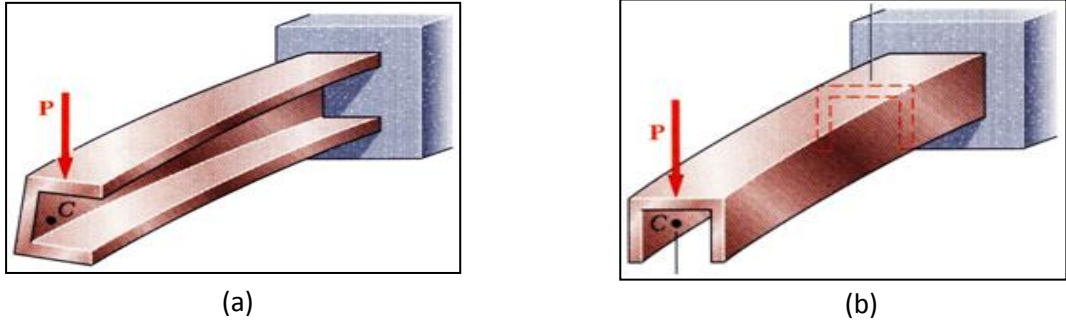
Şekil 4.90. P1 Flaşında oluşan kayma deformasyonları (Model 7)



Şekil 4.91. P2 Flaşında oluşan kayma deformasyonları (Model 7)

4.2. Dikdörtgen Kesitli Olmayan Perde Duvarların Kayma Merkezi

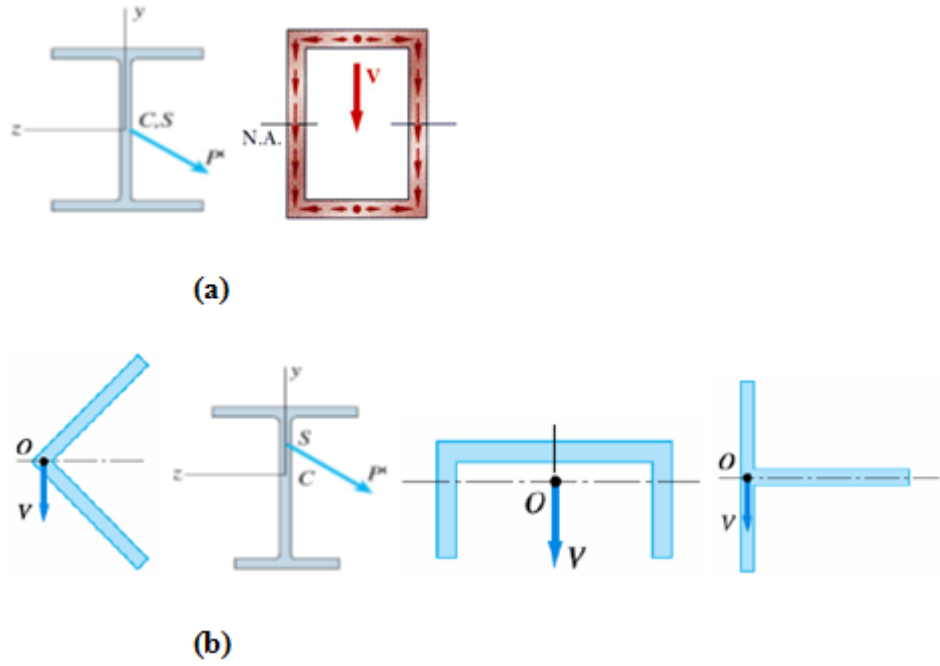
Yapı elemanlarında farklı yüklerin etkisi altında bazı deformasyonlar meydana gelmektedir. Örneğin; ankastre kirişlerde yük etkisi altında çökme meydana gelebilmektedir. Genellikle sabit kesitli doğrusal bir kirişin dönmeden çökmesi istenir. Bunu sağlamak için kuvvetler düzlemi, kirişin her bir kesitinin kayma merkezinden geçmesi gerekir (Şekil 4.92).



Şekil 4.92. (a) Yük Kayma merkezi dışında (b) Yük kayma merkezinde

Yük, ağırlık merkezi doğrultusunda ancak, simetri düzlemi olmayan düşey düzlemde etki ederse Şekil 4.92a'da görüldüğü gibi kiriş elemanı saat yönünde dönerek burulmaya da zorlanır. Eğer yükün uygulama noktası için, burulma oluşturmayacak, sadece eğilme ve düşey kesme yaratacak bir nokta bulunursa sadece düşeyde çökme meydana gelecektir. Kayma merkezi adı verilen bu nokta tamamen kesit geometrisine bağlı olarak simetri eksenini üzerinde, kesit alanı dışında veya içinde olabilir.

İki tane simetri eksenini barındıran kesitlerde, kayma merkezi ile ağırlık merkezi çakışırken, yalnız bir tane simetri eksenini bulunan kesitlerde ise kayma merkezi ile ağırlık merkezi çakışmaz ancak ikisi de simetri eksenini üzerinde bulunurlar (Şekil 4.93). Simetri eksenine sahip olmayan kesitlerde ise kayma merkezi yerinin tespiti oldukça karmaşıktır.

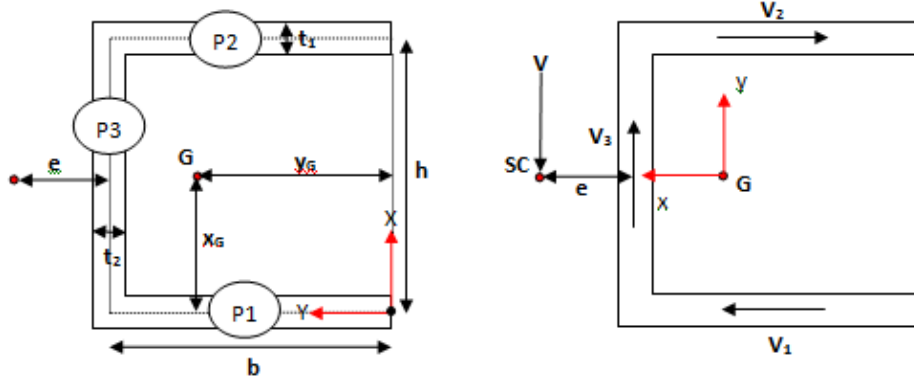


Şekil 4.93. (a) İki simetri eksenli kesitler (b) Tek simetri eksenli kesitler

Eğer, yük etkisi altında kesitin burulmadan eğilmesi isteniyorsa, yükün kesitin kayma merkezinden uygulanması gerekmektedir.

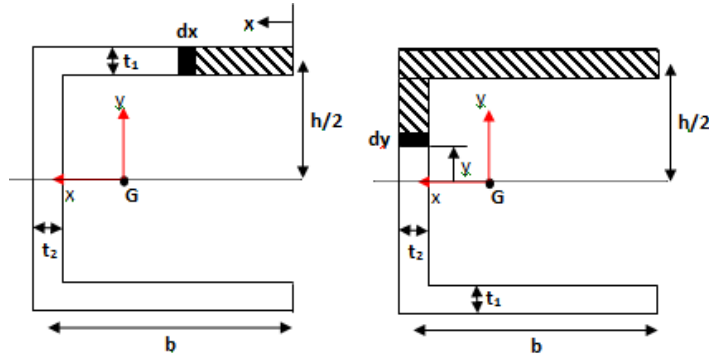
4.2.1. U kesitli perde elemanlarında kayma merkezinin teorik hesabı

Şekil 4.94'de gösterilen U kesitli betonarme perdenin kayma merkezinin yerinin belirlenmesi, uygulanan kuvvetin kesitte burulma oluşturmadan sadece eğilme meydana getirmesi bakımından önemlidir. Aşağıda boyut bilgileri verilen U şekilli perdenin kayma merkezi yerinin teorik olarak nasıl belirlendiği gösterilmiştir.



Şekil 4.94. U kesitli betonarme perde ve serbest cisim diyagramı

Şekil 4.95'de görüldüğü gibi, U kesitli betonarme perdenin flanş ve gövde kısmında alınacak sonsuz küçük bir parçacığın üzerinden hareketle Denklem (4.2) ve Denklem (4.3) de belirtilen formüller elde edilerek kayma gerilmesi hesaplanmaktadır. Şekil 4.94'deki serbest cisim diyagramı kullanılarak flanş ve gövde kısmındaki toplam kesme kuvvetleri Denklem (4.4)'e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 4.95. Kayma merkezi yerinin belirlenmesi

$$Q = x.t_1.(h/2) \quad (4.2)$$

$$\tau = \frac{V.Q}{I_x.t_1} = \frac{V}{I_x.t_1} \left(x.t_1 \cdot \frac{h}{2} \right) = \frac{V.h.x}{2.I_x} \quad (4.3)$$

$$V_2 = \int \tau \cdot dA = \int_0^b \tau \cdot t_1 \cdot dx = \int_0^b \left(\frac{V \cdot h \cdot x}{2 \cdot I_x} \right) t_1 \cdot dx = \frac{V \cdot h \cdot b^2 \cdot t_1}{4 \cdot I_x} \quad (4.4)$$

$$I_x = 2 \cdot \left[\frac{b \cdot t_1^3}{12} + b \cdot t_1 \cdot \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_2 \cdot h^3}{12} \quad (4.5)$$

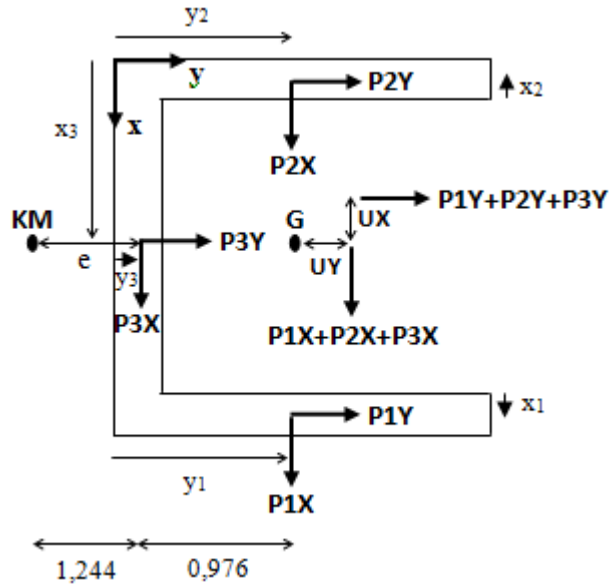
U kesitli perdenin gövde kısmının orta noktasına göre moment alındığında kayma merkezi yeri Denklem (4.6)'ya göre kolaylıkla belirlenmektedir.

$$V \cdot e = \frac{V \cdot h \cdot b^2 \cdot t_1}{4 \cdot I_x} \cdot h \quad \rightarrow \quad e = \frac{b^2 \cdot h^2 \cdot t_1}{4 \cdot I_x} \quad (4.6)$$

4.2.2. U kesitli perdelerin farklı yükleme durumlarındaki kayma merkezi

Bu tez çalışmasında, U kesitli betonarme perdelerin farklı yükleme şekillerinde, nonlinear analizlerde kayma merkezinin nasıl değiştiği de araştırılmış ve doğrusal olmayan analizler sonucu bulunan kayma merkezi ile teorik hesaplardan elde edilen kayma merkezi arasındaki ilişki belirlenmiştir.

Çizelge 3.5'de gösterilen Model 1, Model 2, Model 6 ile Model 3, Model 7 ve Model 8 analizlerinde perdelerin kayma merkezlerinin nonlinear durumdaki değişimi de araştırılmıştır. Öncelikle perdelerin kayma merkezi teorik olarak hesaplanmış, daha sonra belirlenen yükleme şekillerine göre doğrusal olmayan analizleri yapılarak kayma merkezleri tekrar belirlenmiştir. Bunun için Şekil 4.96'da flanş ve gövde için pozitif yönde alınan iç kuvvetlerin dengesinden, U kesitli betonarme perdenin iç kuvvetlerinin kayma merkezine göre momenti M_{KM} hesaplanarak, elde edilen değer, bileşke kuvvetin kayma merkezine göre hesaplanan momentine bölünür. Ancak nonlinear durumda perdede x ve y doğrultusunda oluşacak deplasman değerlerinin de bu hesaba katılması uygun olacaktır.



Şekil 4.96. Kayma merkezi hesabında kullanılan serbest cisim diyagramı

Çizelge 4.26’da, Çizelge 3.5’de yükleme şekilleri gösterilen her bir model için kayma merkezi hesap yöntemi belirtilmiştir. Tüm modellerde ele alınan kayma merkezi hesap yöntemi Şekil 4.96’da belirtilen pozitif kuvvet durumuna göre yapılmıştır. U kesitli betonarme perdenin gövde ve flanş bölgesinde oluşan iç kuvvetlerin perdenin kayma merkezine göre hesaplanan momenti Denklem (4.7)’ye göre belirlenmiştir.

$$M_{KM} = P1X * (y_1 + 1,244 - 0,10) + P2X * (y_2 + 1,244 - 0,10) + P3X * (y_3 + 1,244 - 0,10) - P1Y * (x_1 + 1,3) + P2Y * (x_2 + 1,3) + P3Y * (1,5 - x_3) \quad (4.7)$$

Çizelge 4.26. Kayma merkezinin hesabında kullanılan yöntem

Model 1	$e = [M_{KM} - (P1X + P2X + P3X) * UY - (P1X + P2X + P3X) * 0,976] / (P1X + P2X + P3X)$
Model 2	$e = [M_{KM} - (P1X + P2X + P3X) * UY] / (P1X + P2X + P3X)$
Model 6	$e = [-M_{KM} - (P1X + P2X + P3X) * UY] / (P1X + P2X + P3X)$
Model 3	$e = [M_{KM} - (P1X + P2X + P3X) * UY - (P1Y + P2Y + P3Y) * UX] / (P1X + P2X + P3X)$
Model 7	$e = [-M_{KM} + (P1X + P2X + P3X) * UY + (P1Y + P2Y + P3Y) * UX] / [-(P1X + P2X + P3X)]$
Model 8	$e = [M_{KM} - (P1X + P2X + P3X) * UY + (P1Y + P2Y + P3Y) * UX] / (P1X + P2X + P3X)$

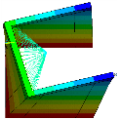
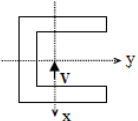
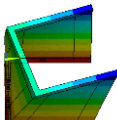
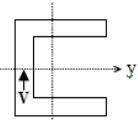
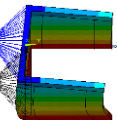
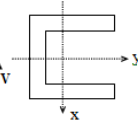
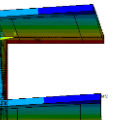
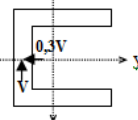
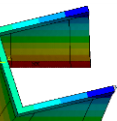
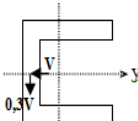
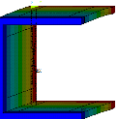
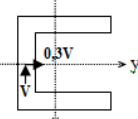
Bilindiği üzere kayma merkezi, lineer durumda yükleme şeklinden bağımsız olarak sadece kesit geometrisine bağlıdır. Ancak bu çalışmada yapılan analizlerde, nonlinear durumda kayma merkezinin değişimi araştırılmıştır. Çizelge 4.27’de düz eğilme-burulma ve eğik eğilme-burulma etkisinin bir arada olduğu perdelerin nonlinear durumda kayma merkezlerindeki değişim betonun çatlaması, donatının akması ve betonun ezilmesi anları için verilmiştir.

Çizelge 4.27’deki verilere göre, U kesitli betonarme perdelerin farklı kesme kuvvetleri etkisinde yapılan nonlinear analizinde de lineer durumda olduğu gibi kayma merkezi değişmemektedir. Teorik olarak hesaplanan kayma merkezi ile doğrusal olmayan analizlerde hesaplanan kayma merkezi birbiriyle aynıdır.

Nonlinear durumda, uygulanan kesme kuvveti etkisinde kesit geometrisi değişmesine rağmen kayma merkezi lineer durumda olduğu gibi sabit kalmaktadır. Bu sonuca göre kayma merkezi kesitin eğilme ve burulma davranışına bağlı olmayan bir konumdur. Teorik olarak hesaplarda kayma merkezinin yerini belirlemek için kullanılan formülasyon, inelastik durumlarda da geçerlidir.

Çizelge 4.27’de kayma merkezinde görülen küçük değişikliklerin sebebinin ANSYS’de analiz sırasında yakınsama kriterine yapılan müdahale olduğu düşünülmektedir. Programda çözüm işleminin durması halinde yakınsama kriteri belli aralıklarda genişletilerek analize devam edilmektedir. Çözüm işleminin yakınsama problemi nedeniyle sık aralıklarda durması hataların birikmesine neden olarak sonucu etkilemektedir.

Çizelge 4.27. U kesitli perdelerde kayma merkezinin nonlinear değişimi

Düz Eğilme ve Burulma Etkisinde Kayma Merkezi Değişimi (m)						
Analiz Adı	Teorik Kayma Merkezi	ANSYS			Deformasyon Şekli	
		Betonun Çatlaması	Donatının Akması	Betonun Ezilmesi		
Model 1	1,244	1,2440	1,2441	1,2455		
Model 2		1,2440	1,2441	1,2512		
Model 6		1,2456	1,2466	1,2702		
Eğik Eğilme ve Burulma Etkisinde Kayma Merkezi Değişimi (m)						
Model 3	1,244	1,2505	1,2583	1,2691		
Model 7		1,2548	1,2564	1,272		
Model 8		1,2455	1,2506	1,2823		

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, H ve U kesitli betonarme perde duvarların tasarımı ve davranış özellikleri araştırılmıştır, Bu amaçla ANSYS yazılımı kullanılarak H ve U kesitli perdelerin sonlu eleman modelleri oluşturularak nonlineer ve lineer analizleri gerçekleştirilmiştir. Lineer ve lineer olmayan çözüm çıktıları ile deneysel çalışmalar çizelge ve grafikler halinde verilmiştir.

Tüm model perdelerde ANSYS yazılımında mevcut olan SOLİD65 sonlu elemanı kullanılmıştır. Çalışmada genellikle yayılmış modelleme tekniği tercih edilmiş böylece eleman sayısı azaltılarak analiz süresi kısaltılmıştır. Donatıların çubuk eleman yada yayılı olarak tanımlanmasında beton ile çelik arasındaki aderansın tam ve mükemmel olduğu kabul edilmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

- H ve U kesitli betonarme perdelerin doğrusal olmayan davranışının farklı parametrelere bağlı olarak belirlenmesi amacıyla, deney elemanlarının hazırlanması ve deneylerin yapılması oldukça zahmetli, maliyetli ve uzun zaman alacak çalışmalardır. ANSYS veya benzer sonlu eleman yazılımları kullanılarak gerçek deneysel çalışmalardan elde edilecek sonuçlara yakın sonuçlar elde etmek çoğu zaman mümkün olmaktadır.
- ANSYS ile dikdörtgen kesitli olmayan betonarme perde modellenmesinde, perdeye uygulanacak aksenal kuvvetin düzgün bir şekilde tüm perdeye iletilmesi amacıyla yapılan alt ve üst beton levhaların rijitliklerinin, perde performansına pek bir katkısı yoktur. Ancak, bu tip modellemelerde mümkün olduğunca rijit yapılması önerilmektedir.

- H şekilli betonarme perdelerde yükleme etkisinde oluşacak çatlakların açılmasını ve giderek büyümesini engellemek amacıyla aksnel yükün belli bir değere kadar arttırılması perdenin yük taşıma performansını arttırmaktadır.
- ANSYS’de yapılan analizlerde, K1 ve K7 faktörlerinin belirlenmesi önemlidir. K1 faktörü kapalı ve K7 faktörü açık durumda analizlerin yapılması önerilmektedir.
- Dikdörtgen kesitli olmayan perdelerin modellenmesinde flanş ve gövdenin sonlu eleman ağının belirlenmesinde uyulması gereken belli bir kural olmamakla birlikte, sonlu eleman ağı düzeninin perdenin yük taşıma performansında önemli bir değişiklik yapmadığı belirlenmiştir. Ancak elde edilen deneyimlere göre her bir sonlu eleman boyutlarınının 1/1 veya 1/2 olarak ayarlanmasının uygun olduğu söylenebilir. Az sayıda sonlu elemandan oluşan bir modelin analizi hem daha kısa sürede tamamlanır hem de bilgisayarda daha az yer tutar.
- H şekilli betonarme perdelerde kullanılacak donatıların ayırık veya yayılmış olarak modellenmesi halinde perdenin yük taşıma performansında farklılıklar görülebilir. Özellikle yayılmış modellemede ayırık modellemeye göre kapasitede bir miktar düşüş oluşabilir.
- H ve U şekilli betonarme perde duvarlarda uygulanan toplam kesme kuvveti, perdenin bu kuvvet ile aynı doğrultu olan elemanları tarafından karşılanmaktadır. Sadece eğilme etkisi altındaki perdelerde, lineer durumda flanşlar eşit yük paylaşıırken, nonlineer durumda sadece y doğrultusundaki kesme kuvveti etkisinde flanşlar eşit yük almaktadır.
- H ve U şekilli betonarme perdelerde uygulanan kesme kuvvetinin perdenin flanş ve gövdesindeki dağılımı nonlineer ve lineer durumlarda benzerlik göstermektedir. Bu sonuca göre H ve U kesitli perde davranışınının açıklanmasında daha az zaman alan lineer analiz de kullanılabilir.

- H ve U şekilli betonarme perde duvarlarda eğilme etkisine ek olarak burulma etkisinin de uygulanması halinde kesitin davranışı değişmektedir. Lineer ve nonlineer durumda HW perdelerinde M/T oranı azaldıkça Flanş 2'nin aldığı kesme kuvveti değeri yükselmektedir. HS perdelerinde ise M/T oranı azaldıkça gövdenin aldığı kesme kuvveti değeri lineer ve nonlineer durumlarda azalmaktadır.
- H şekilli betonarme perde duvarların ANSYS analizinden ve gerçek deneylerden elde edilen eğilme momenti-yanal deplasman ilişkisi birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Bu açıdan ANSYS ile yapılan sonlu eleman analizleri gerçek deneysel çalışmalar için ön bilgi niteliğinde olup, maliyeti yüksek ve zaman alıcı çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlayabilir.
- U kesitli betonarme perde duvar modellerinin ANSYS'de nonlineer analizi sırasında uygulanacak kesme kuvveti, bazı modellerde kuvvet kontrollü olarak bazı modellerde ise deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. Kuvvet kontrollü analizlerde perde taşıma gücüne yaklaşıldığı bir safhada yakınsama probleminde dolayı analiz durmakta ve yapılan müdahaleler sonucu analize devam edilememektedir. Bu sebeple sadece akmadan sonra geçmeden önceki safhalar için güvenilir ve doğru sonuçlar bulunmaktadır. Ancak bu durum perdenin sünekliğini belirleyebilmek açısından çok önemli bir eksiktir. Bu çalışmada mevcut sorunu çözmeye yönelik önemli bir adım atılmış, önce kuvvet kontrollü olarak başlanılan analize, perde taşıma gücüne yaklaşıldığı bir safhadan sonra deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir. Betonun birim şekil değiştirmesi $\varepsilon_c = 0,04$ değerine kadar analize devam edilerek perde sünekliği hakkında doğru bilgilere ulaşılmıştır.
- Burulma etkisinin olmadığı U kesitli betonarme perdeler, y yönünde daha yüksek taşıma gücüne sahiptir. Model 9 analizinde basınca çalışan alan, Model 4 analizine göre daha büyük olduğundan perde daha yüksek taşıma kapasitesi verir.

Çizelge 5.1. Perdelerde M/T oranının karşılaştırılması

	ANSYS	KESİT ANALİZİ	ANSYS	KESİT ANALİZİ	ANSYS	KESİT ANALİZİ	TÜR
ϵ	$\epsilon_s = 0,0021$		$\epsilon_c = 0,0038$		$\epsilon_c = 0,046$		
M/T	5,53	10,64	5,53	11,82	5,32	4,31	Model 1
	9,66	16,76	9,61	15,77	8,72	5,51	Model 2
	10,37	9,52	10,34	11,43	11,05	5,06	Model 3
	-	-	-	-	-	-	Model 4
	13,29	17,63	13,28	17,97	13,45	7,71	Model 5
	-	-	-	-	-	-	Model 6
	32,62	35,93	31,63	36,84	19,92	11,37	Model 7
	9,77	15,14	9,77	15,90	10,04	5,71	Model 8
	-	-	-	-	-	-	Model 9
	11,08	15,69	11,19	15,51	12,56	9,52	Model 10

Çizelge 5.2. Perdelerde eğrilik değerlerinin karşılaştırılması

	ANSYS	KESİT ANALİZİ	ANSYS	KESİT ANALİZİ	ANSYS	KESİT ANALİZİ	TÜR
ϵ	$\epsilon_s = 0,0021$		$\epsilon_c = 0,0038$		$\epsilon_c = 0,046$		
Eğrilik (1/rad)	0,0019	0,0011	0,0023	0,0107	0,0176	0,0168	Model 1
	0,0014	0,0011	0,0029	0,0107	0,0267	0,0168	Model 2
	0,0022	0,0008	0,003	0,0033	0,0164	0,0177	Model 3
	0,0015	0,0009	0,0024	0,0106	0,0213	0,0208	Model 4
	0,0011	0,0009	0,0043	0,0106	0,0237	0,0208	Model 5
	0,0014	0,0011	0,0028	0,0107	0,0299	0,0168	Model 6
	0,0014	0,0009	0,0024	0,0024	0,0198	0,0172	Model 7
	0,0017	0,0009	0,0022	0,0024	0,0257	0,0172	Model 8
	0,0017	0,0014	0,0107	0,0028	0,0251	0,0172	Model 9
	0,002	0,0014	0,003	0,0028	0,0214	0,0172	Model 10

- U kesitli betonarme perdelerde M/T oranı kesme kuvvetinin perdedeki dağılımının belirlenmesinde önemli bir parametredir. SAP2000 'de yapılan kesit analizlerinden elde edilen M/T oranı, donatının akması ve betonun ezilmeye başlaması anlarında ANSYS 'e

göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Uygulanan kesme kuvvetinin perdenin kayma merkezine uzaklığı azaldıkça M/T oranı artmaktadır (Çizelge 5.1).

- U kesitli betonarme perdelerde farklı şekilde uygulanan kesme kuvveti etkisinde burulmanın olmadığı kesitler için eğrilik değeri daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre burulma etkisinin olmadığı perdeler daha sünek davranış sergilemektedir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.3. Perdelerde ötelenme oranlarının karşılaştırılması

ANSYS							
ε	$\varepsilon_s = 0,0021$		$\varepsilon_c = 0,0038$		$\varepsilon_c = 0,046$		TÜR
Yön	x	y	x	y	x	y	
Ötelenme Oranı	0,008	-	0,0091	-	0,0322	-	Model 1
	0,0057	-	0,0093	-	0,0423	-	Model 2
	0,0083	0,0004	0,0097	0,0003	0,0228	0,0046	Model 3
	0,0053	-	0,0062	-	0,0286	-	Model 4
	0,0025	-	0,0046	-	0,0163	-	Model 5
	0,0047	-	0,0067	-	0,0312	-	Model 6
	0,0013	0,0047	0,0016	0,0057	0,0072	0,0257	Model 7
	0,0067	0,0018	0,0083	0,0023	0,0430	0,0093	Model 8
	0,0062	-	0,0118	-	0,02	-	Model 9
	0,0041	-	0,0051	-	0,0135	-	Model 10

- Modeller arasında en az yatay ötelenme oranı Model 10, en fazla yatay ötelenme oranı Model 8 analizlerinden elde edilmiştir. Perdeler uygulanan kesme kuvvetinin yönüne ve değerine bağlı olarak ötelenme oranları değişiklik göstermektedir.

- Yalnız eğilme momenti etkisindeki U kesitli perdelerde (Model 6, Model 4 ve Model 9) doğrusal olmayan analizlerde meydana gelen deformasyon durumu, kesit analizi ile karşılaştırılabilirken, burulma momentinin de olduğu durumlarda kesit analizi perdedeki deformasyon durumunu yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Birim şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde kesitte birden fazla tarafsız eksen varmış gibi bir durumla

karşılaşmaktadır. Bu nedenle kesit analizleri sadece eğilme etkisindeki perdeler için yapılabilmektedir.

- U şekilli dikdörtgen olmayan betonarme perde duvarlarda, farklı şekillerde uygulanan kesme kuvvetleri etkisindeki nonlineer analizlerde, plastik kayma merkezi değişmemektedir. Perdenin teorik olarak hesaplanan kayma merkezi yeri ile gerçek davranışından elde edilen kayma merkezi yeri aynı olmaktadır. Nonlineer analizlerde de lineer durumda olduğu gibi kayma merkezi kesitin eğilme ve burulma davranışından bağımsızdır. Kayma merkezinin belirlenmesinde U kesitli betonarme perdenin iç kuvvetlerinin kayma merkezine göre momenti M_{KM} hesaplanarak, elde edilen değer, bileşke kuvvetin kayma merkezine göre hesaplanan momentine bölünür.

KAYNAKLAR

- Akış, T., 2004. Lateral load analysis of shear wall-frame structures. PhD Thesis, Department of Engineering Sciences, The Middle East Technical University, Ankara.
- Arslan, G., 2004. Yalnız çekme donatılı betonarme kirişte sonlu eleman boyutunun yük taşıma kapasitesi tahminine etkisinin Drucker-Prager ve çatlak modelleri ile karşılaştırılması. *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, (3), 34-42.
- Bessason, B. and Sigfusson, T., 2001. Capacity and earthquake response analysis of re-shear waals, Nordic Concrete Research. The Nordic Concrete Federation, 27, (2), 1-14.
- Beyer, K., Dazio, A. and Priestley, M.J.N., 2008a. Inelastic wide-column models for u-shaped reinforced concrete walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (S1), 1-33.
- Beyer, K., Dazio, A. and Priestley, M.J.N., 2008b. Quasi-static cyclic tests of two u shaped reinforced concrete walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (7), 1023- 1053.
- Beyer, K., Dazio, A. and Priestley, M.J.N. 2008c. Elastic and inelastic wide-column models for RC nonrectangular walls. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Boresi, A.P., Schmidt, R.J. and Sidebottom, O.M., 1993. *Advanced mechanics of materials*. USA.
- Brueggen, B., Waugh, J., Aaleti, S., Johnson, B., French, C., Sritharan, S., and Nakaki, S., 2007. Tests of structural walls to determine deformation contributions of interest for performance-based design. *Structural Engineering Research*, (249), 6, 1-16.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1998. Perdeler. *Betonarme Yapılar*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 271-284.
- Costantin, R. and Beyer, K., 2012. Modelling of reinforced concrete core walls under bi-directional loading. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, Switzerland.
- DBYBHY, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Dede, F.T., 2006. Tersinir-tekrarlanır yükleme altındaki betonarme çerçevelerin ansys programı ile nonlinear sonlu eleman analizi. *Y.Lisans Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Erduran, E. ve Yakut, A., 2004. Drift based damage functions for reinforced concrete columns. *Computers and Structures*, Vol82, 121-130.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G., 2001. *Betonarme*. Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Fanning, P., 2001. Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2, (2001), 111-119.
- Hagen, G.R., 2012. Performance-based analysis of a reinforced concrete shear wall building. PhD Thesis, Department of Engineering Sciences, California Polytechnic University, San Luis Obispo.

- Kazaz, İ. ve Gülkan, P., 2012. Süneklik düzeyi yüksek betonarme perdelerdeki hasar sınırları. İMO Teknik Dergi, 387, 6113-6140.
- Kazaz, İ., 2010. Dynamic characteristics and performance assessment of reinforced concrete structural walls. PhD Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
- Köksal, O. ve Doran B., 1997. Beton ve betonarme elemanlarda doğrusal olmayan oktahedral elastik ve plastik bağıntılar kullanılarak yapılan sonlu eleman uygulamaları. İMO Teknik Dergi, 1445-1455.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., 1988. Observed stress-strain behaviour of confined concrete. Journal of Structural Engineering, ASCE, 114 (8), 1827-1849.
- Maruta, M., Suzuki, N., Miyashita, T., Nishioka, T., 2000. Structural capacities of h-shaped rc core wall subjected to lateral load and torsion. 12WCEE2000, Japan.
- Miller, C., Hofmayer, C., Wang, Y., Chokshi, N., Murphy, A., Kitada, Y., 2001. Prediction of nupec's multi-axis loading tests of concrete shear walls. Conference Transactions. International Association For Structural Mechanics In Reactor Technology SMiRT 16, Washington DC.
- Ngo, D. and Scordelis, A.C., 1967. Finite element analysis of reinforced concrete beams. American Concrete Institute, 64, (3), 152-163.
- Palermo, D. and Vecchio, F.J., 2002. Behavior of three-dimensional reinforced concrete shear walls. ACI Structural Journal, 99 (1), 81-89.
- Saatcioglu, M. ve Razvi, S.R., 1992. Strength and ductility of confined concrete. Journal of Structural Engineering, 118 (6), 1590-1607.
- Sanghavi, M.V.S., 2012. Torsional analysis of a composite I-beam. PhD Thesis, Master of Science in Mechanical Engineering, Texas.
- Seaburg, P.A. and Carter, C.J., 2003. Torsional analysis of structural steel member. Steel Design Guide Series. American Institute of Steel Construction.
- Sheikh, S.A. and Üzümeri, S.M., 1982. Analytical model for concrete confinement in tied columns. ASCE Journal of the Structural Division, 108 (12), 2703-2722.
- Sivri, M., 2011. Betonarme güçlendirme perdelerinin doğrusal olmayan davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Uysal, H., Aşçı, N., Uzman, Ü., 2004. Düzlem elastisite problemi olarak ele alınan bir kirişin yapısal şekil optimizasyonu. Advances in Civil Engineering, 6th International Conference, İstanbul.
- Vecchio F.J. and Collins M.P., 1986. Modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal, 83 (22), 219-231.
- Willam, K.J. and Warnke, E.D., 1975. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. Intl. Assoc. Bridge Struct. Eng. Proc, 19, 174-203.

ÖZGEÇMİŞ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU, 1989 yılında Trabzon'da doğdu. 2008 yılında Tefvik Serdar Anadolu Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında fakülte birincisi olarak mezun oldu. 2012 yılında 'Dikdörtgen Kesitli Olmayan Perdelerin Davranışı ve Tasarım Esasları'konulu Yüksek Lisans çalışmasına başladı.