

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİGMA KESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN EKSENEL VE EKSANTRİK YÜKLEME
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Ferhan ÖZTÜRK

**HAZİRAN 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİGMA KESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN EKSENEL VE EKSANTRİK YÜKLEME
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

İnş.Yük.Müh. Ferhan ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 / 04 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 08 / 06 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim PUL

İkinci Danışman Assoc. Prof. Iman HAJIRASOULIHA

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Akademik yaşantıma yüksek lisans tez danışmanım olarak çok önemli katkılar sağlayan, ardından doktora tezimde de bana beraber çalışma fırsatı sunan, deneysel ve teorik bilgi birikimi ve yardımsever tutumuyla bu tezde yer alan çalışmaların tamamlanmasında büyük emeği geçen çok kıymetli hocam Prof. Dr. Selim PUL'a ve eş danışmanım olarak akademik yazımlarımda bana değerli katkılar sağlayan Dr. Iman HAJIRASOULIHA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışması kapsamında, özellikle deneysel çalışmaların yapılmasına “1002 Hızlı Destek Programı” kapsamında 119M771 proje numarası altında maddi olanak sağlayan TÜBİTAK'a, bu proje kapsamındaki deneysel çalışmaların yürütülmesinde yoğun emeği geçen Dr. Mehmet ŞENTÜRK'e ve malzeme deneylerinin gerçekleştirilmesi konusunda değerli katkılarda bulunan MATİL A.Ş. Mekanik Test Laboratuvarı sorumlusu Alper BAYRAK'a minnetlerimi sunarım.

Son olarak, üzerimde sonsuz katkıları ve destekleri olan sevgili aileme ve bu süreçteki sonsuz anlayışından ve desteğini bir kez olsun esirgemeyen canım eşim Aslıhan ERDEM ÖZTÜRK'e, çok teşekkür ederim.

Ferhan ÖZTÜRK

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Sigma Kesitli Hafif Çelik Profillerin Eksenel ve Eksantrik Yükleme Altındaki Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanlarım Prof. Dr. Selim PUL ve Dr. İman HAJIRASOULIHA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08/06/2021

Ferhan ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	IX
TABLolar LİSTESİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	4
1.1.1. Hafif Çelik Profillerde Burkulma	4
1.1.2. Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar	6
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	15
2.1. Deneylerde Kullanılacak Numunelerin Enkesit ve Boylarının Belirlenmesi... 17	
2.2. Deneysel Çalışmalar	22
2.2.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	22
2.2.2. Sigma Profillerin Üretimi ve Deneye Hazırlanması.....	29
2.2.3. Sigma Profiller Üzerinde Deneyler	32
2.2.3.1. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemi.....	33
2.2.3.2. Monotonik Deneylerde Uygulanan Yükleme.....	43
2.2.3.3. Tersinir-Tekrarlı Deneylerde Uygulanan Yükleme.....	43
2.3. Sonlu Eleman Analizleri.....	44
2.3.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	44
2.3.2. Sonlu Eleman Tipi ve Sonlu Eleman Ağı.....	45
2.3.3. Yükleme ve Mesnet Koşulları	46
2.3.4. Geometrik Ön Kusurların Belirlenmesi.....	47
2.4. Sigma Profiller Üzerinde Parametrik Çalışma	49
2.4.1. Malzeme Modeli.....	50
3. BULGULAR VE İRDELEME.....	52
3.1. Monotonik Deney Sonuçları.....	53
3.1.1. L=500 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları	55

3.1.2.	L=1000 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları	63
3.1.3.	L=1500 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları	70
3.2.	Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları	78
3.2.1.	L=500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları.....	80
3.2.2.	L=1000 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları.....	89
3.2.3.	L=1500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları.....	97
3.3.	Sonlu Eleman Modellerinin Deneylerle Doğrulanması	105
3.4.	Monotonik Sonlu Eleman Analizi Sonuçları.....	109
3.4.1.	L=500 mm'lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları.....	109
3.4.2.	L=1000 mm'lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları.....	114
3.4.3.	L=1500 mm'lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları.....	118
3.5.	Tersinir-Tekrarlı Sonlu Eleman Analizi Sonuçları.....	123
3.5.1.	L=500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları.....	123
3.5.2.	L=1000 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları.....	131
3.5.3.	L=1500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları.....	140
3.6.	Monotonik Yüklenen Numunelerin Davranışlarının Karşılaştırılması	148
3.7.	Tersinir-Tekrarlı Yüklenen Numunelerin Karşılaştırılması	158
3.8.	Parametrik Çalışma	167
3.8.1.	Deney Numuneleri Üzerinde Yürütülen Parametrik Çalışma	167
3.8.1.1.	L=500 mm'lik Elemanlar	169
3.8.1.2.	L=1000 mm'lik Elemanlar	172
3.8.1.3.	L=1500 mm'lik Elemanlar	175
3.8.2.	Farklı Kesitli Sigma Profiller Üzerinde Yürütülen Parametrik Çalışma.....	178
3.8.2.1.	L=500 mm'lik Sigma Profillerin Sonuçları.....	181
3.8.2.2.	L=2000 mm'lik Sigma Profillerin Sonuçları.....	184
3.8.2.3.	Sigma Profillerin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	186
3.6.2.4.	Parametrik Çalışma Sonuçlarının AISI-S100-12'e göre Karşılaştırılması.....	189
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	193
5.	KAYNAKLAR.....	199
6.	EKLER	201

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

SİGMA KESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN EKSENEL VE EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ferhan Öztürk

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Selim PUL
Eş Danışman: Dr. İman HAJIRASOULIHA
2021, 203 Sayfa

Sigma profillerle ilgili deneysel çalışmaların daha çok monotonik yüklemeler altında gerçekleştirilmiş olması nedeniyle bu çalışmada tersinir-tekrarlı yükler altındaki hafif çelik sigma profillerin aksenal yükleme, bir ve iki aksenli eğilme altındaki dayanım, enerji tüketme ve süneklik gibi karakteristik davranışları incelenmiştir. Enkesitin yük taşıma kapasitesini belirleyen yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modları ve bu burkulma modlarının görüldüğü kritik boy ve yük katsayılarına göre sigma profil kesit ve boyları belirlenmiştir. Boyları 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm olarak belirlenen numuneler üzerinde 45 adedi monotonik, 45 adedi de tersinir-tekrarlı olmak üzere toplam 90 adet yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Malzeme pekleşme parametreleri deneysel olarak belirlendikten sonra ABAQUS yazılımında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile monotonik ve tersinir-tekrarlı yükler altındaki sayısal ve deneysel davranışlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, iki farklı parametrik çalışma ile monotonik yükleme altında gerçekleştirilen 2555 adet analiz sonucunda sigma profillerin dayanım uzayları belirlenmiş, profil dayanımları AISI-S100-12 yönetmeliği ile karşılaştırılmıştır. Buna göre, AISI yönetmeliğinin mevcut haliyle daha korumacı olduğu ve profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu elemanların dayanımlarının hesaplanması bakımından geliştirilme potansiyelinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tersinir-tekrarlı deneysel ve sayısal çalışmalarda genellikle, P numunelerinin enerji tüketme kapasitelerinin N numunelerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Tersinir-tekrarlı yükler altında enerji sönümleyebildiklerinden, daha farklı tipe ve kesit narinlik oranına sahip sigma profiller üzerinde tersinir-tekrarlı yükler altında, dayanım ve rijitlik kaybının karakterize edilerek kapsayıcı zarf eğrilerinin oluşturulması, bu profillerin hafif çelik yapılarda daha yaygın kullanımlarının önünü açacaktır.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik, sigma profil, monotonik yükleme, tersinir-tekrarlı yükleme, sonlu eleman analizi, Abaqus, CUFSM

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF COLD FORMED SIGMA PROFILES BEHAVIOUR UNDER AXIAL AND ECCENTRIC LOADING

Ferhan Öztürk

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Program
Supervisor: Prof. Dr. Selim PUL
Co-supervisor: Assoc. Prof. Iman HAJIRASOULIHA
2021, 203 pages

In this study, characteristic behaviours of cold formed sigma profiles such as ductility, energy dissipation, load carrying capacity under axial load, major, minor and biaxial moment cyclic loadings were investigated due to the fact that experimental studies in literature are mainly performed on monotonic loadings. Sigma profile's cross-section and lengths are determined according to critical buckling modes of local, distortional or global that determines load carrying capacity of cross-section and critical half wave lengths and buckling load factors corresponding to buckling modes. A total of 90 experiments composed of 45 monotonic loading and 45 cyclic loading on cold formed sigma profiles with determined lengths of 500 mm, 1000 mm and 1500 mm. On determining hardening parameters experimentally, experimental and numerical behaviours under monotonic and cyclic loading compared using analysis results performed by ABAQUS software. Moreover, with two parametric study, sigma profile's stability space determined by a number of 2555 finite element analysis performed under monotonic loading and load capacities compared with AISI-S100-12 standard. Accordingly, it is concluded that AISI standard in current status is quite conservative and it has higher potential for improvement for profiles whose lips are in tension stress. It is observed that generally in numerical and experimental studies under cyclic loading, energy dissipation capacity of samples with their lips in tension are higher than those samples with lips in compression. Due to the fact that they can dissipate energy, sigma profiles with different cross-sections and slenderness under cyclic loadings can be characterized for stiffness and strength degradation and their usage in buildings could be increased by creating envelope curves.

Keywords: Cold-formed steel, sigma profile, monotonic loading, cyclic loading, finite element analysis, Abaqus, CUFSM

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Bazı hafif çelik profil tipleri ve enkesit elemanları	1
Şekil 2. Hafif çelik profil üretim şeması ve roll-form tekniğiyle büküm aşamaları.....	2
Şekil 3. Hafif çelik kafes kirişler	3
Şekil 4. Hafif çelik endüstriyel yapı çerçeveleri ve duvar elemanları.....	3
Şekil 5. Hafif çelik profillerdeki burkulma modları (Zeinoddini ve Schafer, 2012).....	4
Şekil 6. Hafif çelik profillerde tasarım kriterleri (Thomas vd., 2013).....	5
Şekil 7. Eksantrisitenin kuvvetli ve zayıf eksenlerde etkisi (Miller ve Peköz,1994)	6
Şekil 8. Deney numunesi ve sonlu eleman modeli (Young ve Hancock, 2003)	7
Şekil 9. Deney düzeneği (Young ve Hancock, 2003).....	8
Şekil 10. Kuvvetli eksen eğilmesi (a), Zayıf eksen eğilmesi (pozitif yön) (b), Zayıf eksen eğilmesi (negatif yön) (c) (Li vd., 2014)	8
Şekil 11. Tersinir-tekrarlı yükleme altında burkulma (Padilla-Llano ve diğ., 2014)	9
Şekil 12. Kolon-Kiriş deney düzeneği (Torabian vd., 2015).....	10
Şekil 13. Z kesitli numunelerin davranışları (Torabian vd., 2016)	11
Şekil 14. Flanş genişliği farklı kolonların kapasite-narinlik değişimi (El Aghoury vd., 2017).....	11
Şekil 15. Eigenmod ön kusurların burkulmada etkileri (Sadovskýa ve Kriváček, 2018)	12
Şekil 16. Hafif profil kesit tipleri ve enerji sönümleme kapasiteleri (Ye vd., 2018)	12
Şekil 17. Normalleştirilmiş P-M1-M2 uzayı ve dayanım yüzeyleri (Torabian ve Schafer, 2018).....	13
Şekil 18. Farklı boylarda elips kesitli elemanların etkileşim eğrilerinin karşılaştırılması (Chen ve Young, 2020)	14
Şekil 19. Seçilen deney profilinin enkesit boyutları (a) ve enkesitte cFSM analizi ile belirlenen gerilmeler (b)	20
Şekil 20. Çeşitli yükleme durumları için cFSM analizi sonuçları (Lcrl ve Lcld)	21
Şekil 21. Monotonik çekme kupon numunelerinin ölçüleri ve görünüşü.....	22
Şekil 22. Monotonik çekme deneylerine ait ortalama gerilme-şekildeğiştirme eğrisi	23
Şekil 23. İtme-çekme numunelerinin ölçüleri ve burkulma engelleyici düzenek ve deney anından bir görünüm	24
Şekil 24. İtme-çekme deneylerinde uygulanan yerdeğiştirme – zaman grafiği	25
Şekil 25. İtme-çekme kupon deneylerine ait ortalama gerilme-şekildeğiştirme eğrisi	25
Şekil 26. İzotrop ve kinematik pekleşme modelleri (ABAQUS user's Manual)	26

Şekil 27. İtme-çekme kupon numune için deney ve ABAQUS eğrilerinin karşılaştırılması	28
Şekil 28. Sigma profillerin üretimi ve topluca görünümü	29
Şekil 29. Profil başlık levhalarının ölçüleri, CNC plazmada kesilmeleri ve görünüşleri	30
Şekil 30. Profillerin kaynaklama bölgesinde asit banyosu işlemi	31
Şekil 31. Profil - başlık levhası kaynak dikişleri	31
Şekil 32. Sigma profil deney numuneleri (L=500 mm, 1000 mm ve 1500 mm)	31
Şekil 33. Deneysel çalışmada profillere uygulanacak yükleme noktaları	32
Şekil 34. Deney düzeneğinin genel görünüşleri yükleme levhalarının ölçüleri	35
Şekil 35. Profil numunelerin yükleme numarasına göre yükleme levhalarındaki konumları.....	36
Şekil 36. Yükleme levhalarının karşı ağırlıkla dengelenmesi	37
Şekil 37. Deney düzeneğinin numune boyuna göre ayarlanmış durumları	38
Şekil 38. Kullanılan deneysel ekipmanlar: (a) yük hücresi, (b)LPDT'ler, (c) veri toplayıcı ve (d) deney kontrol kutusu	39
Şekil 39. Profile silikonla yapıştırılan plastik mafsallar ve deney anından bir görünüşleri	39
Şekil 40. Profillerde LPDT yerleşimi: a) Gövdeden okuma, b) Gövde ve flanştan Okuma.....	40
Şekil 41. Yükleme levhalarına bağlanan LPDT'lerin yerleşimi	41
Şekil 42. Profil yükleme deneylerinden görünüşler	42
Şekil 43. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü	43
Şekil 44. S9R5 kabuk sonlu elemanı (ABAQUS user's manual).....	45
Şekil 45. Modellemede uygulanan sonlu eleman ağı	46
Şekil 46. Sonlu eleman modeli ve mesnet koşulları	47
Şekil 47. CUFSM'de enkesitteki gerilme durumu	48
Şekil 48. CUFSM'den elde edilen yerel ve çarpılmalı burkulma modları	49
Şekil 49. Parametrik çalışmada yükleme noktaları	50
Şekil 50. Deneysel ve gerçek gerilme - şekildeğiştirme eğrileri	50
Şekil 51. Simetrik yükleme noktaları için profil konumları	52
Şekil 52. Monotonik yükleme deneylerinden görünüşler	54
Şekil 53. L=500 mm'lik numunelerin monotonik deneyler sonrası görünüşü	55
Şekil 54. M.500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	56
Şekil 55. M.500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	56
Şekil 56. M.500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	56

Şekil 57. M.500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	57
Şekil 58. M.500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	58
Şekil 59. M.500.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	59
Şekil 60. M.500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	60
Şekil 61. M.500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	61
Şekil 62. M.500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	62
Şekil 63. L=1000 mm’lik numunelerin deney sonrası görünüm	63
Şekil 64. M.1000.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	64
Şekil 65. M.1000.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	64
Şekil 66. M.1000.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	64
Şekil 67. M.1000.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	65
Şekil 68. M.1000.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	66
Şekil 69. M.1000.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	67
Şekil 70. M.1000.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	68
Şekil 71. M.1000.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	69
Şekil 72. M.1000.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	70
Şekil 73. L=1500 mm’lik numunelerin deney sonrası görünüm	71
Şekil 74. M.1500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	72
Şekil 75. M.1500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	72
Şekil 76. M.1500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	72
Şekil 77. M.1500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	73
Şekil 78. M.1500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	74
Şekil 79. M.100.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	75
Şekil 80. M.1500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	76
Şekil 81. M.1500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	77
Şekil 82. M.1500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	78
Şekil 83. Tersinir-tekrarlı yükleme deneylerinden görünümeler	79
Şekil 84. Tersinir-tekrarlı yükleme altındaki numunenin ilk 6 çevrimdeki yük yerdeğiştirme	80
Şekil 85. L=500 mm’lik numunelerin tersinir-tekrarlı deneyler sonrası görünüşleri.....	81
Şekil 86. C.500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı	82
Şekil 87. C.500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	82
Şekil 88. C.500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	82

Şekil 89. C.500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	83
Şekil 90. C.500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	84
Şekil 91. C.500.100.60.P numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	85
Şekil 92. C.500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	86
Şekil 93. C.500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	87
Şekil 94. C.500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	88
Şekil 95. 1000 mm'lik tersinir tekrarlı yükleme numunelerinin deney sonrası görünüşü	89
Şekil 96. C.1000.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	90
Şekil 97. C.1000.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	90
Şekil 98. C.1000.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	90
Şekil 99. C.1000.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	91
Şekil 100. C.1000.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	92
Şekil 101. C.1000.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	93
Şekil 102. C.1000.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı....	94
Şekil 103. C.1000.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	95
Şekil 104. C.1000.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı....	96
Şekil 105. 1500 mm'lik tersinir-tekarlı yükleme altındaki numunelerin deney sonrası görünüşler	97
Şekil 106. C.1500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	98
Şekil 107. C.1500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	98
Şekil 108. C.1500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	98
Şekil 109. C.1500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	99
Şekil 110. C.1500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	100
Şekil 111. C.1500.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	101
Şekil 112. C.1500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı....	102
Şekil 113. C.1500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı.....	103
Şekil 114. C.1500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı....	104
Şekil 115. L=500 mm boyundaki iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	106
Şekil 116. L=1000 mm boyundaki iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	107
Şekil 117. L=1500 mm boyundaki iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	108
Şekil 118. M.500.0.0, M.500.0.180 ve M.500.0.360 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonuçları	109

Şekil 119. M.1000.50.90 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	110
Şekil 120. M.1000.100.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	111
Şekil 121. M.1000.100.60 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	111
Şekil 122. M.1000.100.180 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	112
Şekil 123. M.1000.200.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	113
Şekil 124. M.1000.200.120 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	113
Şekil 125. M.1000.0.0, M.1000.0.180 ve M.1000.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizi sonuçları	114
Şekil 126. M.1000.50.90 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	115
Şekil 127. M.1000.100.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	115
Şekil 128. M.1000.100.60 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	116
Şekil 129. M.1000.100.180 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	116
Şekil 130. M.1000.200.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	117
Şekil 131. M.1000.200.120 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu	118
Şekil 132. M.1500.0.0, M.1500.0.180 ve M.1500.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizi sonuçları	119
Şekil 133. M.1500.50.90 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	120
Şekil 134. M.1500.100.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	120
Şekil 135. M.1500.100.60 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	121
Şekil 136. M.1500.100.180 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	121
Şekil 137. M.1500.200.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	122
Şekil 138. M.1500.200.120 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu	123
Şekil 139. C.500.0.0 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu	124
Şekil 140. C.500.0.180 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu	124
Şekil 141. C.500.0.360 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu	125
Şekil 142. C.500.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları ..	126
Şekil 143. C.500.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları ..	127
Şekil 144. C.500.100.60 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları ..	128
Şekil 145. C.500.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	129
Şekil 146. C.500.200.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları ..	130
Şekil 147. C.500.200.120 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	131
Şekil 148. C.1000.0.0 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	132

Şekil 149. C.1000.0.180 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları...	133
Şekil 150. C.1000.0.360 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları...	133
Şekil 151. C.1000.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	134
Şekil 152. C.1000.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	135
Şekil 153. C.1000.100.60 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	136
Şekil 154. C.1000.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	137
Şekil 155. C.1000.200.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu.....	138
Şekil 156. C.1000.200.120 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu.....	139
Şekil 157. C.1500.0.0 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları.....	140
Şekil 158. C.1500.0.180 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları...	141
Şekil 159. C.1500.0.360 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları...	141
Şekil 160. C.1500.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	142
Şekil 161. C.1500.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	143
Şekil 162. C.1500.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	144
Şekil 163. C.1500.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	145
Şekil 164. C.1500.200.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	146
Şekil 165. C.1500.200.120 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları	147
Şekil 166. L=500 mm'lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması ...	149
Şekil 167. L=1000 mm'lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması .	150
Şekil 168. L=1500 mm'lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması .	151
Şekil 169. Süneklik oranının belirlenmesi (Park, 1989).....	153
Şekil 170. Monotonik yüklenen bazı M500 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	155
Şekil 171. Monotonik yüklenen bazı M1000 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	156
Şekil 172. Monotonik yüklenen bazı M1500 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	157
Şekil 173. C500 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	159
Şekil 174. C1000 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması .	160
Şekil 175. C1500 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması .	161
Şekil 176. Bir çevrimde tüketilen enerji miktarının hesaplanması.....	164

Şekil 177. Tersinir-tekrarlı yükleme analizlerine göre C numunelerinin enerji tüketimi	166
Şekil 178. Parametrik çalışmadaki modelin mesnet koşulları (a) ve1 yükleme noktaları(b)	168
Şekil 179. M500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri	170-171
Şekil 180. L=500 modelinin dayanım uzayı	172
Şekil 181. M1000 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri	173-174
Şekil 182. L=1000 modelinin dayanım uzayı	175
Şekil 183. M1500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri	176-177
Şekil 184. L=1500 modelinin dayanım uzayı	178
Şekil 185. Analiz edilen sigma profillerin kesit özellikleri	179
Şekil 186. Eksantrik yükleme doğrultuları ve yükleme noktaları	180
Şekil 187. Seçilen kesitlerin yerel ve çarpılma burkulması narinliklerinin dağılımı	181
Şekil 188. S260-3.0 numunesinin M1 - M4 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	182
Şekil 189. S260-3.0 numunesinin M5 – M7 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	182
Şekil 190. S300-3.0 numunesinin M1 - M4 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	184
Şekil 191. S300-3.0 numunesinin M5–M7 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	184
Şekil 192. M1 ve M7 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları , L=500 mm	186
Şekil 193. M2 ve M6 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=500 mm	187
Şekil 194. M5 ve M3 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=500 mm	187
Şekil 195. M4 doğrultusundaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=500 mm	187
Şekil 196. M1 ve M7 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları , L=2000 mm	188
Şekil 197. M2 ve M6 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=2000 mm	188
Şekil 198. M5 ve M3 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=2000 mm	189
Şekil 199. M4 doğrultusundaki normalleştirilmiş kapasite oranları, L=2000 mm	189
Şekil 200 AISI-S100-12'ye göre β_{AISI} 'nin hesaplanma yöntemi	190
Şekil 201 Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre β_{FEM} 'in hesaplanma yöntemi	191

TABLolar LİSTESİ

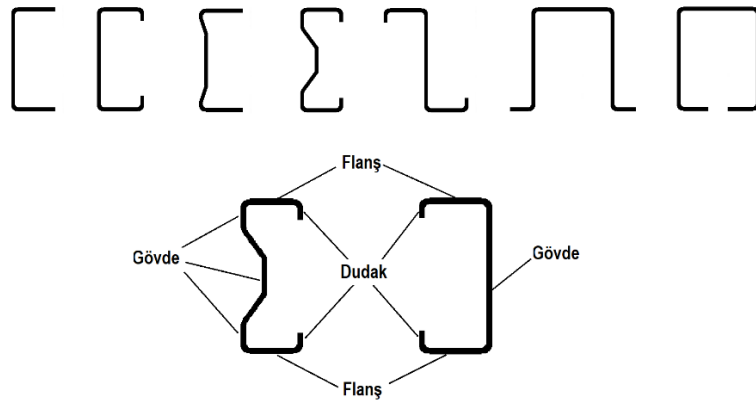
Sayfa No

Tablo 1. Bazı sigma profiller üzerinde cFSM modülü ile yapılan ön çalışma sonuçları ..	19
Tablo 2. Monotonik çekme deney sonuçları	23
Tablo 3. İtme-çekme kupon deney sonuçlarından hesaplanan pekleşme parametreleri ...	28
Tablo 4. Deneyssel çalışmada profillere uygulanan yüklemelerin detayı	33
Tablo 5. Ön kusur büyüklükleri (Zeinoddini ve Schafer, 2012)	44
Tablo 6. Profillere uygulanan yükleme noktalarının eksantrisiteyi	51
Tablo 7. Deneylerde yükleme noktalarına karşılık gelen numune etiket kodları	53
Tablo 8. Bazı monotonik deney ve sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması	105
Tablo 9. Monotonik yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından elde edilen yük kapasiteleri ve tüketilen enerji değerleri.....	152
Tablo 10. Monotonik yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından belirlenen süneklik oranları	154
Tablo 11. Tersinir-tekrarlı yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından elde edilen yük kapasiteleri ve birbirine oranları.....	162
Tablo 12. Tersinir-tekrarlı yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından belirlenen süneklik oranları	163
Tablo 13. Parametrik modellemede uygulanan yükleme noktaları ve koordinatları.....	168
Tablo 14. Eksenel yük altındaki iki ucu mafsallı Sigma profilin (S) kesit ölçüleri, kritik burkulma boyları ve kritik yük faktörleri.....	179
Tablo 15. Eksenel yük ve eğilme momenti uygulanan eksantrisiteler noktaları	180
Tablo 16. 500 mm'lik Sigma profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri	183
Tablo 17. 2000 mm'lik sigma profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri ..	185-186
Tablo 18. L=500 mm numunelerinin analiz sonuçlarının AISI ile karşılaştırılması.....	192
Tablo 19. L=2000 mm numunelerinin analiz sonuçlarının AISI ile karşılaştırılması	193

1. GENEL BİLGİLER

Soğuk şekillendirilmiş profiller kullanılarak üretilen hafif çelik yapılar konusunda bilgi ve deneyim birikimi 20. Yüzyıl başlarında uçak endüstrisinin, mümkün olduğunca hafif ancak, taşıma kapasitesi de yüksek taşıyıcı elemanlara ihtiyaç duyması ile başlamıştır. Bu alanda çalışmaların hızlanmasına neden olan ikinci büyük etken ise otomobil endüstrisindeki gelişmelerdir. I. Dünya Savaşı sırasında, otomobil gövdelerinin ve demiryolu vagonlarının üretiminde soğuk şekillendirilmiş çelik sac elemanlar kullanılmıştır. Uçak ve otomobil endüstrisinin sayesinde ulaşılan bu birikimler soğuk şekillendirilmiş çelik taşıyıcı elemanların yapı endüstrisinde de yaygın şekilde kullanılmasının yolunu açmıştır.

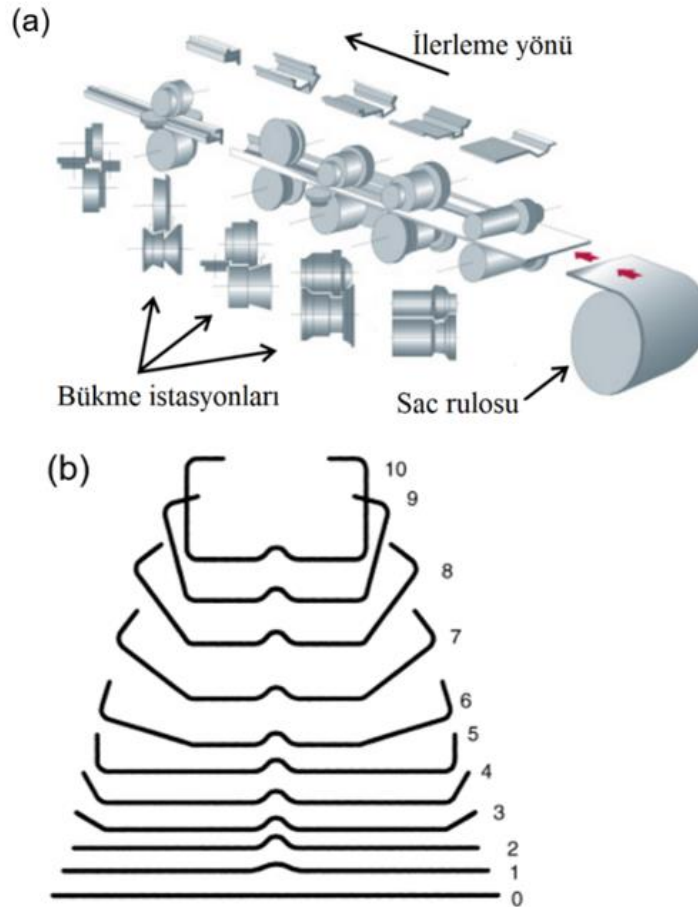
Dünya çelik yapı sektörünün bir kolu olarak, soğuk şekillendirilmiş hafif çelik profil kullanımı yaklaşık 40 yıldan bu yana giderek artan biçimde yaygınlaşmaktadır. Bu kullanım artışı ülkemiz için de geçerlidir. Hafif çelik profillerin kullanımındaki ve çeşitliliğindeki hızlı artışın başlıca nedenleri arasında kısa sürede çok farklı kesit şekillerinde üretilebilmesi, hafifliği ve dayanım/ağırlık oranı gibi nedenler sıralanmaktadır. Bu profillerin yükseklikleri genellikle 50–300 mm arasında, kalınlıkları ise 1–6 mm arasında olmakla birlikte, bu boyutlar dışındaki kesitler de istek üzerine imal edilebilmektedir. Uygulamada en çok kullanılmakta olan hafif profil kesit tiplerinden bazıları ve enkesit elemanlarının adlandırılmaları Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Bazı hafif çelik profil tipleri ve enkesit elemanları

Çoğunlukla galvanizli olarak rulo halinde makinenin bir ucundan gönderilen çelik sac, ard arda sıralanmış farklı tipte tekerlekler şeklindeki kalıpların (istasyonlar) arasından geçirilirken kademeli olarak bükülme ve istenen enkesit şeklini almaktadır. Bu üretim tekniği “roll-form” olarak da adlandırılmaktadır. Hafif çelik profillerin tipik üretim şeması ve düz sacın roll-form tekniğiyle büküm aşamaları Şekil 2’de verilmektedir.

Hafif profillerin geçmişteki kullanımı genellikle ağırlıktan tasarruf sağlanması gereken durumlarla sınırlı olmuştur. Ancak zamanla malzemede ve üretim sürecinde yaşanan gelişmeler sayesinde bu profillerin güncel ve potansiyel kullanım alanlarının sınırları oldukça genişlemiştir. Hafif profiller çoğunlukla kolon, kiriş, duvar ve kafes sistem gibi taşıyıcı elemanların teşkilinde, tekli ya da bileşik olarak kullanılmaktadır. Bu profillerle oluşturulabilen taşıyıcı sistemlerle ilgili bazı örnekler aşağıdaki Şekil 3 ve Şekil 4’te verilmektedir.



Şekil 2. Hafif çelik profil üretim şeması (a) ve roll-form tekniğiyle büküm aşamaları (b)



Şekil 3. Hafif çelik kafes kirişler

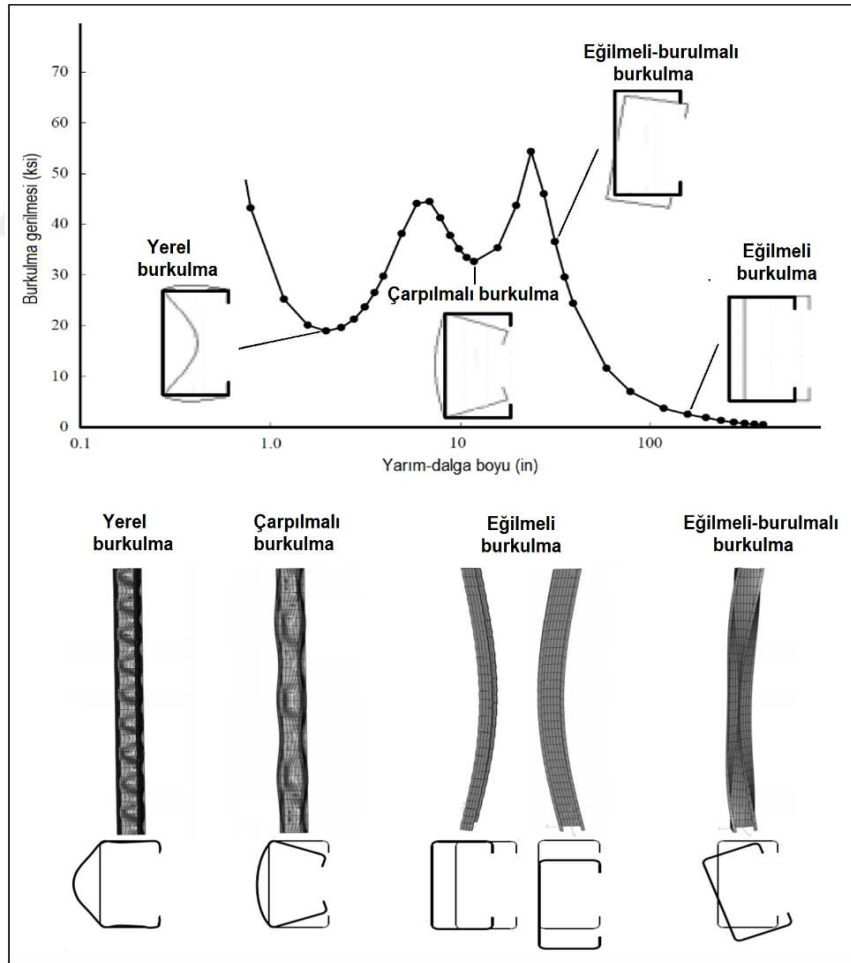


Şekil 4. Hafif çelik endüstriyel yapı çerçeveleri ve duvar elemanları

1.1. Giriş

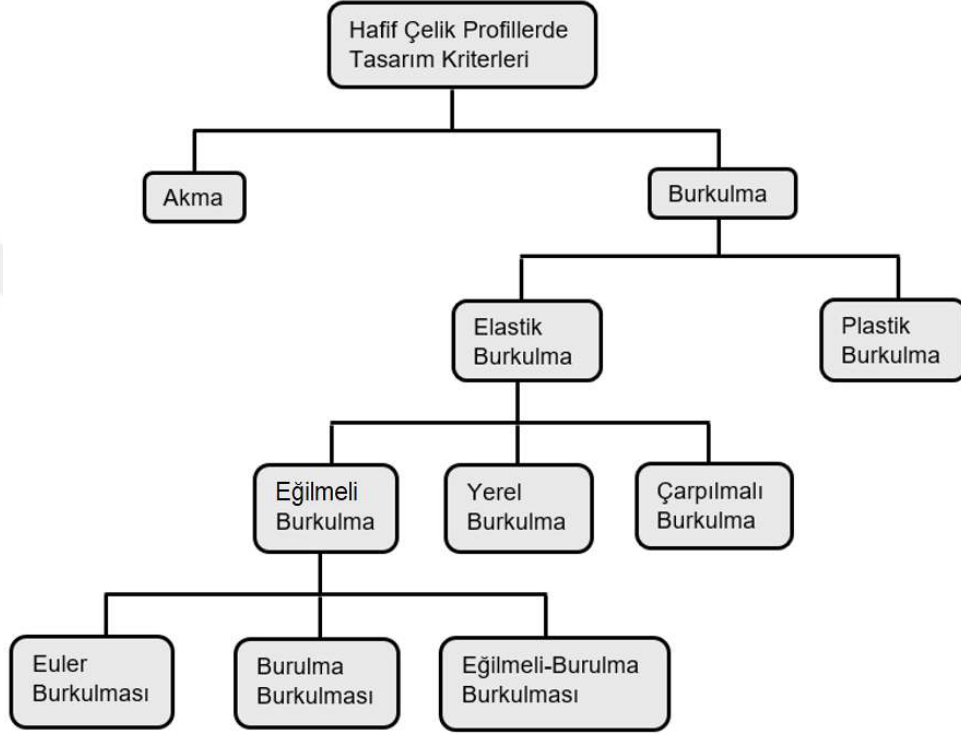
1.1.1. Hafif Çelik Profillerde Burkulma

Hafif çelik profillerin düşük kalınlık/genişlik oranına sahip yapıları, stabilite ile ilgili çeşitli problemleri beraberinde getirmektedir. Bunların başında Şekil 5'te verilen yerel, çarpılmalı ve genel (eğilmeli ya da eğilmeli burulmalı) burkulma durumları gelmektedir. Yerel burkulma, düz kalan komşu iki köşe hattı arasındaki levhanın eğilmesiyle oluşmaktadır. Çarpılmalı burkulma ise berkitmeli (desteklenmiş) dudakların flanş-gövde kesişim hattı etrafında dönmesiyle oluşmaktadır.



Şekil 5. Hafif çelik profillerdeki burkulma modları (Zeinoddini ve Schafer, 2012)

Ayrıca, bu burkulmalar genellikle kesiti akmaya ulaştıran gerilmelerden daha düşük basınç, ezilme ve kesme kuvvetleri uygulandığında ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, hafif çelik profillerin tasarımındaki en önemli unsur, sıcak hadde profillerin aksine, profillerde meydana gelen burkulma olmaktadır. Şekil 6’da bu profillerin tasarım kriterleri özetlenmiştir (Thomas vd., 2013).



Şekil 6. Hafif çelik profillerde tasarım kriterleri (Thomas vd., 2013)

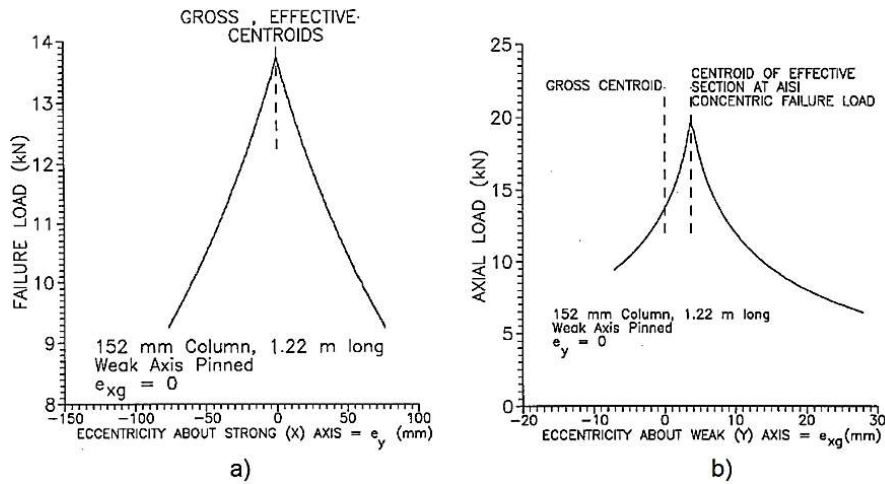
Hafif çelik profillerin yapılarda kullanımı, beraberinde bu tür yapıları özellikle deprem yükleri altında analiz edebilecek yöntemlerin ve tasarım yönetmeliklerinin geliştirilmesi ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Sismik tasarımda son zamanlarda performansa dayalı yaklaşımların ön plana çıkması bu tür yapıların da çeşitli sismik hasar durumlarına göre tasarımını gerektirmektedir. Zira sismik yükler çoğunlukla taşıyıcı elemanları aynı anda hem kuvvetli hem de zayıf eksen eğilmesine maruz bırakmakla birlikte özellikle kolon görevi gören elemanlar bu yüklere ilave olarak aksenal yük de taşımaktadır. Dolayısıyla, özellikle kolonlar, sismik yükler altında aksenal yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmesine maruz kalmaktadır. Bu tür elemanlara rüzgar kolonları, konut tipi yapılardaki dış köşe kolonları, endüstriyel depolama sistemlerindeki kolonlar ve sanayi tipi yapıların baş ve son

açıklıklarındaki aşıklar gibi çeşitli uygulamalarda karşılaşılmaktadır. Literatürde bu tür elemanlar kiriş-kolon (beam-column) elemanlar olarak tanımlanmaktadır. Buna karşın, hafif çelik yapılarla ilgili mevcut yönetmelikler ve analiz yöntemleri yapısal elemanlarda oluşan eksenel, kuvvetli/zayıf eksen eğilmelerini doğrusal olarak birleştiren kapalı form bağıntılarıyla dayanım hesabı yapmakta ve farklı performans seviyelerine göre tasarıma izin vermemektedir.

1.1.2. Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar

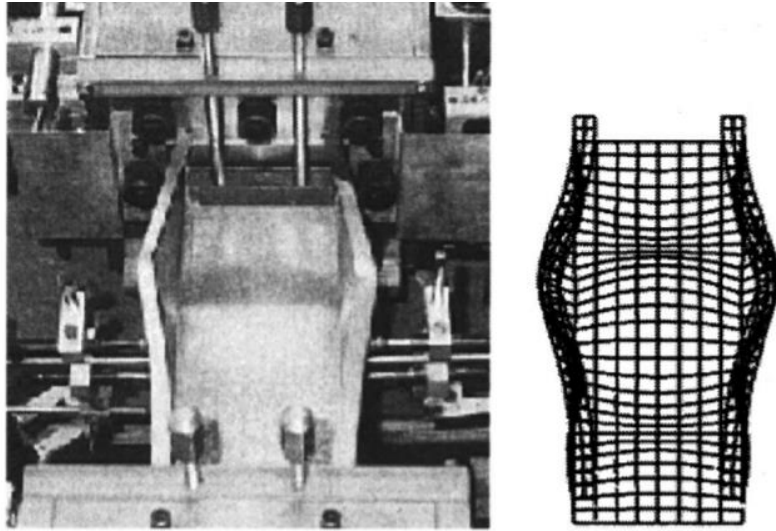
Teknik literatürde hafif çelik profiller üzerine yapılan çalışmaların çoğunun eksenel yük ve eğilme dayanımlarının belirlenmesine yönelik oldukları görülmekle birlikte, özellikle son yıllarda eksenel tersinir-tekrarlı yükler altında enerji sönümleme ve rijitlik azalmasının karakterize edildiği çalışmalar da mevcuttur. Eksenel, eksantrik, eğilme ve tersinir-tekrarlı yükler altındaki numunelerin incelendiği bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Miller ve Peköz (1994), C kesitli hafif çelik profiller üzerinde gerçekleştirdikleri 48 adet eksantrik yükleme deneyinde; kolonların eksenel taşıma kapasitelerini incelemiş ve elde ettikleri sonuçları AISI 1986 yönetmeliğinde yer alan eğilme ve eğilmeli-burulmalı burkulma hesap yöntemine göre elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, eksenel yük taşıma kapasitesinin küçük eksantrisitelere oldukça duyarlı olduğu ve AISI'e göre hesaplanan kapasitelerin fazla güvenli olduğu görülmüştür (Şekil 7).



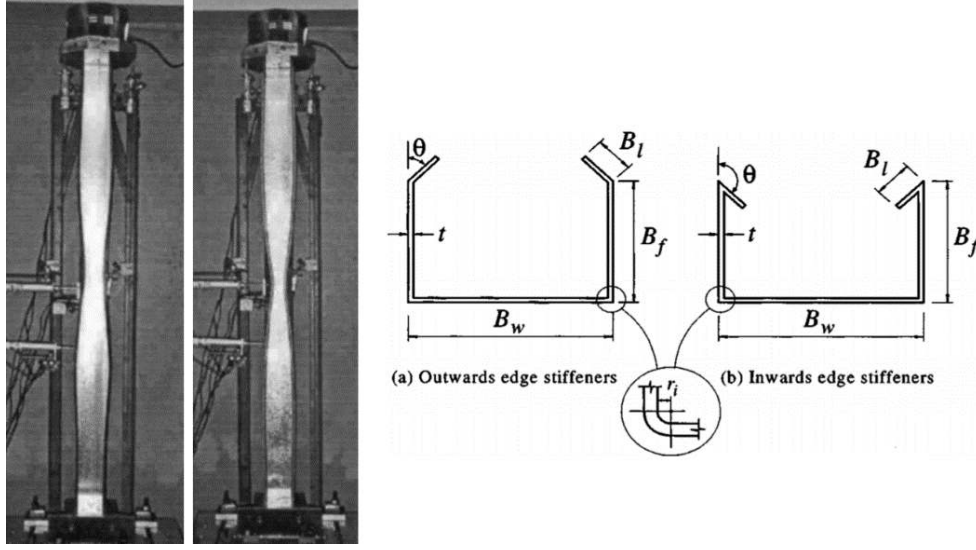
Şekil 7. Eksantrisitenin kuvvetli (a) ve zayıf eksenlerde (b) etkisi (Miller ve Peköz, 1994)

Young ve Yan (2002), aşağıdaki Şekil 8’de verilen ankastre mesnetli C kesitli hafif çelik deney numuneleri kullanarak doğruladıkları sonlu eleman modeli üzerinden gerçekleştirdikleri parametrik çalışmada, çok farklı kesit geometrisine sahip C profiller üzerinde sayısal çalışmalar yürütmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçları NAS (North American Specification), AISI (the American Iron and Steel Institute Specification) ve AS/NZS 4600 (Australian/New Zealand Standard) standartlarıyla karşılaştırılmış ve standartlardan elde edilen sonuçların daha yüksek olduğunu görmüşlerdir.



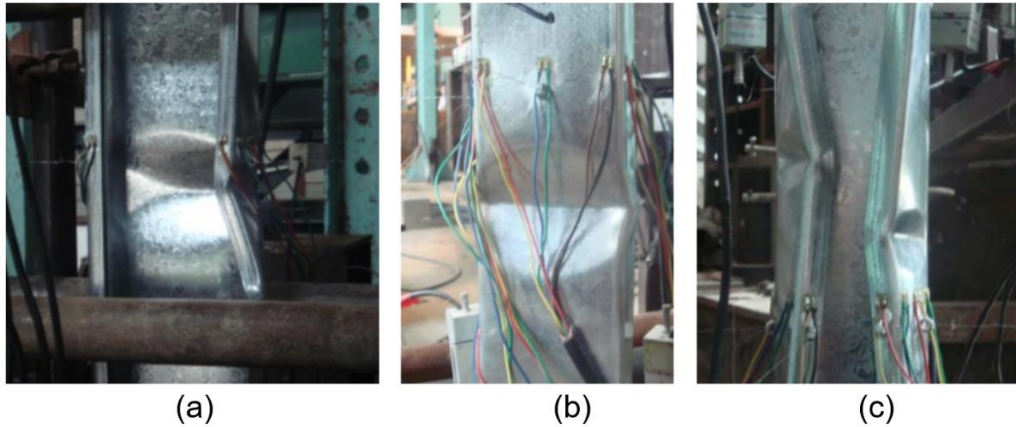
Şekil 8. Deney numunesi ve sonlu eleman modeli (Young ve Hancock, 2003)

Young ve Hancock (2003), Şekil 9’da verilen farklı b/t (flaş/kalınlık) oranlarına sahip C kesitli hafif çelik profiller üzerinde dudak ve flaş arasındaki açının pozitif ve negatif olarak değişiminin taşıma kapasitesine etkisini belirlemek için bir dizi deney gerçekleştirmiş ve elde ettiği sonuçları NAS, AISI ve AS/NZS 4600 (Australian/New Zealand Standard) standartlarındaki hesaplamalarla elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Yaptıkları karşılaştırmalar sonucunda, b/t oranının 65 olduğu tüm C kesitli numunelerde AS/NZS standardının yüksek, NAS ve AISI standartlarının ise düşük tahminde bulunduğunu tespit etmişlerdir. Diğer deneylerde ise, b/t oranının 50-40 arasında olduğu C kesitli numunelerin tamamında AS/NZS standardının yüksek, negatif açılı (içe dönük) flaşlar dışındaki tüm numunelerde ise NAS ve AISI standartlarının ise düşük tahminde bulunduğunu gözlemlemişlerdir.



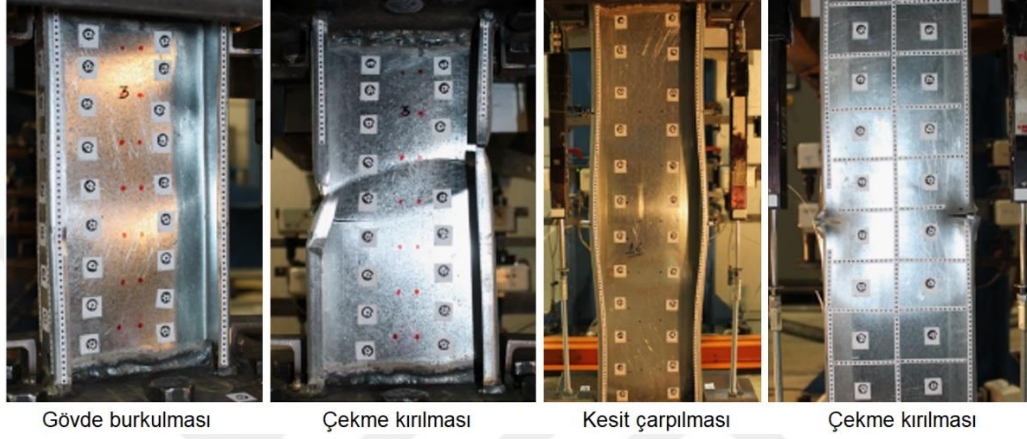
Şekil 9. Deney düzeneği (Young ve Hancock, 2003)

Li vd. (2014), eksenel-kuvvetli eksen eğilmesi, eksenel-zayıf eksen eğilmesi (dudaklar basınç altında), eksenel-zayıf eksen eğilmesi (dudaklar çekme altında) olmak üzere üç farklı eksantrik yükleme durumu altındaki C kesitli hafif çelik profillerin düzlem içi davranışını deneysel ve doğrulanan sonlu eleman modelleri üzerinden inceleyerek elde edilen sonuçları EWM (Effective Width Method) ve DSM (Direct Strength Method) yöntemlerini kullanarak karşılaştırmışlardır (Şekil 10). Elde ettikleri sonuçlara göre doğrusal etkileşim formüllerinin eksenel-kuvvetli eksen eğilmesi ve eksenel-zayıf eksen eğilmesi (dudaklar basınç altında) için uygun olduğunu ancak eksenel-zayıf eksen eğilmesi (dudaklar çekme altında) için daha düşük taşıma gücü hesaplandığı ve EWM'un DSM'a göre daha uyumlu olduğu görülmüştür.



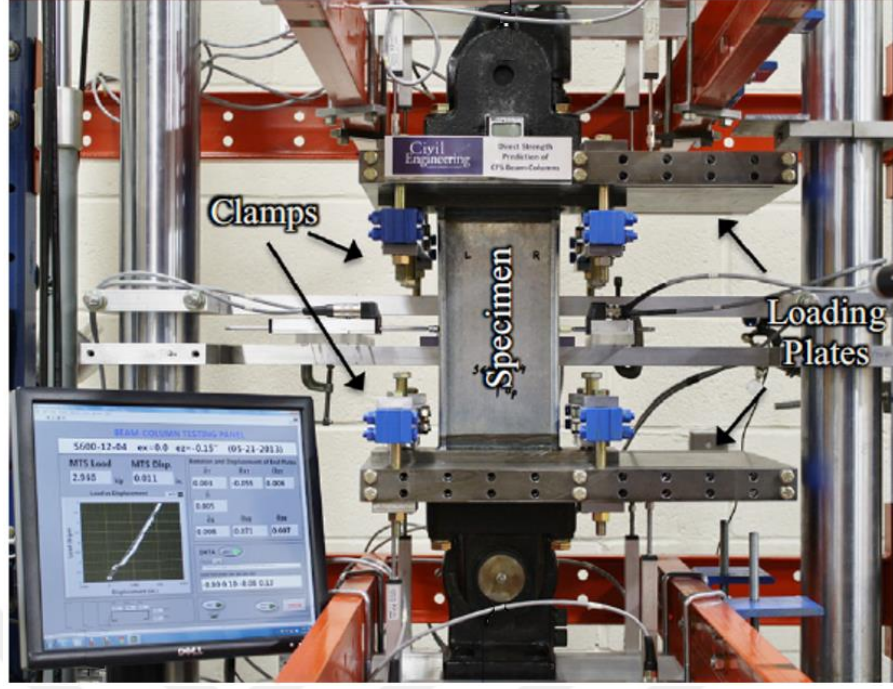
Şekil 10. Kuvvetli eksen eğilmesi (a), Zayıf eksen eğilmesi (pozitif yön) (b), Zayıf eksen eğilmesi (negatif yön) (c) (Li vd., 2014)

Padilla-Llano vd. (2014), C kesitli hafif çelik profillerin tersinir tekrar aksel yüklemeye altındaki davranışlarını incelemişlerdir (Şekil 11). Her bir elemanın aksel tekrarlı yüklemeye, rijitlik kaybı ve enerji sönümlenme davranışlarını karakterize ederek performansa dayalı sistem tasarımı için gerekli olan tekil davranışların bir arada kullanımını sağlamışlardır.



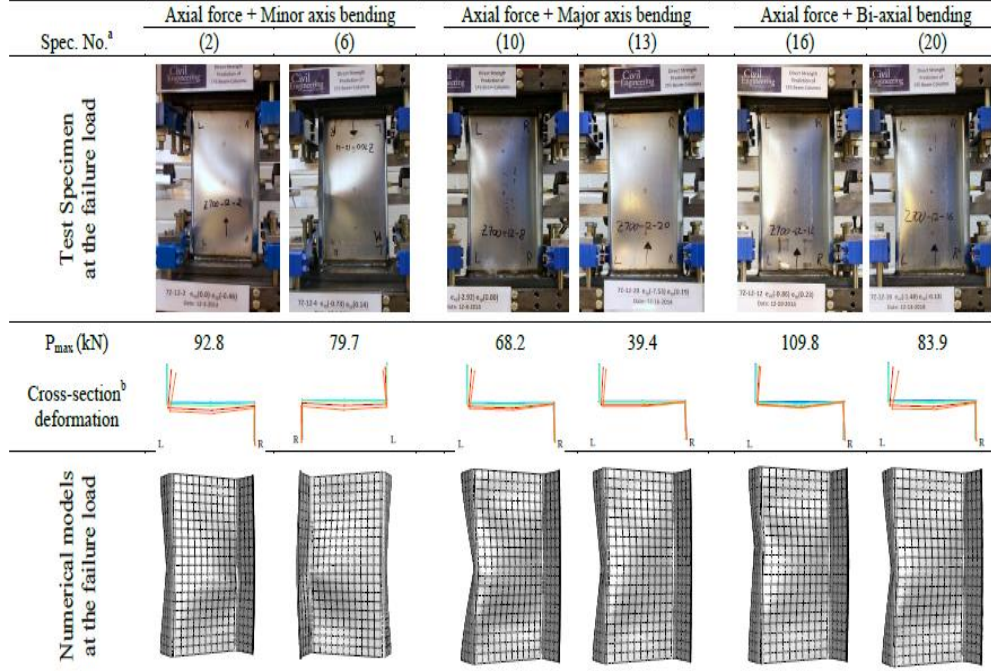
Şekil 11. Tersinir-tekrarlı yüklemeye altındaki burkulma deneyleri (Padilla-Llano vd., 2014)

Torabian vd. (2015), farklı eksantrik yükler altında dayanım değişiminin mevcut yönetmelikler ile uyumunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir (Şekil 12). Benzer şekilde, Z kesitli profiller üzerine de aynı yöntemi kullanarak tekrarladıkları farklı bir çalışmada (Torabian vd., 2016) C kesitli profillere göre kesme kuvveti merkezi ve asal eksen takımlarının değişiminin de etkisi inceleyerek daha önceki çalışmalarını tamamlayıcı veriler ortaya koymuşlardır. Bu şekilde elde edilen verilerle, AISI kodlarına yer alan hesap yöntemlerini geliştirmişlerdir.



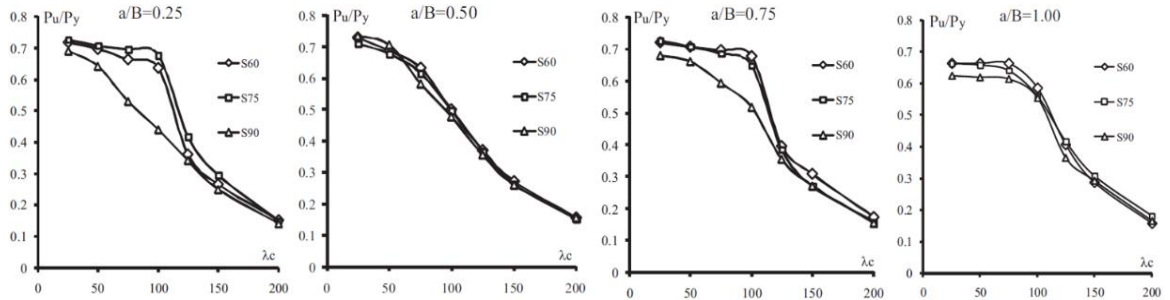
Şekil 12. Kolon-Kiriş deney düzeneği (Torabian vd., 2015)

Torabian vd. (2016), daha önce eksenel yük ve iki eksenli eğilme altındaki deneysel çalışmalarını gerçekleştirdikleri 305 mm boyundaki Z kesitli hafif çelik profillerin deney sonuçlarını kullanarak, sonlu eleman analizleri için S9R5 kabuk sonlu eleman modelleme protokolünü önermiş ve buna göre çözümlemeler gerçekleştirmişlerdir (Şekil 13). Sayısal modeller doğrusal olmayan malzeme ve geometrileri içermekle birlikte soğuk bükme işleminden kaynaklanan artık gerilmeleri ve geometrik ön kusurları da bünyesinde barındırmaktadır. Sonlu eleman analizlerinde, deneylerde gözlemlenen davranışların bütünüyle ortaya çıktığını görmüşlerdir. Aynı zamanda analiz sonuçlarından elde edilen dayanım yüzeyi AISI-S100-12 yönetmeliğiyle kıyaslanınca, özellikle eksenel yük ve zayıf eksen eğilmesi altında önemli kapasite fazlalıklarının bulunduğunu görmüşlerdir.



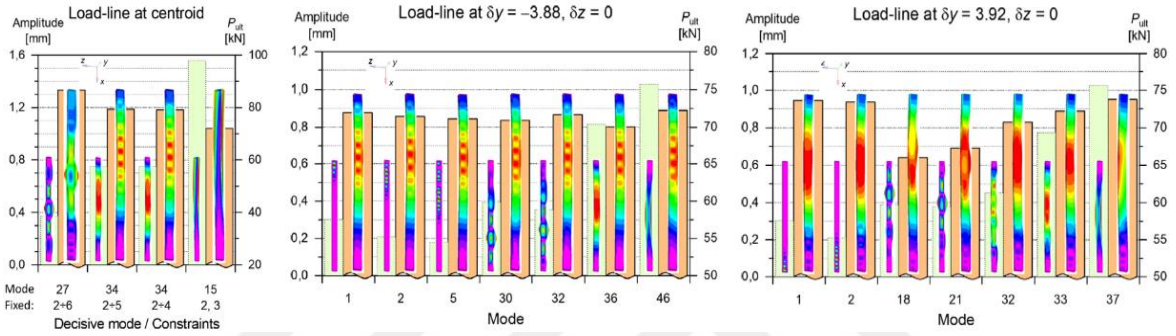
Şekil 13. Z kesitli numunelerin davranışları (Torabian vd., 2016)

El Aghoury vd. (2017), eksenel yük altındaki hafif çelik sigma profillerin dayanım ve burkulma davranışlarını araştırmak için 16 farklı kesit üzerinde deneysel çalışma yürütüp sonlu eleman analizleriyle parametrik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçları AISI ve DSM yöntemiyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre, kısa kolonların yerel veya çarpılmalı burkulma ile kapasitelerine ulaştıkları ve aynı zamanda önemli burkulma sonrası dayanıma sahip olduklarını görmüşlerdir. Ancak narinlik oranları yaklaşık 100 olan orta boy numunelerin eğilmeli-çarpılmalı burkulma (flexural-distortional buckling) davranışı sergilediklerini gözlemlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen narinlik oranı ile kolon kapasiteleri arasındaki ilişki Şekil 14’te verilmiştir.



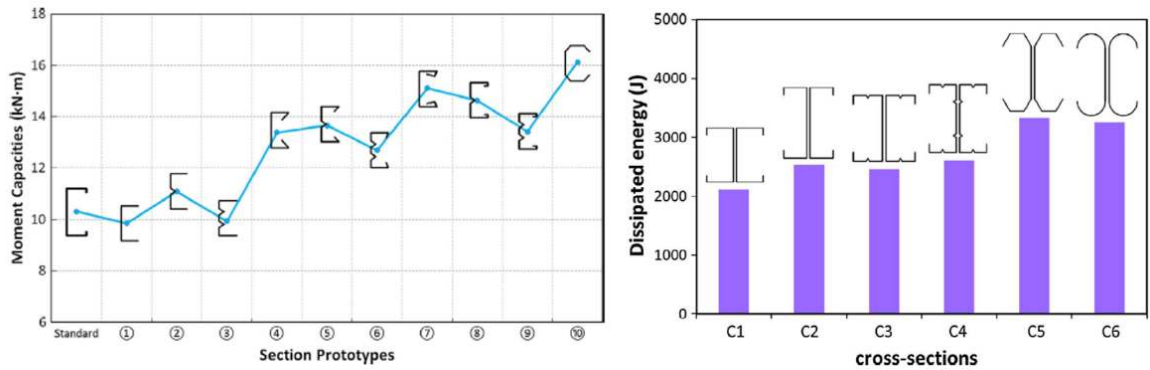
Şekil 14. Flanş genişliği farklı kolonların kapasite-narinlik değişimi (El Aghoury vd. 2017)

Sadovskýa ve Kriváček (2018), farklı mesnet koşullarının ve eksantrik yükleme durumlarının dar ve geniş flanşlı C kesitli hafif çelik profillerin aksel yük kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmak için doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirmişlerdir. Şekil 15'te görüldüğü gibi; analizlerinde ön kusurları, geleneksel yöntemin aksine, sonlu eleman modellerine burkulma modlarının belli bir büyüklükle çarpımı olarak değil, eigen burkulma modlarının bir enerji ölçüsü olarak etkitmişlerdir. Analizlerde farklı mesnet koşullarına göre yanıltıcı olabilecek eigenmod ön kusurlarının oluştuğu da görülmüştür.



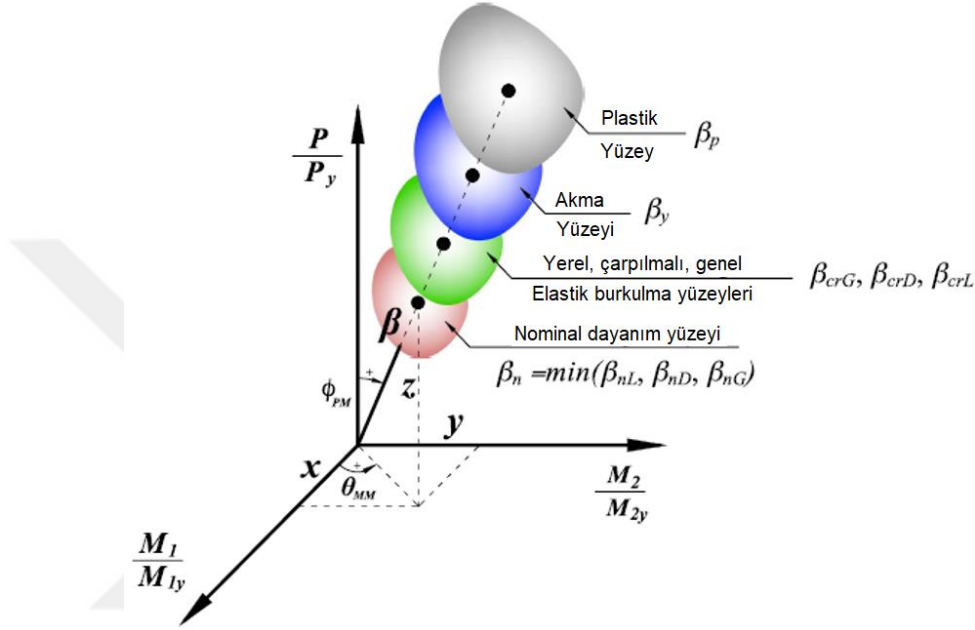
Şekil 15. Eigenmod ön kusurların burkulmada etkileri (Sadovskýa ve Kriváček, 2018)

Ye vd. (2018), tek eksenli eğilme altındaki hafif çelik profillerin enerji sönümleme davranışlarını inceleyerek en fazla enerji sönümleyebilecek optimum kesitlerin geliştirilmesi için sayısal çalışmalar yürütmüştür. “Parçacık Sürü Optimizasyonu” algoritmasıyla kapsamlı bir doğrusal olmayan analiz kullanarak hafif çelik profillerin Şekil 16’daki gibi en yüksek enerji sönümleme özelliği elde edilecek şekilde optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.



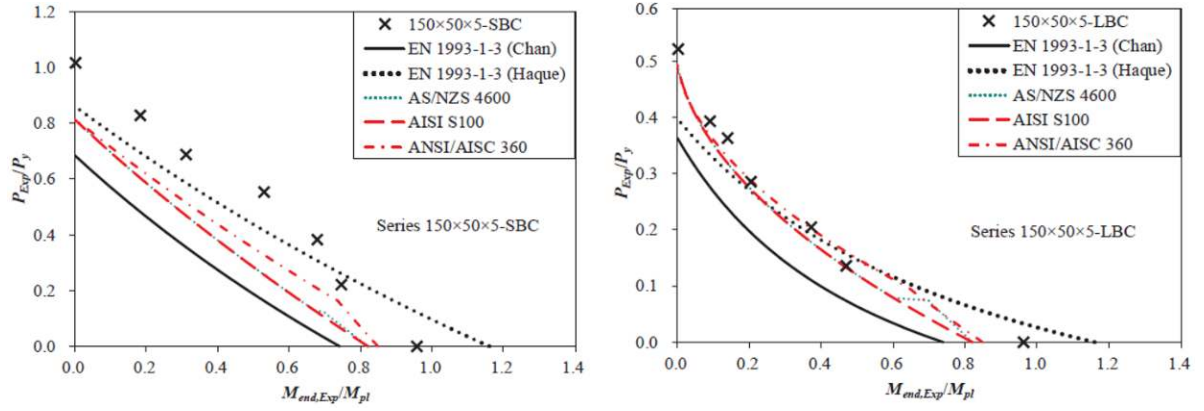
Şekil 16. Hafif profil kesit tipleri ve enerji sönümleme kapasiteleri (Ye vd., 2018)

Torabian ve Schafer (2018), DSM (Direct Strength Method) yönteminin hafif çelik kolon-kiriş elemanlar için daha da geliştirilmek amacıyla mevcut yönetmeliklerde kullanılan dayanım hesaplamakta kullanılan bağıntılar yerine, kesit üzerinde oluşan gerçek gerilme durumunu dikkate alan yeni bağıntılar önermişlerdir. Ayrıca, bu bağıntıların geçerliliklerini literatürde bulunan ve kendi yaptıkları deneysel çalışmalarla da desteklemişlerdir (Şekil 17).



Şekil 17. Normalleştirilmiş P-M₁-M₂ uzayı ve dayanım yüzeyleri (Torabian ve Schafer, 2018)

Chen ve Young (2020), elips kesitli hafif çelik profiller üzerinde gerçekleştirdikleri iki farklı boydaki 42 adet numune üzerinde yük-moment etkileşimini incelemişlerdir. Eksenel yük ve eğilme altındaki (kolon-kiriş elemanı) elips kesitli elemanların tasarım yöntemleri mevcut yönetmeliklerde belirtilmediği için, deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuçları eşdeğer çap yöntemi ve eşdeğer kutu kesit yaklaşımını, yönetmeliklerdeki etkileşim eğrileriyle hesaplanan eksenel yük ve eğilme dayanımlarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, tasarım yöntemlerinin oldukça güvenli olduğu ve elips kesitli elemanlar için uygun olduğunu ancak eşdeğer kutu kesit yaklaşımının Avrupa yönetmeliği Eurocode 1993-1-3'e uygun olmayan sonuçlar verdiğini görmüşlerdir (Şekil 18).



Şekil 18. Farklı boylarda elips kesitli elemanların etkileşim eğrilerinin karşılaştırılması (Chen ve Young, 2020)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Hafif çelik profillerin ve bunlarla oluşturulan yapıların davranışlarının temelini herhangi bir yükleme altında yerel burkulma, çarpılmalı burkulma veya eğilmeli burkulmadan dolayı meydana gelen rijitlik azalmaları oluşturmaktadır. Eğer hafif çelik profillerden oluşan bir yapı incelenecekse, bu tür rijitlik azalması meydana getiren davranışların tasarıma veya modellemelere dahil edilmesi gerekmektedir.

Mevcut yönetmeliklere göre NAS (North American Specification), AISI (the American Iron and Steel Institute Specification) ve AS/NZS 4600 (Australian/New Zealand Standard)) eksenel yükleme ve bileşik eğilme için kullanılan kapalı form etkileşim denklemi (1) ile eleman (profil) kapasiteleri belirlenebilmektedir:

$$\frac{\bar{P}}{\phi_c P_n} + \frac{C_{mx} \bar{M}_x}{\phi_b M_{nx} \alpha_x} + \frac{C_{my} \bar{M}_y}{\phi_b M_{ny} \alpha_y} \leq 1 \quad (1)$$

Ancak bu yöntem, eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksenlerdeki eğilme etkileri arasındaki doğrusal olmayan (birinci ve ikinci mertebe etkileri) etkileşimleri dikkate almamaktadır. Dolayısıyla, bu yönetmelikler hafif çelik profillerin enerji sönmülme, dayanım ve rijitlik azalması gibi karakteristik davranış özellikleri ile bilgi vermediği gibi yanal yük taşımayan yapı elemanlarının katkısını da ihmal etmektedir.

Hafif çelik profillerin eksenel yük ve moment taşıma kapasitelerinin belirlenmesi konusunda son yıllarda “Effective Width Method” (EWM) ve “Direct Strength Method” (DSM) olmak üzere iki önemli yöntem öne çıkmıştır. EWM, düzlem elemanlardaki yerel burkulmaların herhangi bir kesiti meydana getiren bu elemanların etkenliklerinde azalma meydana getireceği temeline dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle, burkulmadan dolayı oluşan doğrusal olmayan gerilme dağılımı altındaki bir levhanın, basitleştirilmiş bir gerilme dağılımı altındaki genişliği azaltılmış bir levhadaki idealleştirilmiş denge hali şeklinde ifade

edilmesidir. Etkili genişliğin hesaplanabilmesi için iterasyonların yapılması zorunluluğu bu yöntemi oldukça zor bir hale getirmektedir. DSM yönteminin temel fikri ise bürüt kesitte meydana gelecek tüm elastik burkulmaların (yerel, çarpılmalı ve genel) belirlenerek kesiti akmaya ulaştıracak yükün bulunması ve böylelikle eleman dayanımının doğrudan belirlenmesidir. Bu yöntemin daha sık kullanılmasının nedeni uygulamada sağladığı bu kolaylıktan kaynaklanmaktadır.

DSM yöntemi için Johns Hopkins Üniversitesi'nde geliştirilen CUFSM (Li ve Schafer, 2010) adlı yazılımının kullanılmasıyla, profil kesitini akmaya ulaştıracak burkulma modlarının hangi yükler ve dalga boylarında oluşacağı belirlenebilmekte, eleman dayanım hesaplamaları önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır (Schafer ve Ádány 2006, Li ve Schafer, 2010). Ancak, yukarıda verilen yöntemler tekrarlı yükleme altındaki bir yapı sistemin tasarımı için doğrudan kullanılamamaktadır. Bir yapı sisteminin deprem yükleri altındaki davranışını öngörebilmek için öncelikle bu yapıyı oluşturan elemanların, birleşimlerin, yatay yük taşıma sistemlerinin, enerji sönümleme mekanizmalarının incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, rijitlik azalmalarının sınıflandırılması ve ardından, sistemin tekrarlı yükler altındaki genel davranışının, sıralanmış olan bu tekil davranış özelliklerinin bir araya getirilerek elde edilmesi, genel olarak bu konuda yapılan çalışmaların temel hedefi olmuştur.

Bununla birlikte, AISI-S100-12 gibi yönetmeliklerde, C ve Z kesitli profiller gibi, üzerinde oldukça fazla sayıda çalışma yapılarak ön tanımlı elemanlar sınıfına giren elemanların dayanım hesaplamalarında kullanılan güvenlik katsayısı bu sınıf dışında kalan elemanlara göre daha yüksektir, dolayısıyla bu durum C ve Z profiller kullanılması durumunda daha ekonomik tasarım yapılmasına imkan vermektedir. Sigma gibi diğer kesitli profillerin de bu sınıfta yer alabilmesi için benzer çalışmaların yapılarak ön tanımlı sınıfa giren eleman sayısının genişletilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, sigma kesitli profiller üzerinde uygulanan eksenel yüklemeye ek olarak, iki eksenli bileşik eğilme ($P-M_x-M_y$) meydana getiren eksantrik yüklemeler altında sigma profillerin davranışları ve kapasiteleri deneysel ve sayısal olarak ortaya koyulmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla, literatürdeki benzerlerinden farklı olarak, sigma profiller üzerinde gerçekleştirilecek deneylerle bu profillerin eksantrik yükler altındaki davranışının kapsamlı olarak incelenerek dayanım uzayının araştırılmasının yanında, enerji tüketme, süneklik ve tersinir-tekrarlı yükleme davranışları; yerel, çarpılmalı ve genel burkulma

modlarının her biri için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca, elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar AISI-S100-12 yönetmeliği ile karşılaştırılarak, yönetmelikte yer alan hesaplama yöntemlerinin geliştirilebilme potansiyeli araştırılmış ve sigma profillerin de ön tanımlı profiller kapsamında yer alabilmesi için gerekli olan deneysel bilgi birikimine katkı sağlanmıştır. Bu amaçla, yürütülen deneysel ve sayısal çalışmalar aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

Bu çalışmada, sigma kesitli profiller üzerinde uygulanan eksenel yüklemeye ek olarak, iki eksenle bileşik eğilme ($P-M_x-M_y$) meydana getiren eksantrik yüklemeler altında sigma profillerin davranışları ve kapasiteleri deneysel ve sayısal olarak ortaya koyulmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla, literatürdeki benzerlerinden farklı olarak, sigma profiller üzerinde gerçekleştirilecek deneylerle bu profillerin eksantrik yükler altındaki davranışının kapsamlı olarak incelenerek dayanım uzayının araştırılmasının yanında, enerji tüketme, süneklilik ve tersinir-tekrarlı yükleme davranışları; yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarının her biri için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca, elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar AISI-S100-12 yönetmeliği ile karşılaştırılarak, yönetmelikte yer alan hesaplama yöntemlerinin geliştirilebilme potansiyeli araştırılmış ve sigma profillerin de ön tanımlı profiller kapsamında yer alabilmesi için gerekli olan deneysel bilgi birikimine katkı sağlanmıştır. Bu bağlamda yürütülen deneysel ve sayısal çalışmalar aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

2.1. Deneylerde Kullanılacak Numunelerin Enkesit ve Boylarının Belirlenmesi

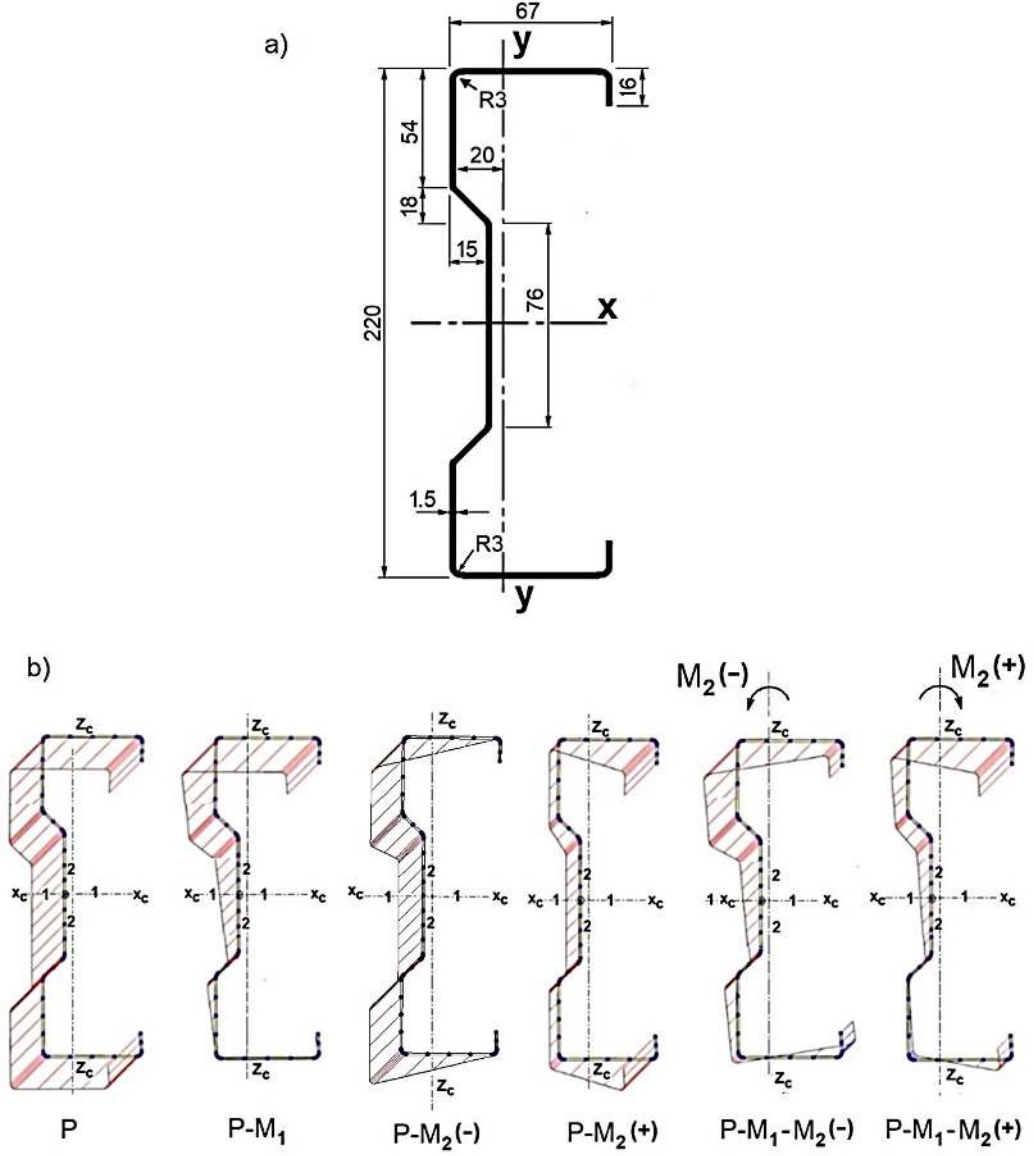
Bu başlık altında, profillerin eksenel yük taşıma kapasitelerini belirleyen; yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burkulma türlerinden yalnızca birinin baskın olduğu enkesit ölçülerinin “DSM” yöntemine göre hesaplanması ve böylelikle ortaya çıkacak davranışın öngörülmesi sağlanacaktır. Burada izlenecek yöntem olarak, çarpılma burkulmasının yerel burkulmadan daha düşük bir yükte oluşması ve burkulma yükleri arasında ayırt edilebilir bir farkın olması hedeflenmiştir. Ancak, burkulma modları çoğu durumda kolayca ayırt edilebilir olmadığından, CUFSM yazılımının özel bir seçeneği olan ve her bir modun hangi kritik boyda ve yükte ortaya çıktığını detaylı bir şekilde analiz edebilen “cFSM” (Constraint Finite Strip Method) modülü kullanılarak her bir burkulma modu ayrı ayrı belirlenmiştir. Burkulma modlarının hangi kritik boyda oluşacağını belirlemek için profil kesitleri öncelikle keskin köşeli olarak modellenerek cFSM yazılımında analiz edilmiştir. Daha sonra,

analizden elde edilen kritik burkulma boyları CUFSM yazılımında gerçekleştirilen dairesel köşe bükümlerine sahip kesitlerin analizinde kullanılarak kritik burkulma yük katsayıları hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen bu ön analizler sonucunda sigma profil deney numunelerinin boyları (L), yerel burkulmanın inceleneceği numuneler için yerel-eğilmeli burkulma etkileşiminin oluşmadığı, eğilmeli burkulmanın inceleneceği numuneler için ise yerel-eğilmeli burkulma etkileşimini oluşacağı ve bunlar arasında çarpılma-eğilmeli burkulma etkileşimlerinin de görülebileceği $L=500$ mm, 1000 mm ve 1500 mm olarak seçilmiştir. Tablo 1’de, piyasadaki üretici kataloglarından seçilen çok sayıda ve farklı tiplerdeki sigma profilleri üzerinde cFSM modülü kullanılarak gerçekleştirilen sayısal ön çalışmaya ait sonuçların bazıları örnek olarak verilmiştir. Tablodaki P, eksenel yükü (basınç), M_1 ve M_2 , profil enkesitinin sırasıyla x ve y asal eksenlerindeki (1 ve 2 eksenleri) momentleri göstermektedir. L_{cr1} ve L_{crd} yerel burkulma ve çarpılma burkulmasının kritik boyunu, α_{cr1} ve α_{crd} profilde akma gerilmesi oluşturacak yük katsayılarını (P_{cr1}/P_y , P_{crd}/P_y , M_{cr1}/M_2 , M_{crd}/M_2) ifade etmektedir. ($M_2(-)$ olarak ifade edilen yükleme durumu, yük uygulama noktasının (eksantrisitenin) y ekseninin (2 eksen) sol tarafında, $M_2(+)$ yükleme durumu ise, sağ tarafında olması halini ifade etmektedir. Enkesitte 1 ekseninin (x eksen) simetri eksen olması nedeniyle M_1 momentinin (+) ya da (-) yönde olmasının önemi yoktur. Tablodaki gri dolgulu hücreler çarpılma burkulmasının yerel burkulmadan daha küçük bir yükte oluştuğu durumları, koyu çerçeve içindeki hücreler ise, P- $M_2(+)$ yüklemesinde oluşan tersi durumu göstermektedir. Böylece bu profil seçim kriterini geçememiş olmaktadır. Bu durumda, kritere göre onay alan bir profil için aynı satırdaki tüm değerlerin gri dolgu içinde olması gerekmektedir. Bu şekilde bir kriterin seçilme nedeni; hafif çelik profillerde yerel burkulma meydana geldikten sonra diğer burkulma modlarının teknik olarak ortaya çıkmamasıdır. Ancak profilde çarpılmalı burkulmanın ardından yerel burkulma da oluşabilmektedir. Bu nedenle, her iki burkulma modunu da gözlemleyebilmek için, çarpılmalı burkulmanın yerel burkulmadan önce ortaya çıkması tercih edilmektedir. Dolayısıyla, çok sayıda farklı sigma profilleri için oluşturulacak benzer bir tabloda, sadece cFSM satırındaki tüm hücrelerin gri dolgulu olduğu profiller kabul kriterlerine uygun olmaktadır.

Tablo 1. Bazı sigma profiller üzerinde cFSM ve CUFSM ile yapılan ön çalışma sonuçları

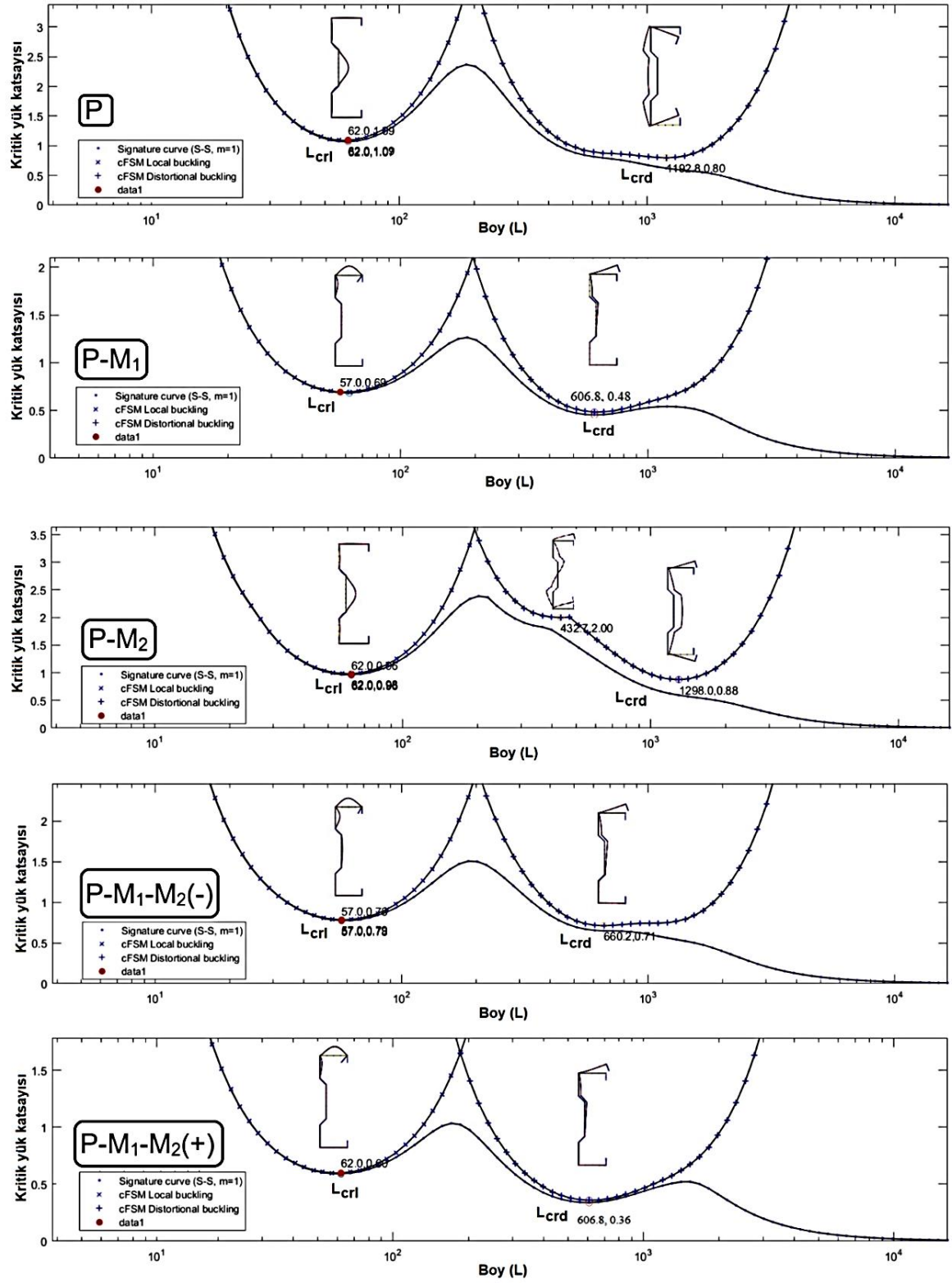
Profil	Yükleme durumu	P		P-M ₁		P-M ₂ (-)		P-M ₂ (+)		P-M ₁ -M ₂ (+)		P-M ₁ -M ₂ (-)	
S260 60x90x25x2	Kritik yarım dalga boyu (mm)	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}
		78.3	1258.7	78.3	1063.7	78.3	1157.1	78.3	1369.2	78.3	1258.7	78.3	977.9
	Kritik yük katsayısı	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}
		1.03	0.67	0.67	0.49	0.96	0.51	0.84	0.79	0.77	0.64	0.57	0.38
S280 60x85x21x2	Kritik yarım dalga boyu (mm)	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}	L _{cr1}	L _{crd}
		95.1	1291.2	73.9	847.8	95.1	1091.2	95.1	1404.6	95.1	1291.2	73.9	779.3
	Kritik yük katsayısı	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}	α_{cr1}	α_{crd}
		0.75	0.65	0.74	0.49	0.91	0.54	0.63	0.7	0.63	0.61	0.64	0.37

Deneylerde kullanılacak sigma kesitli numunenin seçilebilmesi için yukarıda bahsedilen kriterleri sağlayan kesitler üzerinde gerçekleştirilen analizlerde kullanılan P, P-M₁, P-M₂, P-M₁-M₂(-) ve P-M₁-M₂(+) yüklemelerine göre ortaya çıkan gerilme durumları ve bu gerilme durumlarına göre gerçekleştirilen analitik çalışma sonucunda H=220 mm yüksekliğine sahip olarak seçilen ve deneysel çalışmaya konu olan sigma profil numunenin boyutları ve yüklemeye göre cFSM analizi ile enkesitte belirlenen gerilmeler Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. Seçilen deney profilinin enkesit boyutları (a) ve enkesitte cFSM analizi ile belirlenen gerilmeler (b)

cFSM modülü kullanılarak; P, P-M₁, P-M₂, P-M₁-M₂(-) ve P-M₁-M₂(+) yüklemeleri altında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen kritik burkulma boyları (L_{cr1} ve L_{crd}) ve burkulma modları (yerel ve çarpılmalı) Şekil 20’de gösterilmiştir.



Şekil 20. Çeşitli yükleme durumları için cFSM analizi sonuçları (L_{cr1} ve L_{crd})

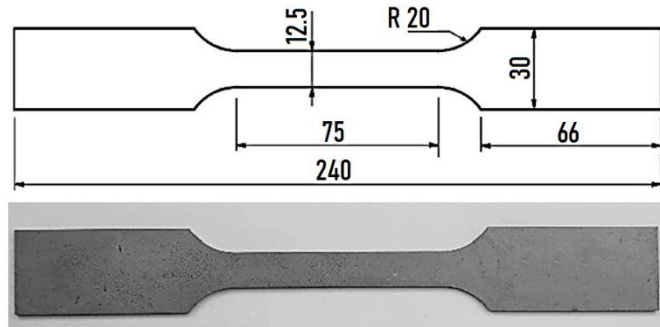
2.2. Deneysel Çalışmalar

Proje çalışması kapsamında hafif çelik sigma profil numuneler üzerinde monotonik ve tersinir-tekrarlı olmak üzere, eksenel ve çeşitli eksantrisite değerleri için deneyler gerçekleştirilmiştir. Yüklemeler, özellikle yer hareketleri esnasında oluşabilecek, profillerin farklı doğrultularda maruz kaldıkları eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilme etkilerini ve bu etkilerin çeşitli kombinasyonlarını temsil edecek şekilde yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle, sonlu eleman analizlerinde kullanılmak üzere gerekli olan malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla monotonik ve düşük çevrimli yorulma yüklemesi altında kupon numune çekme deneyleri gerçekleştirilerek gerilme-şekildeğiştirme eğrileri elde edilmiştir.

2.2.1. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

a) Monotonik Çekme Deneyleri

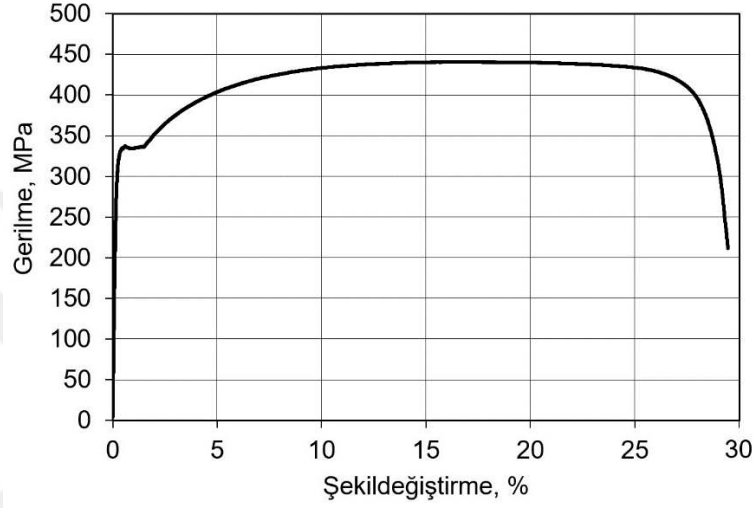
Çalışma konusu sigma profil numuneler, TS EN 10346 (2015)'e göre akma gerilmesi minimum 320 MPa olan, 1.5 mm kalınlığında S320GD+Z kalite sınıfında sıcak daldırma ile çinko kaplı galvanizli çelik saclardan üretilmiştir. Sonlu eleman modelleri için gereken malzeme özelliklerinin tanımlanabilmesi için, bu saclardan boyuna doğrultuda TS EN ISO 6892-1 (2020)'de verilen ölçülere uygun olarak imal ettirilen 3 adet kupon numunesi üzerinde MATİL firması laboratuvarında aynı standarda göre çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kupon numunenin ölçüleri ve görünümü Şekil 21'de, deneylerden elde edilen sonuçların ortalama değerleri Tablo 2'de, bu değerlere göre çizilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi ise Şekil 22'de verilmektedir.



Şekil 21. Monotonik çekme kupon numunelerinin ölçüleri ve görünüşü

Tablo 2. Monotonik çekme deney sonuçları

Akma Dayanımı (%0.2) (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Elastisite modülü (GPa)
334	443	28.7	184.03



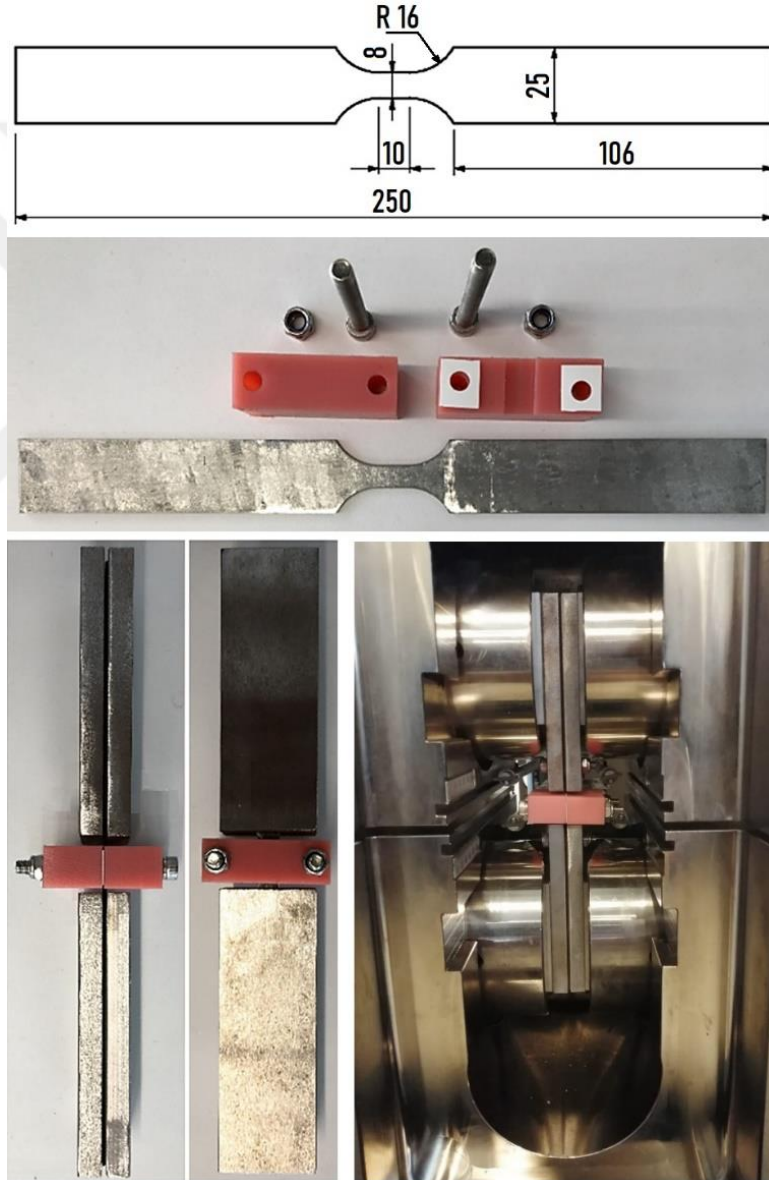
Şekil 22. Monotonik çekme deneylerine ait ortalama gerilme-şekil değiştirme eğrisi

b) İtme-Çekme Deneyleri ve Malzeme Pekleşme Parametrelerinin Kalibrasyonu

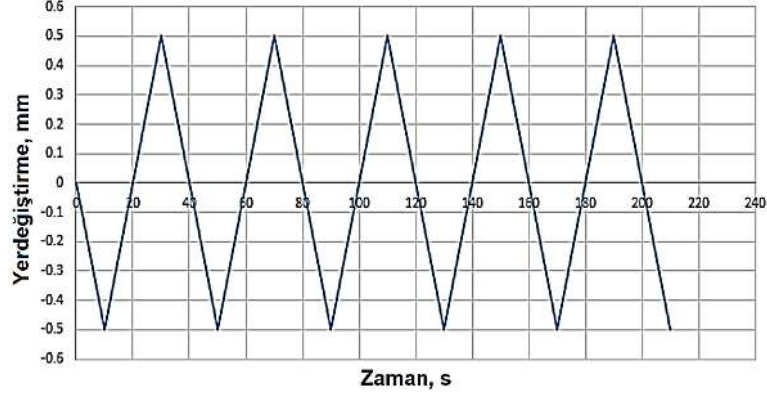
Deprem hareketleri esnasında yapı elemanlarında oluşan yüksek şekil değiştirme oranlarının malzemede oluşturacağı etkiyi gözlemlemek ve sigma profil elemanların tersinir-tekrarlı deneylerine ait sonlu eleman analizlerinin yapılabilmesi için de malzeme pekleşme parametrelerinin, monotonik kupon çekme deneylerine benzer şekilde, düşük çevrimli itme-çekme deneyleriyle elde edilecek çevrimsel gerilme-şekil değiştirme eğrileri üzerinden belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, aynı sac malzemedan boyuna doğrultuda kesilerek hazırlanan kupon numuneleri üzerinde BS 7270 (2006) standardına göre itme-çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde itme (basınç) yüklemesi sırasında numunenin inceltilmiş orta bölge kesitinde meydana gelmesi kaçınılmaz burkulmanın engellenebilmesi için, dinamik yüzey sürtünme katsayısı 0.08 olan Kestamid® (Döküm Polyamid) malzemeden üretilen bir aparat tasarlanıp kullanılmıştır. İtme-çekme deney numunelerinin ölçüleri, burkulma engelleyici düzeneğe ait parçalar, bunların deneye hazır

birleştirilmiş halinin görünümü ile presteki deney anından bir görünüm Şekil 23'te verilmiştir.

Kupon numuneleri üzerinde %5 genlik oranında itme-çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde uygulanacak şekildeğiştirme hızı 5×10^{-3} mm/mm/s olarak seçilmiştir. Dolayısıyla $L_0=10$ mm ölçüm boyu için yükleme hızı 5×10^{-2} mm/s olarak hesaplanmıştır. Buna göre, %5 genlik için hesaplanan yerdeğiştirme-zaman grafiği aşağıdaki Şekil 24'te verilmiştir.

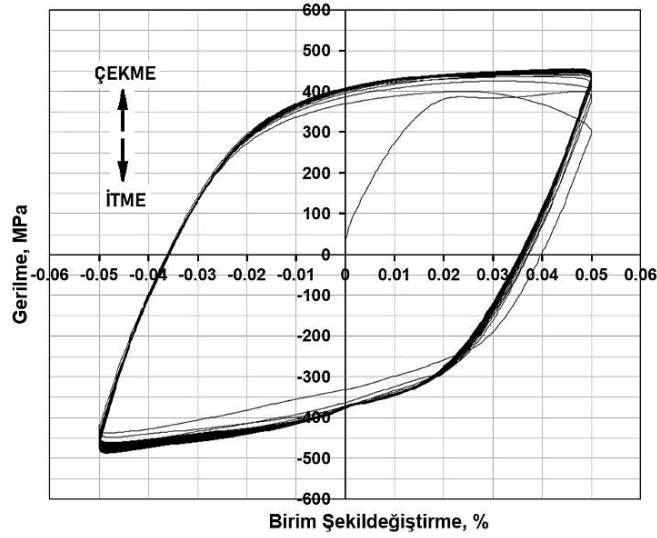


Şekil 23. İtme-çekme numunelerinin ölçüleri ve burkulma engelleyici düzenek ve deney anından bir görünüm



Şekil 24. İtme-çekme deneylerinde uygulanan yerdeğiştirme – zaman grafiği

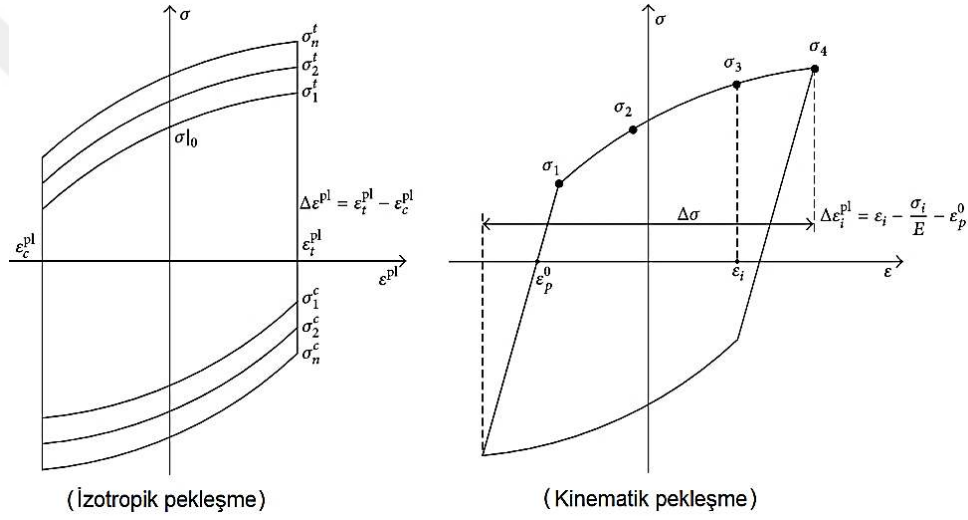
MATİL firmasının laboratuvarında, yukarıda belirtilen tersinir-tekrarlı yükleme koşulları altında üç adet kupon numune üzerinde gerçekleştirilen ve her birinde ortalama 80 çevrim yükleme uygulanan itme-çekme deneyleri sonucunda elde edilen ortalama gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 25’te verilmiştir.



Şekil 25. İtme-çekme kupon deneylerine ait ortalama gerilme-şekildeğiştirme eğrisi

İtme-çekme deneyleri ile elde edilen eğriler sonlu eleman analizlerinde malzeme modelinin tanımlanmasında kullanılmıştır. Tersinir-tekrarlı yükleme altındaki numune eğrilerinin nihai eğriye ulaşmadan önceki davranışının gözlemlenebilmesi için çevrimsel plastisite bünye

modellerinin kullanılması gerekmektedir. Çevrimsel plastisite teorisi, tekrarlı yükler altında plastik olarak şekil değiştirmiş malzemelerde oluşan gerilme ve şekildeğişimleri matematiksel olarak ifade etmektedir. ABAQUS yazılımı ile gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde Lemaitre ve Chaboche (1986) tarafından geliştirilen “metallerin çevrimsel plastisite bünye modeli” kullanılmıştır (Şekil 26). Bu modelde, von Mises akma kriteri ve buna bağlı akış kuralı kabul edilmiş, malzemenin karakteristik özellikleri izotropik ve kinematik pekleşme modellerinin birlikte kullanımı ile tanımlanmıştır. Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan Bağıntı 2-8 Abaqus kullanıcı kılavuzunda yer almaktadır. (ABAQUS user's Manual).



Şekil 26. İzotrop ve kinematik pekleşme modelleri (ABAQUS user's Manual)

İzotropik pekleşme bileşeni akma yüzeyinin büyüklüğündeki değişimi σ^0 , eşdeğer plastik şekildeğiştirmenin ϵ^{pl} bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty(1 - e^{-b_{iso}\epsilon^p}) \quad (2)$$

Burada, $\sigma|_0$ eşdeğer plastik şekildeğiştirmenin sıfır olduğu durumdaki akma gerilmesini, Q_b akma yüzeyinin büyüklüğündeki en büyük değişimi, b_{iso} ise plastik şekildeğiştirme arttıkça akma yüzeyi büyüklüğünde oluşan değişim hızını ifade etmektedir. Herhangi bir i çevrimindeki akma yüzeyinin büyüklüğündeki değişim σ^0 ;

$$\sigma_i^0 = \frac{\sigma_i^t - \sigma_i^c}{2} \quad (3)$$

ifadesiyle hesaplanabilmektedir. $\sigma_i^t - \sigma_i^c$ ise elastik bölgedeki maksimum çekme ve basınç gerilmesini göstermektedir. σ_i^0 'ye karşılık gelen eşdeğer plastik şekildeğiştirme;

$$\varepsilon_i^p = \frac{1}{2}(4i - 3)\Delta\varepsilon_p \quad (4)$$

olarak ifade edilmektedir. Plastik şekildeğiştirmenin aralığı $\Delta\varepsilon_p$ ise;

$$\Delta\varepsilon_p \approx \Delta\varepsilon - 2\sigma_1^t/E \quad (5)$$

şeklinde yazılmaktadır. Pekleşme modelinin kinematik pekleşmeyi içeren kısmı öteleme gerilmesindeki (backstress) değişimi, α ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\alpha = \frac{C_{kin}}{\gamma}(1 - e^{\gamma\varepsilon^p}) + \alpha_1 e^{\varepsilon^p} \quad (6)$$

C_{kin} ve γ , tersinir-tekrarlı kupon deneylerinin sonucunda elde edilen nihai çevrimsel eğriyle kalibre edilen malzeme sabitleridir. 6 numaralı denklemde belirtilen C_{kin}/γ oranı ötelenme gerilmesindeki maksimum değişimi, γ ise plastik şekildeğiştirme arttıkça ötelenme gerilmesinin hangi hızda değiştiğini ifade etmektedir. Deneysel eğriden elde edilen $(\sigma_i, \varepsilon_i^p)$ veri çiftleri;

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \frac{\sigma_i}{E} - \varepsilon_p^0 \quad (7)$$

bağıntısıyla oluşturulmaktadır. Öyle ki; eğrinin şekildeğiştirme eksenini kestiği yerdeki değer ε_p^0 olmak üzere, $\varepsilon_1^p=0$ 'dır. Her bir $(\sigma_i, \varepsilon_i^p)$ veri çifti için σ_i , değerleri;

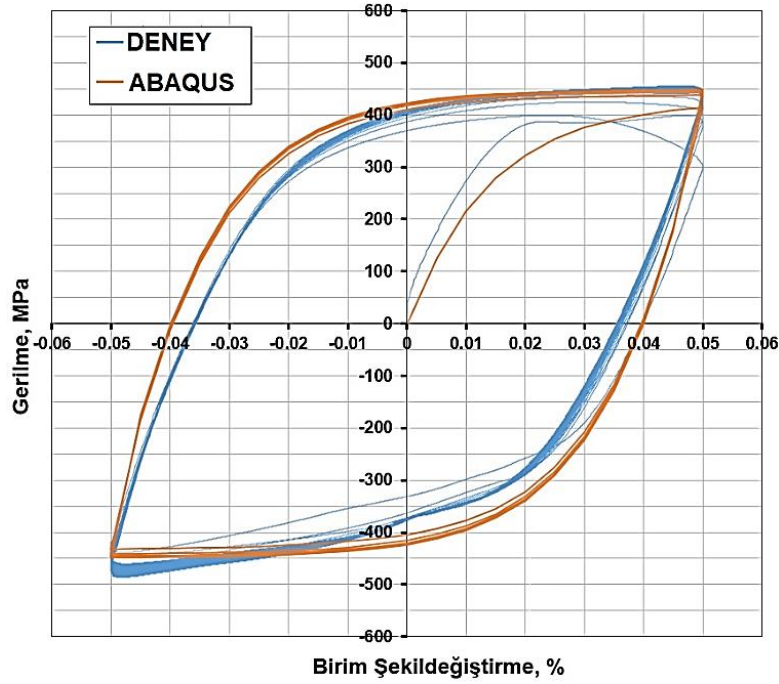
$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma^s \quad (8)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir. Bu bağıntı; $\sigma|_0$ eşdeğer plastik şekildeğiştirmenin sıfır olduğu durumdaki akma gerilmesi ve $(\sigma_i^0, \varepsilon_i^p)$ veri çiftleriyle düzenlenmiştir. Buradaki σ^s ifadesi, Şekil 26'da gösterilen nihai eğrideki ilk ve son σ_1 ve σ_n değerlerinin ortalamasıdır. Bu değerler elde edildikten sonra $(\alpha_i, \varepsilon_i^p)$ veri noktaları 6 numaralı denklemde yerine yazılarak malzeme pekleşme modelini oluşturan parametreler kalibre edilmiş olmaktadır. Elde edilen bu değerler ise ABAQUS yazılımında yapılacak tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. İtme-çekme kupon deney sonuçlarından hesaplanan izotropik ve kinematik pekleşme parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. ABAQUS yazılımında yer alan malzeme

modelinde tanımlanmak için hesaplanan C_{kin} ve γ kinematik pekleşme parametreleri deney eğrisi üzerinde seçilen 9 adet ($\alpha_i, \varepsilon_i^p$) veri noktası kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 27’de ise hesaplanan izotropik ve kinematik pekleşme parametreleri kullanılarak, kupon numune modeli için ABAQUS’te gerçekleştirilen sonlu eleman analizinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisi ve deney eğrisi karşılaştırmak amacıyla birlikte verilmiştir. Şekil 27’den görüldüğü gibi, sayısal çözüm eğrisi deney eğrisini tatmin edici bir yaklaşıklıkla temsil etmiştir.

Tablo 3. İtme-çekme kupon deney sonuçlarından hesaplanan pekleşme parametreleri

Şekildeğiştirme Genliği, ($\Delta\varepsilon/2$)	$\sigma _0$ (N/mm ²)	İzotropik		Kinematik	
		Q_∞ (N/mm ²)	b_{iso}	C_{kin} (N/mm ²)	γ
0.1	183.7	30.503	4.615	91.46	91.46
				105.53	67.63
				114.37	48.64
				60.03	28.28
				5738.43	116.55
				6793.79	85.18
				7311.75	76.58
				7481.90	69.40
				7518.49	67.14



Şekil 27. İtme-çekme kupon numune için deney ve ABAQUS eğrilerinin karşılaştırılması

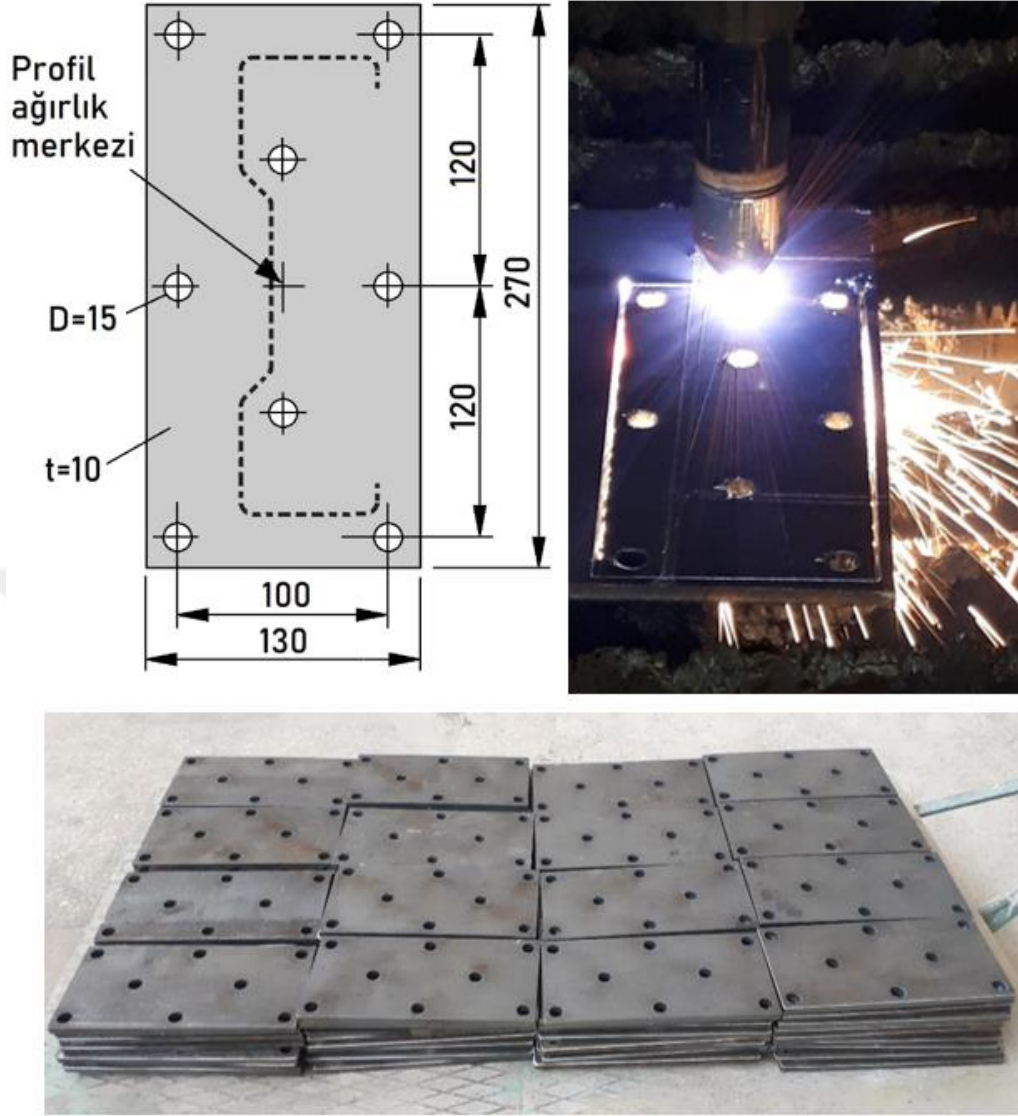
2.2.2. Sigma Profillerin Üretimi ve Deneye Hazırlanması

Boyutları yukarıda belirlenmiş ve Şekil 19(a)'da verilmiş olan sigma profil deney numuneleri, 1.5 mm kalınlığındaki galvanizli sac levhaların preste kesildikten sonra CNC preste bükülmesi suretiyle üretilmiştir (Şekil 28). Deney sonuçları üzerinde olası olumsuz etkisini önlemek için, kesme ve bükme işlemlerinde tüm profillerin boy doğrultusunun sacların üretim bandından çıkış doğrultusuna (boyuna doğrultu) denk gelmesine dikkat edilmiştir.



Şekil 28. Sigma profillerin üretimi ve topluca görünümü

Profillerin deney düzeneğine sağlam bir şekilde bağlanabilmesi için tasarlanan delikli başlık levhaları 10 mm kalınlıklı çelik levhadan CNC plazma kesimle üretilmiştir. Profil başlık levhalarının ölçü ve kesim işlemi ve genel görünümü Şekil 29'da verilmektedir.



Şekil 29. Profil başlık levhalarının ölçüleri, CNC plazmada kesilmeleri ve görünümleri

Bükme işlemleri tamamlanan sigma profil deney numunelerinin uçlarına başlık levhalarının başarılı bir şekilde kaynaklanabilmesi için, profillerin kaynaklama bölgesinde yaklaşık 20 mm yüksekliğindeki çinko galvaniz kaplaması %30'luk Hidroklorik asit (HCl) çözeltisine ortalama 20 dakika boyunca daldırılmak suretiyle aşındırılıp yok edilmiştir (Şekil 30). Ardından başlık levhaları uçlarına, profilin ağırlık merkezine denk gelecek şekilde ve dikliğe dikkat ederek, tüm kesit çevresince gazaltı (TIG) kaynağı ile kaynaklanmıştır. Özellikle tekrarlı deneylerde kopma olasılığına karşı profil dudaklarının çevresinin kaynağı güçlendirilmiştir (Şekil 31). Başlık levhalarının profillere kaynaklanmasıyla üretimleri tamamlanmış olan L= 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boylarındaki deney numunelerinin deneye hazır haldeki toplu görünüşü Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 30. Profillerin kaynaklama bölgesinde asit banyosu işlemi



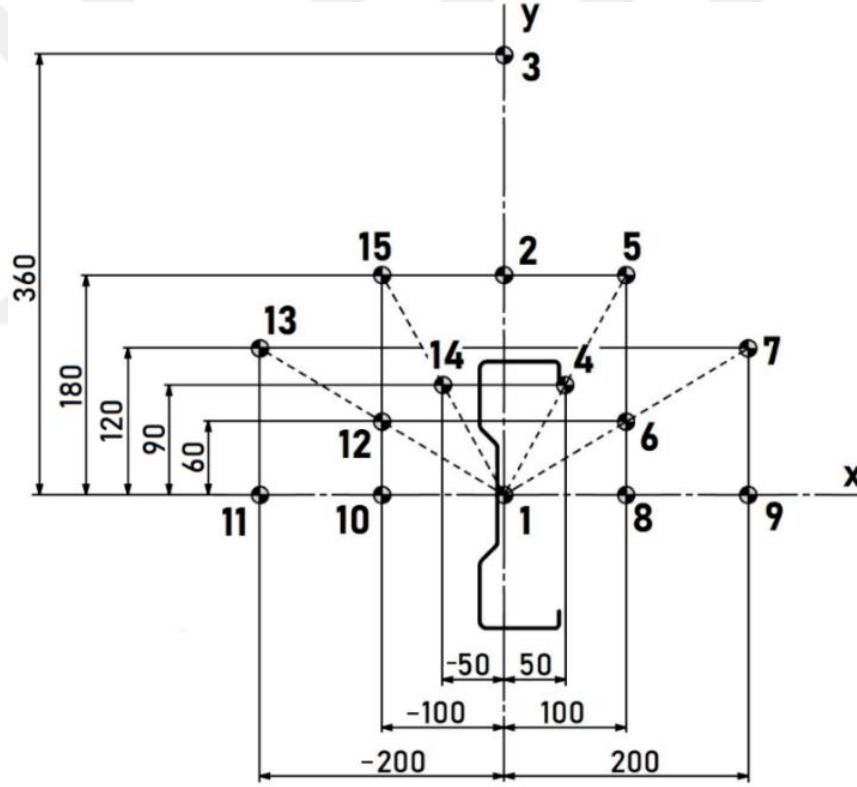
Şekil 31. Profil - başlık levhası kaynak dikişleri



Şekil 32. Sigma kesitli deney numuneleri (L=500 mm, 1000 mm ve 1500 mm)

2.2.3. Sigma Profiller Üzerinde Deneyler

Yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burkulma modlarını deneysel olarak gösterecek şekilde seçilmiş olan sigma profil numuneler üzerinde monotonik ve tersinir-tekrarlı eksenel ve eksantrik yüklemeler gerçekleştirilecektir. Planlanan deneysel çalışmada her bir profil seti için uygulanacak olan eksenel ve eksantrik yükleme noktaları Şekil 33'te, bu yüklemelerin daha detaylı gösterimi ise Tablo 4'te verilmektedir. Çalışma kapsamında, boyları 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm olarak belirlenen sigma profil numuneler üzerinde her bir boy için 15'er adet olmak üzere 45 adedi monotonik, 45 adedi de tersinir-tekrarlı olarak toplam 90 adet yükleme deneyi gerçekleştirilerek yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 33. Deneysel çalışmada profillere uygulanacak yükleme noktaları

2.2.3.1. Deney Düzenegi ve Ölçüm Sistemi

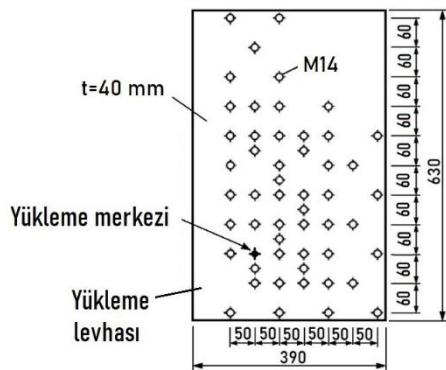
Sigma profiller üzerindeki deneysel çalışmaların tümü KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarının mevcut olanakları ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, HE B 200 profillerinden üretilen 460 cm yüksekliğindeki yükleme çerçevesi kullanılmıştır.

Tablo 4. Deneysel çalışmada profilere uygulanan yüklemelerin detayı

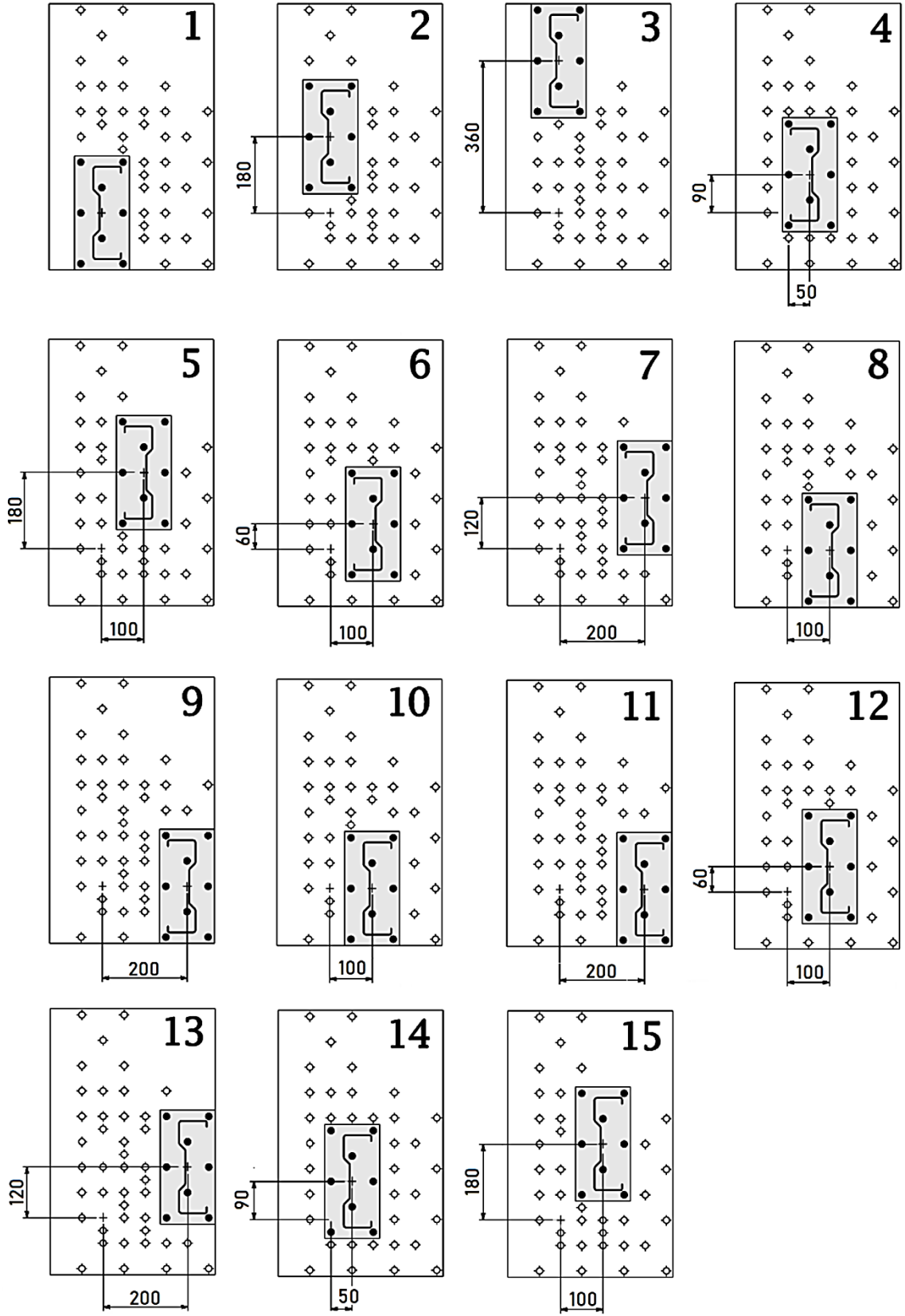
Yükleme noktası no	Noktanın Koordinatı (mm)		Yükleme	
	x	y		
1	0	0	P	Eksenel
2	0	180	P-M ₁	Asal ekseninde (x) eğilme
3	0	360	P-M ₁	Asal ekseninde (x) eğilme
4	50	90	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik eğilme
5	100	180	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik eğilme
6	100	60	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik eğilme
7	200	120	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik eğilme
8	100	0	P-M ₂ (+)	Asal ekseninde (y) eğilme
9	200	0	P-M ₂ (+)	Asal ekseninde (y) eğilme
10	-100	0	P-M ₂ (-)	Asal ekseninde (x) eğilme
11	-200	0	P-M ₂ (-)	Asal ekseninde (x) eğilme
12	-100	60	P-M ₁ -M ₂ (-)	Eğik eğilme
13	-200	120	P-M ₁ -M ₂ (-)	Eğik eğilme
14	-50	90	P-M ₁ -M ₂ (-)	Eğik eğilme
15	-100	180	P-M ₁ -M ₂ (-)	Eğik eğilme

Yükleme çerçevesi profillerinin iç başlıkları 30 cm aralıkla delinmiştir. Bu deliklerden 8 adet M20-10.9'luk yüksek dayanımlı cıvatalarla bağlanan rijit yüklem kırışi istenilen yüksekliğe ayarlanabilmektedir. Rijit kırışe tasarımda belirlenen eksantrisitede aktüatör sabitlenmiştir. Laboratuvarda mevcut 50 cm kalınlığa sahip delikli rijit döşemeye bağlanan ve böylece kapalı sisteme dönüştürülen yüklem çerçevesi içine yerleştirilen profil numunelerin her iki ucu mafsallı bağlanacak şekilde tasarlanmıştır.

Deney numunelerinin her iki ucuna kaynaklanmış olan delikli başlık levhalarının üstte olanı aktüatör mafsala, alttaki ise delikli rijit döşemeye sabitlenmiş mafsala bağlı 40 mm kalınlığındaki yüklem levhalarına bağlanmıştır. Monotonik ve tersinir-tekrarlı deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin genel görünümü ve yüklem levhalarının ölçüleri Şekil 34'te verilmektedir. Yüklem levhaları Şekil 33'te verilen yüklem noktaları planına (eksantrisitelere) ve başlık levhalarının delik düzenine uygun olarak yarı simetrik bir şekilde delinmiş ve deliklere M14 diş çekilmiştir. Böylece numuneler, uçlarındaki başlık levhalarından yüklem levhalarına imbus başlı M14 cıvatalarla rijit bir şekilde bağlanmıştır. Deneyler yapılırken, aynı yüklem noktasına ikinci profil döndürülerek yerleştirilmiş ve örneğin, 7 numaralı yüklemenin M_2 momenti açısından ters işaretlisi olarak simetriği olan 13 numaralı yüklem deneyi yapılabilmektedir. Her boya ait serideki 15 adet numunenin yüklem levhası üzerindeki yüklem konumları, daha detaylı olarak, yüklem noktası numarasına göre Şekil 35'te gösterilmiştir.



Şekil 34. Deney düzeneğinin genel görünümüleri yükleme levhalarının ölçüleri



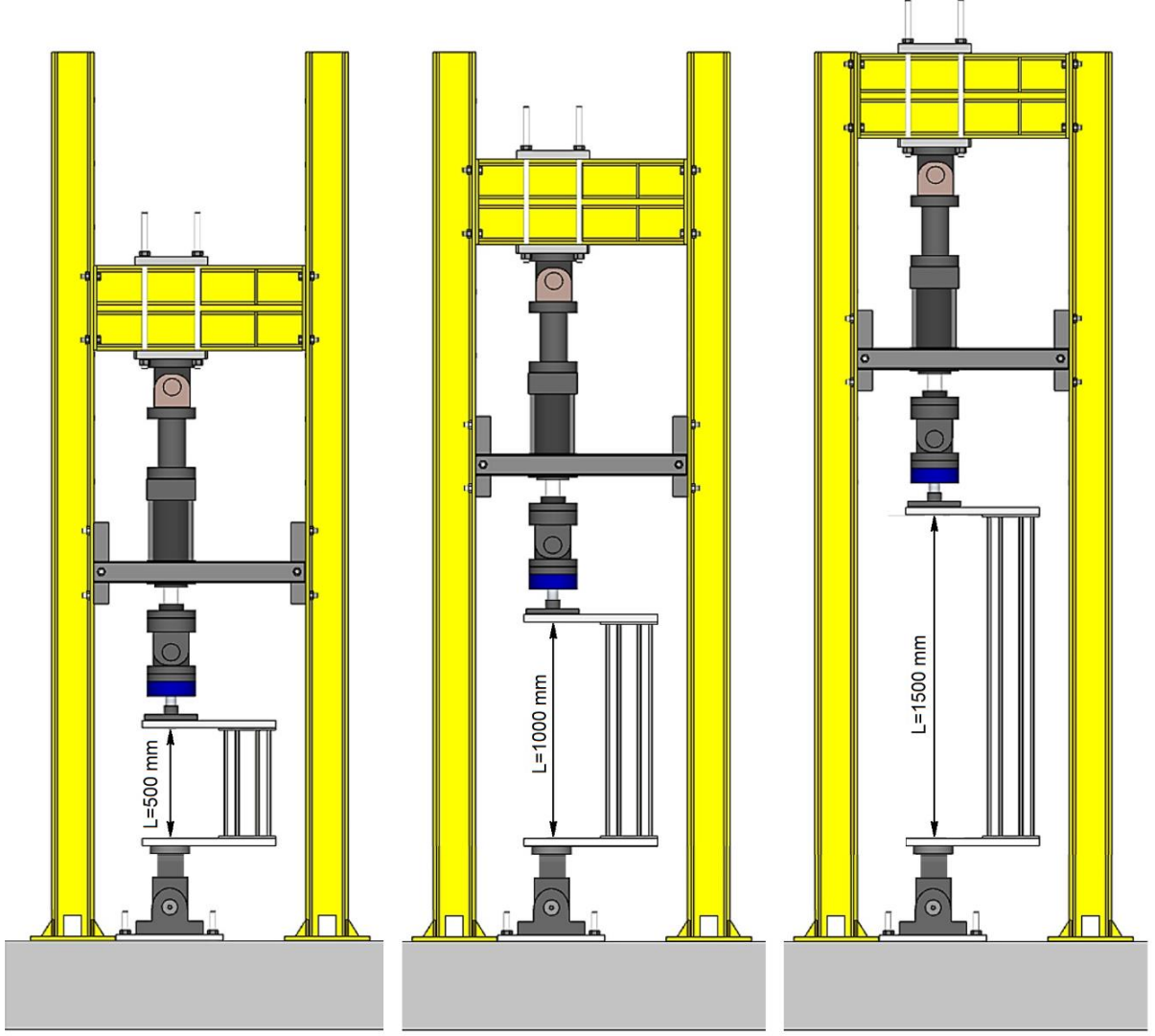
Şekil 35. Profil numunelerin yükleme numarasına göre yükleme levhalarındaki konumları

Tasarım gereği, mafsall dönme merkezi ile numune arasındaki mesafe her iki uçta da 365 mm'dir. Ayrıca, 40 mm kalınlıklı yükleme levhalarının ağırlıklarının deney sırasında okunan yük değerleri üzerindeki yanıltıcı etkisini engellemek için makaralı bir karşı ağırlık sistemi tasarlanarak, yükleme levhalarının boştayken yatay dengede kalabilmesi sağlanmıştır(şekil 36).



şekil 36. Yükleme levhalarının karşı ağırlıkla dengelenmesi

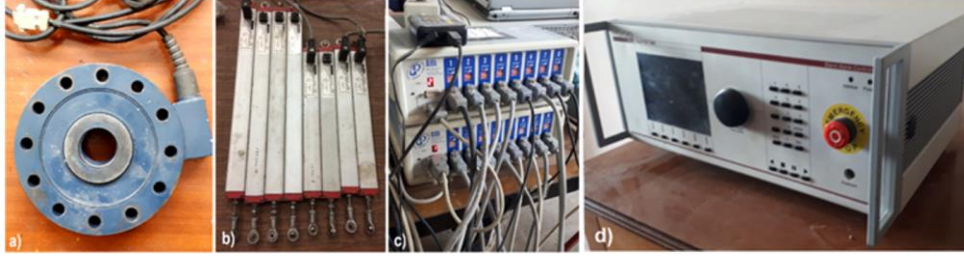
Deney düzeneği ve ölçüm sistemi, deneyler sırasında boyları 500 mm, 1000mm ve 1500 mm olan numune setleri için ayrı ayrı seviyelerde ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır (şekil 37). Üst yükleme levhasının bağlandığı aktüatör mafsall ise, bir ekseninde diğer eksene göre düşük dönme kapasitesine sahip olduğundan, deney sırasında numunenin dönme davranışını sınırlamamak için, uygulanacak eksantrisiteye göre her deney öncesi elle çevrilerek ayarlanmıştır.



Şekil 37. Deney düzeneğinin numune boyuna göre ayarlanmış durumları

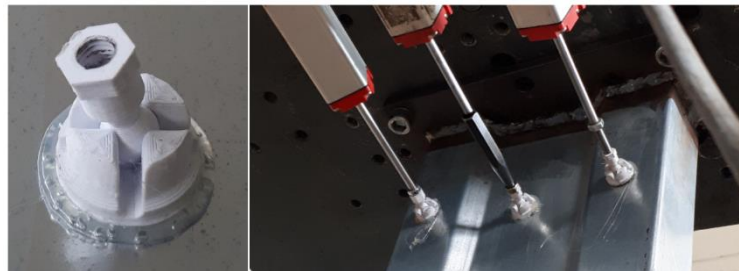
Sigma profiller üzerinde uygulanan monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler, yarı statik (quasi-statik) ve yerdeğiştirme kontrollü olarak, Dartec marka 280 kN kapasiteli servo-hidrolik aktüatör kullanılarak uygulanmıştır. Aktüatör, Moog marka deney kontrol kutusu ile kumanda edilmiştir (Şekil 38-d).

Yük ölçümünde aktüatör ile numune arasına yerleştirilen 500 kN kapasiteli itme-çekme tip elektronik yük hücresi (Load-cell), yerdeğiştirme ölçümünde iki ucu mafsallı çeşitli ölçüm boyu kapasitelerindeki potansiyometrik cetveller (LPDT), verilerin toplanıp bilgisayar ortamına aktarılmasında ise TDG (Ai8b) marka 16 kanallı elektronik veri toplayıcı (Data-Logger) kullanılmıştır (Şekil 38-a-b-c).

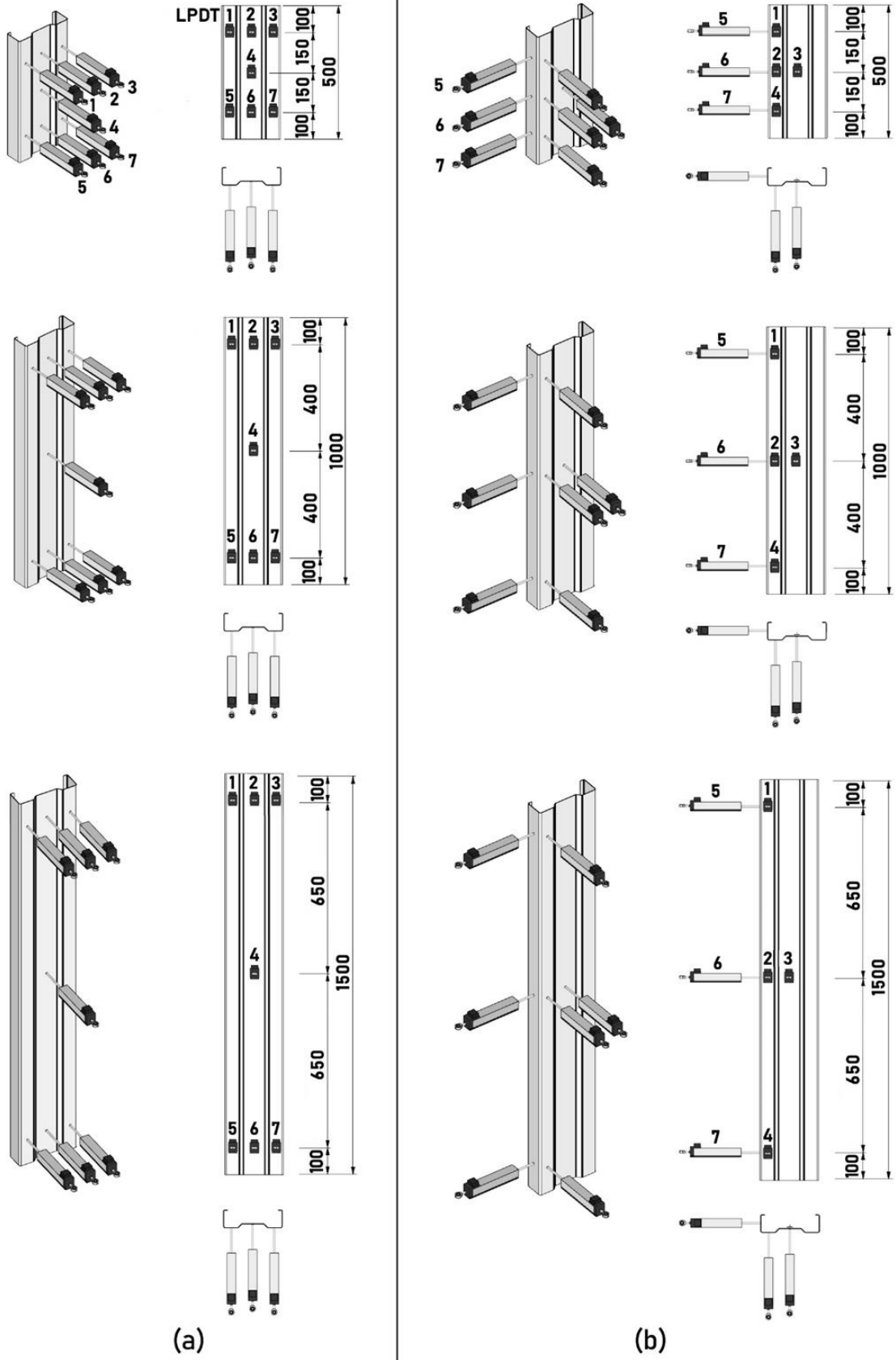


Şekil 38. Kullanılan deneysel ekipmanlar: (a) yük hücresi, (b)LPDT'ler, (c) veri toplayıcı ve (d) deney kontrol kutusu

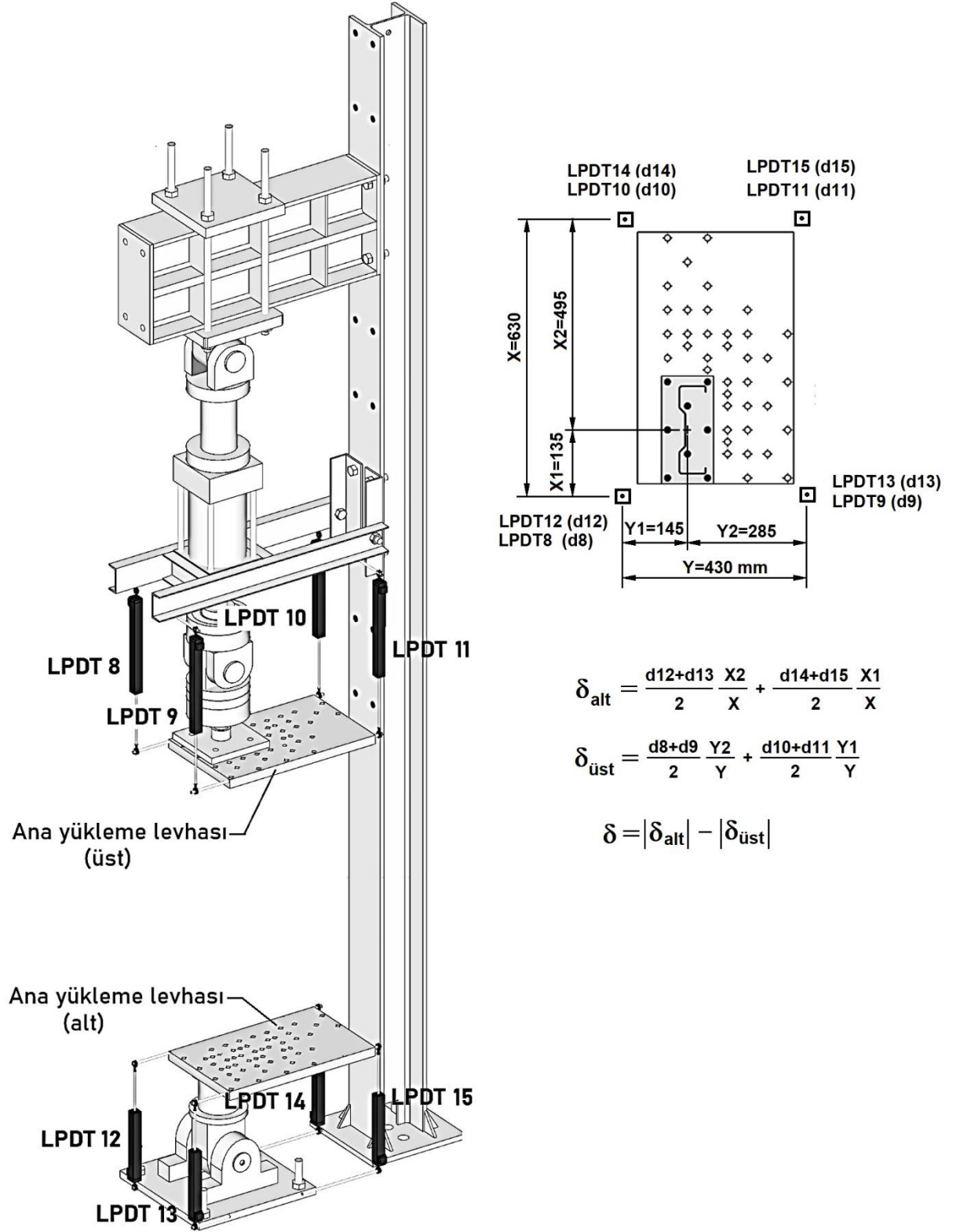
Deneylerdeki tüm ölçümler elektronik olarak gerçekleştirildiğinden, yük ve ölçüm sistemi için kullanılabilecek bileşenlerin adedi eldeki mevcut veri toplayıcının kanal adedi kadar olabildiğinden, bir adedi yük hücresine ayrıldıktan sonra geri kalan 15 kanalın tümü yerdeğiştirme ölçümleri için kullanılmıştır. Bu durumda alt ve üst yükleme levhalarının dönmelerini ve düşey yerdeğiştirmeyi belirleyebilmek için her birine köşelerinden 4'er adet LPDT yerleştirilmiştir. Kalan 7 adet LPDT ise deney profillerinin burkulmaları ölçebilmek için, gövde ve flanşlarına boyları ve eksantrisiteye göre zorlanma durumlarını göz önüne alarak, farklı düzenlemelerle yatay doğrultuda yerleştirilmiştir. LPDT'lerin galvanizli profillere hasar vermeden ve burkulma davranışını etkilemeyecek bir teknikle bağlanabilmesi için, yapı mekaniği deneylerinde ilk defa olarak, tarafımızdan tasarlanıp 3D yazıcıda üretilen plastik mafsallar kullanılmıştır. Çok defa kullanılabilen bu mafsallar LPDT'lerin ucuna vidalanmış ve bunlar profillere sıcak silikonla yapıştırılmıştır. Mafsallar deneyler boyunca hem dönme kapasiteleri, hem de yapışma dayanıklılığı olarak başarılı olmuştur. Plastik mafsallara ilişkin görünüm Şekil 39'da, her bir farklı durum için profillere yerleştirilen LPDT'lerin konumları Şekil 40'ta, yükleme levhalarına yerleştirilen LPDT'lerin konumları ve düşey yerdeğiştirmenin hesaplanması Şekil 41'de, deneylerden genel görünüm ise Şekil 42'de verilmiştir.



Şekil 39. Profile silikonla yapıştırılan plastik mafsallar ve deney anından bir görünümü



Şekil 40. Profillerde LPDT yerleşimi: a) Gövdeden okuma, b) Gövde ve flanştan okuma



Şekil 41. Yükleme levhalarına bağlanan LPDT'lerin yerleşimi ve düşey yerdeğiştirmenin hesabı



Şekil 42. Profil yükleme deneylerinden görünüm

2.2.3.2. Monotonik Deneylerde Uygulanan Yükleme

Yarı-statik (quasi-static) olarak gerçekleştirilen bu deneylerde kullanılan yükleme hızı “AISI-S910-08 (2008) yönetmeliğinde önerilen 21 MPa/dak gerilme değerini aşmayacak şekilde seçilmiştir. Buna göre yükleme hızı, $\sigma = E \varepsilon$ genel bağıntısından, $\Delta L = 21L / 184000$ olmak üzere;

L= 500 mm için : $\Delta L = 0.06$ mm/dak

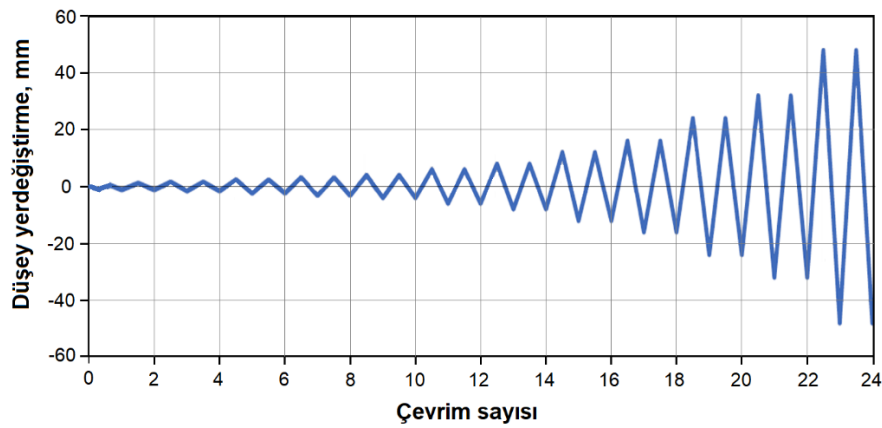
L= 1000 mm için : $\Delta L = 0.12$ mm/dak

L= 1500 mm için : $\Delta L = 0.20$ mm/dak olarak uygulanmıştır.

Ayrıca, Monotonik deneylerde yüklemeler yük taşıma kapasitesinde % 40 düşüş oluncaya kadar devam ettirilmiştir.

2.2.3.3. Tersinir-Tekrarlı Deneylerde Uygulanan Yükleme

Yarı statik ve yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen bu deneylerde, tersinir-tekrarlı yükleme için FEMA–461 (2007)’de tanımlanan iki tekrarlı yükleme protokolü esas alınmıştır (Şekil 43). Protokolde her iki tekrar sonrasında yerdeğiştirme değeri %40 artırılmaktadır.



Şekil 43. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü

FEMA-461 (2007) Yükleme protokolü uyarınca, yüklemenin 4. Adımı oluşturan 7 ve 8. çevrimlerinde elastik eksenel yerdeğiştirme değeri olan $\delta_e = P_e L / AE$, hedef yerdeğiştirme

olarak uygulanmıştır. Elastik burkulma yükü, P_e , ise the AISI-S100-12 standardına göre hesaplanmıştır. Buna göre, 7. çevrimden geriye ters işlem yaparak her adımda uygulanacak yerdeğiştirme %40 azaltılarak başlangıç yerdeğiştirmesi 0.7 mm olarak uygulanmıştır. Tersinir-tekrarlı yükleme hızları ise 0.008 mm/mm/dak alınıp (Padilla-Llano, 2015), $\Delta L = 0.008L$ şeklinde hesaplanarak;

$L = 500$ mm için : $\Delta L = 4$ mm/dak

$L = 1000$ mm için : $\Delta L = 8$ mm/dak

$L = 1500$ mm için : $\Delta L = 12$ mm/dak olarak uygulanmıştır.

2.3. Sonlu Eleman Analizleri

2.3.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Hafif çelik sigma profillerdeki enerji sönümleme mekanizmalarının neler olduğu ve elastik olmayan şekil değiştirmelerle hasarın tekrarlı yükleme sırasında nasıl yığıldığı açıklamak için ABAQUS programı ile nonlinear (doğrusal olmayan) sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde hasarı ve parçalar arasındaki etkileşimi dikkate alan, geometri ve malzeme açısından doğrusal olmayan üç boyutlu modelleme teknikleri kullanılmıştır.

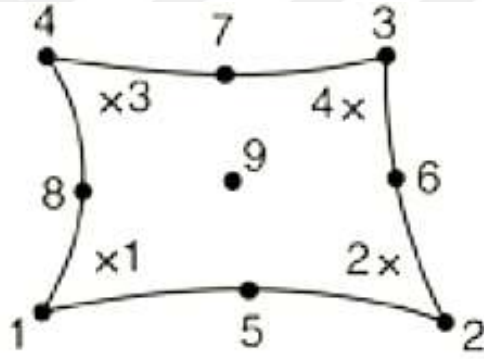
Hafif çelik sigma kesitli profil öncelikle CUFSM (Schafer ve Adany, 2006) modellenerek özvektör burkulma analizleri ile baskın burkulma modları saptanmıştır. Ardından bu burkulma modları Tablo 5’te verilen %50 oluşum ihtimalinde belirtilen büyüklüklerle ölçeklendirilerek ABAQUS sonlu eleman modellerine ön kusur olarak aktarılmıştır. ABAQUS sonlu eleman göçme analizleri doğrusal olmayan malzeme ve geometriyle “Riks arc-length” yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Ön kusur büyüklükleri (Zeinoddini ve Schafer, 2012)

Aşılma ihtimali (%)	Yerel (δ/t)	Çarpılmalı (δ/t)	Zayıf Eksen (L/δ)	Güçlü Eksen (L/δ)	Burulma (Derece/m)
25	0.17	0.43	4755	6295	0.20
50	0.31	0.75	2909	4010	0.30
75	0.54	1.14	1659	2887	0.49

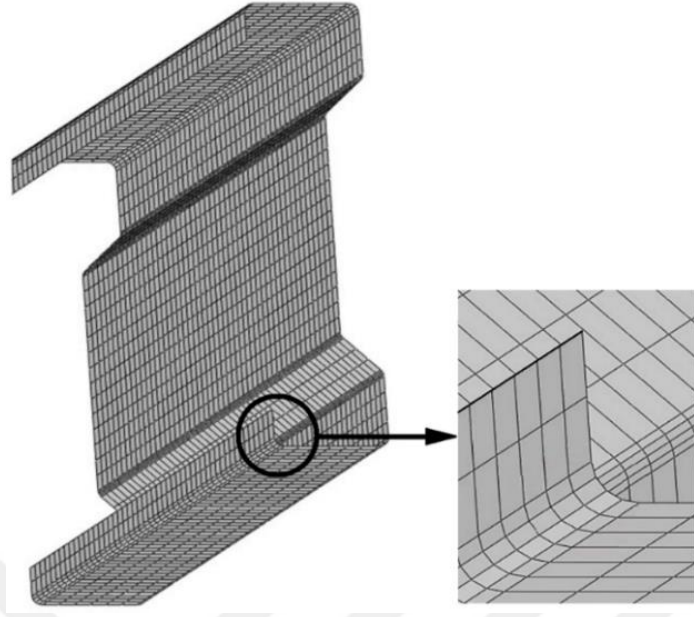
2.3.2. Sonlu Eleman Tipi ve Sonlu Eleman Ağı

Sonlu eleman modellemelerinde, Şekil 44'te gösterilen azaltılmış integrasyon noktalarına sahip S9R5 kodlu 9 nodlu ABAQUS kabuk elemanı kullanılmıştır. İkinci derece kabuk elemanı olan S9R5 elemanı Kirchhoff sınır koşullarını kullanmaktadır. Elemanın her köşe noktası 3 yerdeğiştirme ve 2 düzlem içi dönme olmak üzere toplam 5 serbestlik derecesine sahiptir ve tek bir eleman çift eğrilik oluşumuna izin vermektedir. Bu nedenle oldukça büyük dönmelerin ya da burkulmaların meydana geldiği uygulamalarda kullanılmakla birlikte yalnızca küçük şekildeğiştirmelere izin vermektedir. Schafer vd. (2010) yaptıkları çalışmada, S9R5 kabuk elemanının S4, S4R ve S8R5 gibi alternatif kabuk elemanlara göre hesaplama süresi bakımından daha verimli ve ince cidarlı elemanların modellemelerinde oldukça doğru sonuçlar verdiğini göstermiştir.



Şekil 44. S9R5 kabuk sonlu elemanı (ABAQUS user's manual)

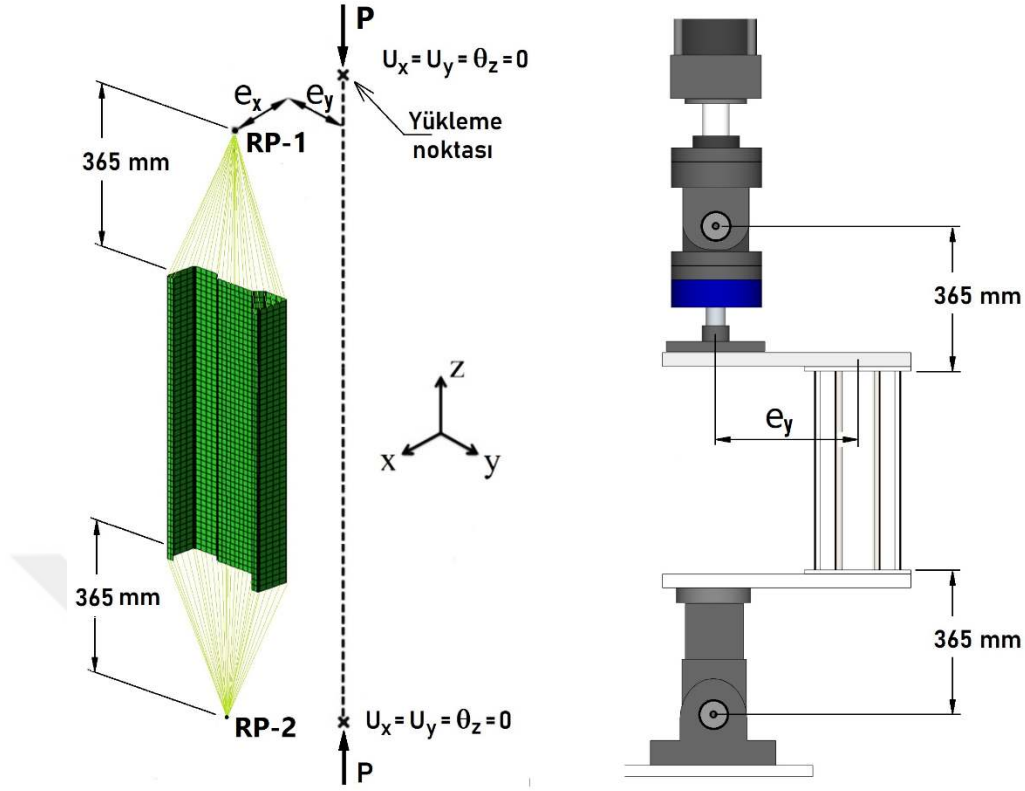
S9R5 kabuk elemanının kalınlığı boyunca 7 integrasyon noktası kullanılırken, soğuk bükme nedeniyle oluşan artık gerilmelerin eleman dayanımı üzerindeki etkisi literatürde yer alan çalışmalara göre (Torabian vd., 2016) ihmal edilebilecek seviyede olduğu için sonlu eleman modellemelerinde göz ardı edilmiştir. Modellemede sonlu elemanların en/boy oranlarının hem boyuna, hem de enine doğrultuda 1'e yakın olması dikkat edilmiş ve en büyük eleman boyutu 10 mm olarak seçilmiştir. Köşe bükümlerinde ise 4 sonlu eleman kullanılmıştır. Numunelerin sonlu eleman modeli ve ağ sıklığı Şekil 45'te görülmektedir.



Şekil 45. Modellemede uygulanan sonlu eleman ağı

2.3.3. Yükleme ve Mesnet Koşulları

Deneysel çalışmadaki sınır koşullarını sonlu eleman modeline yansıtabilmek için numunenin her iki ucundaki kesit ağırlık merkezlerinden deney düzeneğindeki mafsalları temsil etmek için numune uçlarından 365 mm uzaklıktaki referans noktasına rijit kiriş tipi MPC (Multi Point Constraint) kontrol noktaları atanmıştır. Eleman uçlarındaki kesitin davranışı bu noktalardan sağlandığından mesnet koşulları da bu noktalara tanımlanmıştır. Şekil 46’da görüldüğü gibi, eksantrik olarak yapılan yüklemeler bu kontrol noktalarının x ve y yönünde hareket ettirilmesiyle uygulanmıştır. Mesnet koşulları ise, yükleme (düşey yerdeğiştirme) yapılan üst uçta eksenel yerdeğiştirme, kuvvetli ve zayıf eksen dönmeleri serbest, burulma tutulu; numunenin diğer ucunda ise farklı olarak yalnızca eksenel yerdeğiştirme de tutulu tanımlanmıştır.

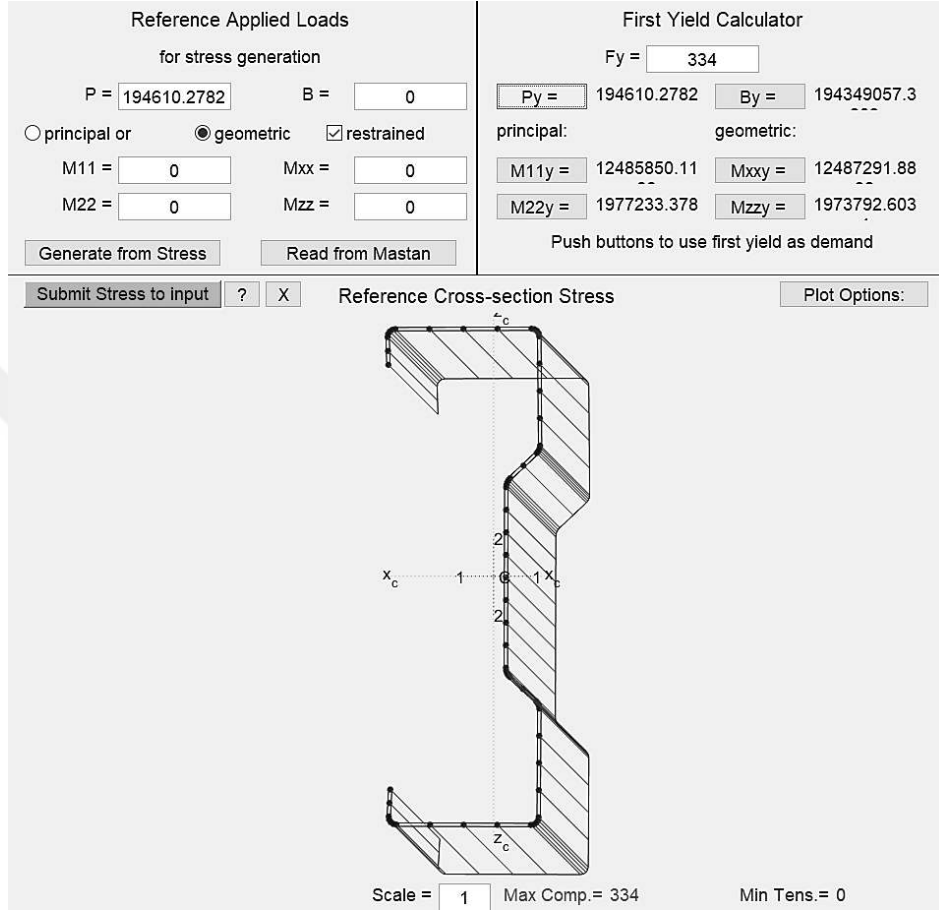


Şekil 46. Sonlu eleman modeli ve mesnet koşulları

2.3.4. Geometrik Ön Kusurların Belirlenmesi

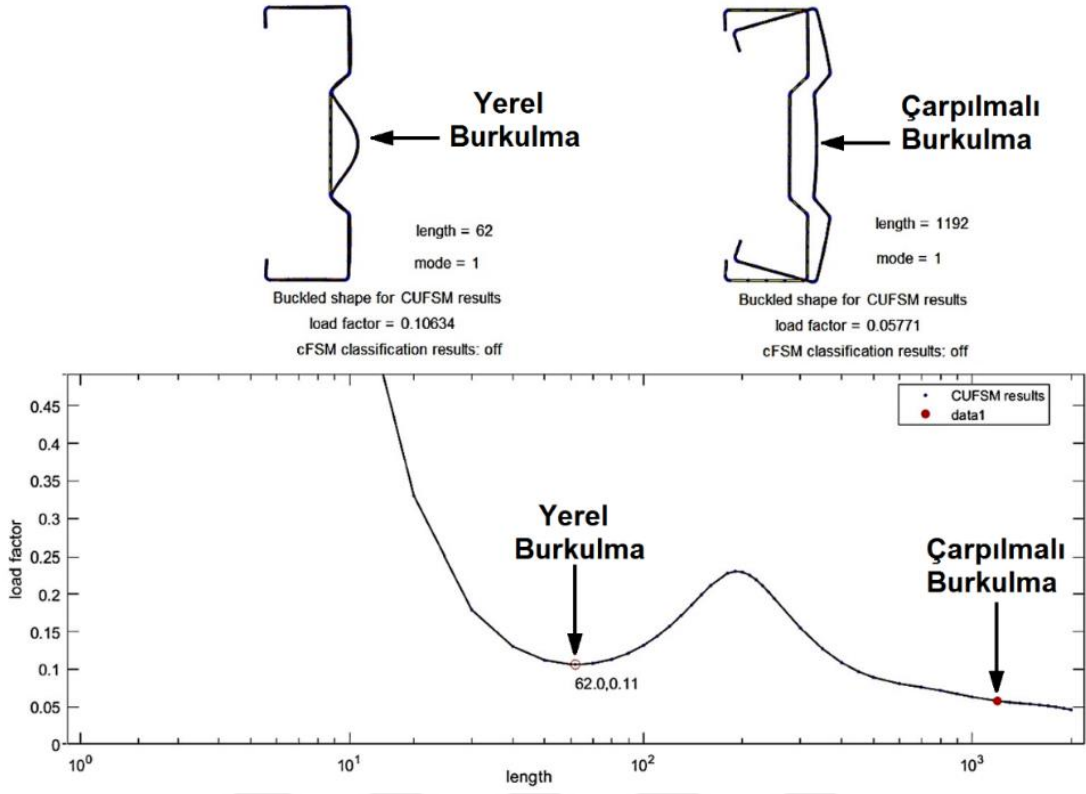
Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik profillerin taşıma kapasitelerini ve burkulma sonrası davranışını doğru tespit edebilmek için, malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan sonlu eleman modellemelerine geometrik ön kusurların da dahil edilmesi oldukça önemlidir. Ön kusurlar; profiller üzerinden gerçek hassas ölçümlerin alınması ya da burkulma analizlerinden elde edilen, büyük çoğunlukla ilk burkulma modunun profil et kalınlığı ya da narinliğin bir fonksiyonu olarak kullanılmasıyla belirlenmektedir. Ancak, kolaylık sağlamakla birlikte, ön kusur dağılımlarını burkulma modlarını kullanarak modellemenin fiziksel olarak gerçek bir dayanağı bulunmamaktadır ve oluşan göçme durumları her zaman burkulma modlarına göre ortaya çıkmamaktadır. Bununla birlikte deneylerde elde edilen taşıma kapasitelerinin sonlu eleman modellerinden de elde edilmesini sağlayacak ön kusur büyüklüklerinin seçilmesi en sık kullanılan yöntemdir. Şekil 47’de CUFSM yazılımında oluşturulan sigma profil ve aksenal yükleme altındaki gerilme durumunun arayüz ekran

görüntüsü verilmektedir. Arayüzde, kupon çekme deneylerinden elde edilen 334 MPa akma dayanımına ve kesit özelliklerine göre hesaplanan kesiti akmaya ulaştıracak eksenel yük (P_y), güçlü (M_{11y}) ve zayıf (M_{22y}) eksen eğilme kapasiteleri de görülmektedir.



Şekil 47. CUFSM’de enkesitteki gerilme durumu

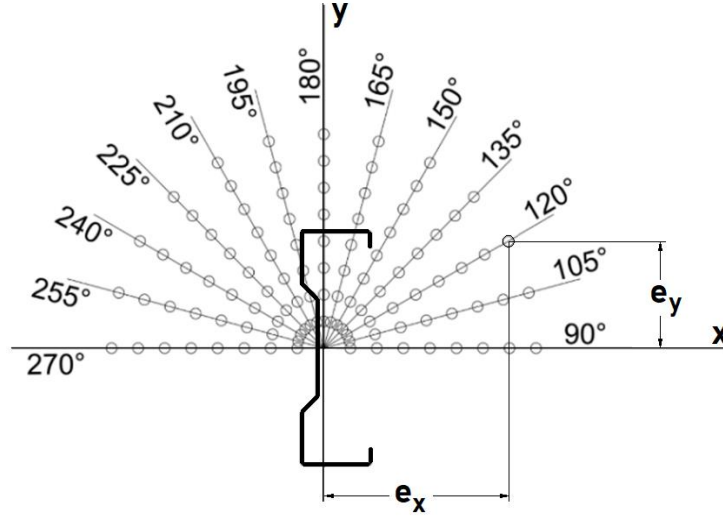
Aşağıdaki Şekil 48’de ise, CUFSM yazılımında eksenel yükleme altında oluşan gerilme dağılımına göre gerçekleştirilen burkulma analizlerinden elde edilen yerel ve çarpılmalı burkulma mod şekilleri ve oluştukları yarım dalga boyları görülmektedir. Bu modlar daha önce Tablo 6’da verilen %50 oluşma ihtimaline göre kullanılan büyüklüklerle genişletilerek doğrudan yazılımın arayüzü aracılığıyla ABAQUS sonlu eleman modeline dönüştürülmüştür.



Şekil 48. CUFSM'den elde edilen yerel ve çarpılmalı burkulma modları

2.4. Sigma Profiller Üzerinde Parametrik Çalışma

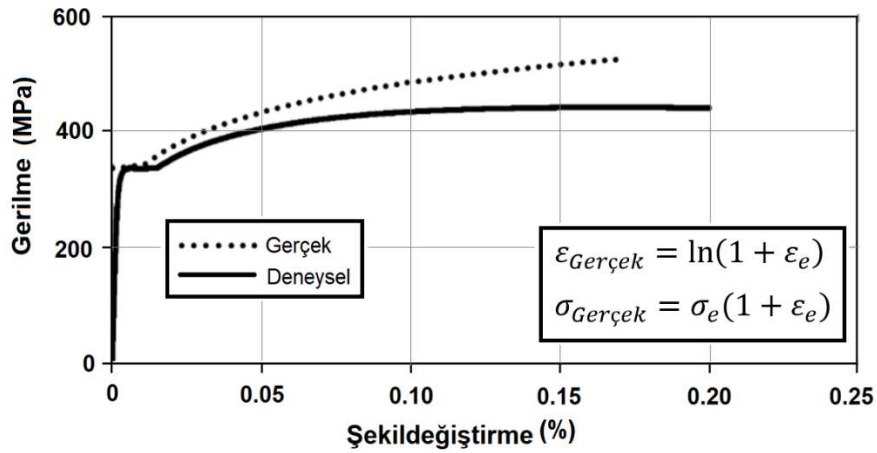
Hafif çelik sigma profillerin yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burkulma davranışını incelemek amacıyla daha önce hesapla belirlenerek Şekil 19-a'da verilmiş olan H=220 m yüksekliğe sahip enkesitin L= 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boylarındaki numunleri üzerinde 105 farklı noktadan yüklemelerin yapıldığı çok sayıda sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde uygulanan yükleme noktalarının enkesite göre konumları Şekil 49'da verilmektedir. Aralarında 15° 'lik açı olacak şekilde ve her bir radyal doğrultu üzerinde 8 adet olmak üzere yerleştirilmiş bu noktaların enkesitin ağırlık merkezin uzaklıklarını gösteren eksantrisite değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 49. Parametrik çalışmada yükleme noktaları

2.4.1. Malzeme Modeli

Monotonik kupon çekme deneylerinden elde edilen ortalama gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin ABAQUS'te yapılacak sonlu eleman analizlerinde kullanılabilmesi için öncelikle bu eğrilerin gerçek gerilme-gerçek şekildeğiştirme eğrilerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Aşağıda verilen denklemler kullanılarak deneysel (mühendislik) gerilme şekildeğiştirme eğrisi Şekil 50'de görüldüğü gibi gerçek gerilme-gerçek şekildeğiştirme eğrisine dönüştürülmüştür. Malzeme modelinde çeliğin poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır. Plastik bölge için von Mises akma kuralı ve izotropik pekleşme modeli kullanılmıştır.



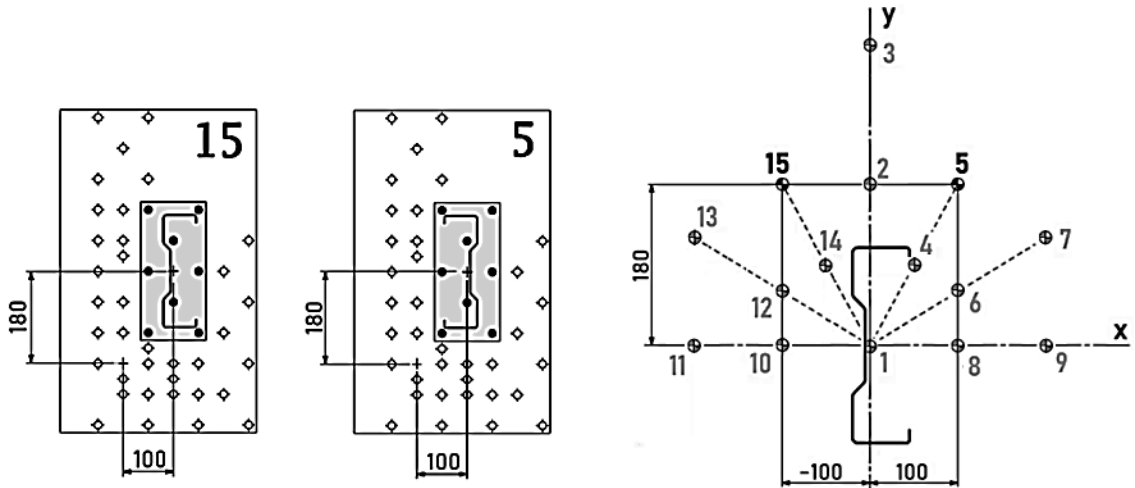
Şekil 50. Deneysel ve gerçek gerilme - şekildeğiştirme eğrileri

Tablo 6. Profillere uygulanan yükleme noktalarının eksantrisiteleri

Açı	Eksantrisite (mm)								
90°	e _x	25	50	75	100	125	150	175	200
	e _y	0	0	0	0	0	0	0	0
105°	e _x	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
	e _y	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
120°	e _x	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
	e _y	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
135°	e _x	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
	e _y	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
150°	e _x	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
	e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
165°	e _x	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
	e _y	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
180°	e _x	0	0	0	0	0	0	0	0
	e _y	25	50	75	100	125	150	175	200
195°	e _x	-6.47	-12.94	-19.41	-25.88	-32.35	-38.82	-45.29	-51.76
	e _y	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
210°	e _x	-12.50	-25.00	-37.50	-50.00	-62.50	-75.00	-87.50	-100.00
	e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
225°	e _x	-17.68	-35.36	-53.03	-70.71	-88.39	-106.07	-123.74	-141.42
	e _y	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
240°	e _x	-21.65	-43.30	-64.95	-86.60	-108.25	-129.90	-151.55	-173.21
	e _y	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
255°	e _x	-24.15	-48.30	-72.44	-96.59	-120.74	-144.89	-169.04	-193.19
	e _y	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
270°	e _x	-25	-50	-75	-100	-125	-150	-175	-200
	e _y	0	0	0	0	0	0	0	0

3. BULGULAR VE İRDELEME

Deney düzeneğindeki yükleme levhalarının yarı simetrik olarak tasarlanıp imal edilmeleri nedeniyle, aynı eksantrisite için iki yükleme noktasına ait deneyler, profilin aynalama şeklinde, enkesite dik z eksenine etrafında 180° döndürölüp yerleştirilmesiyle yapılabilmektedir. Daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla, örnek olarak 5 ve 15 numaralı simetrik yükleme noktaları için profiller yükleme levhalarına aşağıdaki şekil 51’de verildiğı gibi bağılanmışlardır. Numunelere deney etiketi olarak ise, M_2 momenti ağısından profil dudaklarını basan (Gövdeyi çeken) yüklemelere “N”, dudakları çeken (Gövdeyi basan) yüklemelere ise “P” kodu verilmiştir. Böyle deney etiketlerinde sırasıyla; monotonik yükleme için “M”, tersinir-tekrarlı yükleme için “C”, profil boyu için 500, 1000 ya da 1500, e_x ve e_y eksantrisiteleri ve M_2 moment yönü için “N” ya da “P” harflerine yer verilmiştir. Bu şekilde adlandırılan monotonik ve tersinir-tekrarlı deneylerde yükleme noktalarına karşılık gelen etiketlerin listesi, örnek olarak $L=500$ mm’lik numuneler için, Tablo 7’de topluca verilmiştir.



şekil 51. Simetrik yükleme noktaları için profil konumları

Tablo 7. Deneylerde yükleme noktalarına karşılık gelen numune etiket kodları

Yükleme noktası	Koordinat (mm)		Yükleme	Numune etiket kodu	
	x	y		Monotonik	Tersinir-Tekrarlı
1	0	0	P	M.500.0.0	C.500.0.0
2	0	180	P-M ₁	M.500.0.180	C.500.0.180
3	0	360	P-M ₁	M.500.0.360	C.500.0.360
4	50	90	P-M ₁ -M ₂ (+)	M.500.50.90.N	C.500.50.90.N
5	100	180	P-M ₁ -M ₂ (+)	M.500.100.180.N	C.500.100.180.N
6	100	60	P-M ₁ -M ₂ (+)	M.500.100.60.N	C.500.100.60.N
7	200	120	P-M ₁ -M ₂ (+)	M.500.200.120.N	C.500.200.120.N
8	100	0	P-M ₂ (+)	M.500.100.0.N	C.500.100.0.N
9	200	0	P-M ₂ (+)	M.500.200.0.N	C.500.200.0.N
10	-100	0	P-M ₂ (-)	M.500.100.0.P	C.500.100.0.P
11	-200	0	P-M ₂ (-)	M.500.200.0.P	C.500.200.0.P
12	-100	60	P-M ₁ -M ₂ (-)	M.500.100.60.P	C.500.100.60.P
13	-200	120	P-M ₁ -M ₂ (-)	M.500.200.120.P	C.500.200.120.P
14	-50	90	P-M ₁ -M ₂ (-)	M.500.50.90.P	C.500.50.90.P
15	-100	180	P-M ₁ -M ₂ (-)	M.500.100.180.P	C.500.100.180.P

3.1. Monotonik Deney Sonuçları

Bu başlık altında, hafif çelik sigma profil numunelerin yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarını deneysel olarak görebilmek amacıyla, eksenel ve eksantrik yük altında yarı-statik ve yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen toplam 45 adet monotonik yükleme deneyinin sonuçları verilmektedir. Sigma profiller üzerinde gerçekleştirilen monotonik yükleme deneylerine ait bazı görünümeler Şekil 52'de verilmektedir.



Şekil 52. Monotonik yükleme deneylerinden görünüm

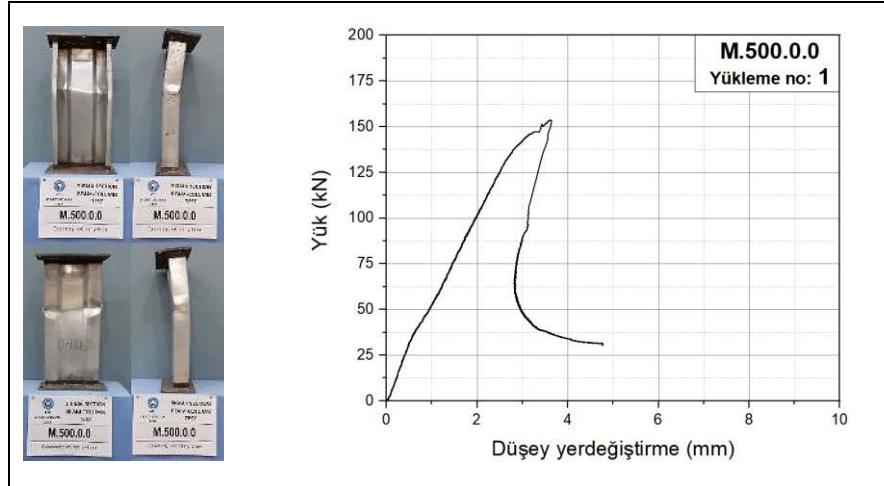
3.1.1. L=500 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları

L=500 mm boyundaki 15 adet sigma profil numune üzerinde gerçekleştirilen monotonik deneyler sonrasında numunelerin toplu görünümü Şekil 53'te verilmektedir.

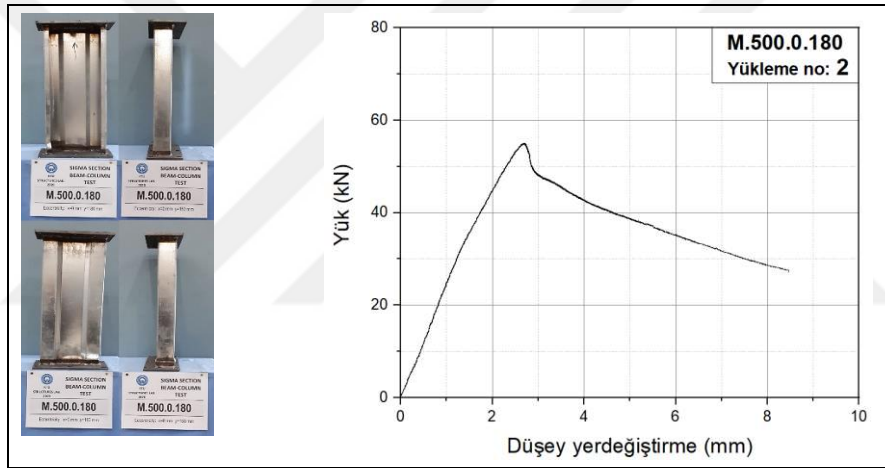


Şekil 53. L=500 mm'lik numunelerin monotonik deneyler sonrası görünümü

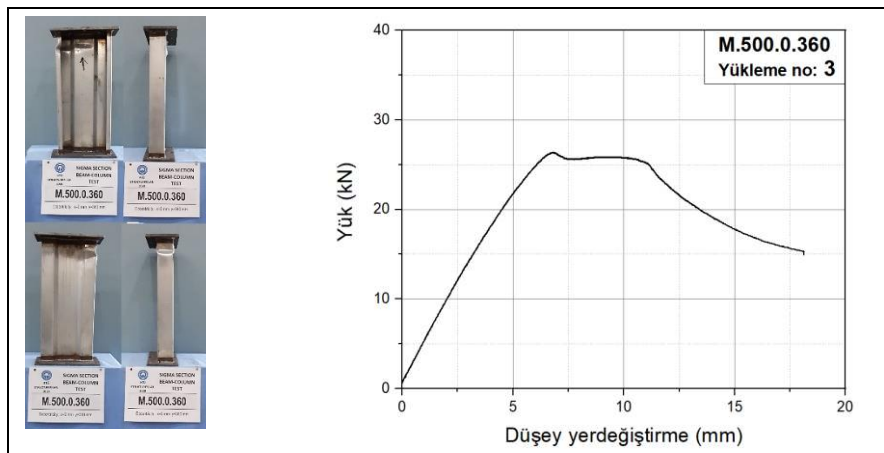
Çalışmada ilk olarak eksenel yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneye ait burkulma görüntüleri ve yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 54'te verilmektedir. Tüm kesitte oluşan basınç gerilme dağılımını sonucunda profil gövdesinde yerel burkulma oluşmuştur. Şekil 55'te, $e_y=180$ mm eksantrik yüklü, yalnızca kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.500.0.180 numunesinin deney sonundaki hali ve yük-yerdeğiştirme eğrisi görülmektedir. Bu numunedeki şekildeğiştirme taban plakası ile numunenin kaynaklandığı bölgede yerel olarak meydana gelmiştir. Şekil 56'da ise, $e_y=360$ mm eksantrik yüklü, yalnızca kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.500.0.360 numunesinin deney sonundaki hali ve yük-yerdeğiştirme eğrisi görülmektedir. Bu numunede yükleme doğrultusundaki flanşa oluşan yerel burkulma açık olarak görülmektedir. Yerel burkulmaların gözlenebildiği bu deney numunelerinde deney sırasında oluşan yerel burkulmaların ilk oluşum anının fotoğraflanması mümkün olmadığından deney sonu fotoğraflarının verilmesiyle yetinilmiştir.



şekil 54. M.500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

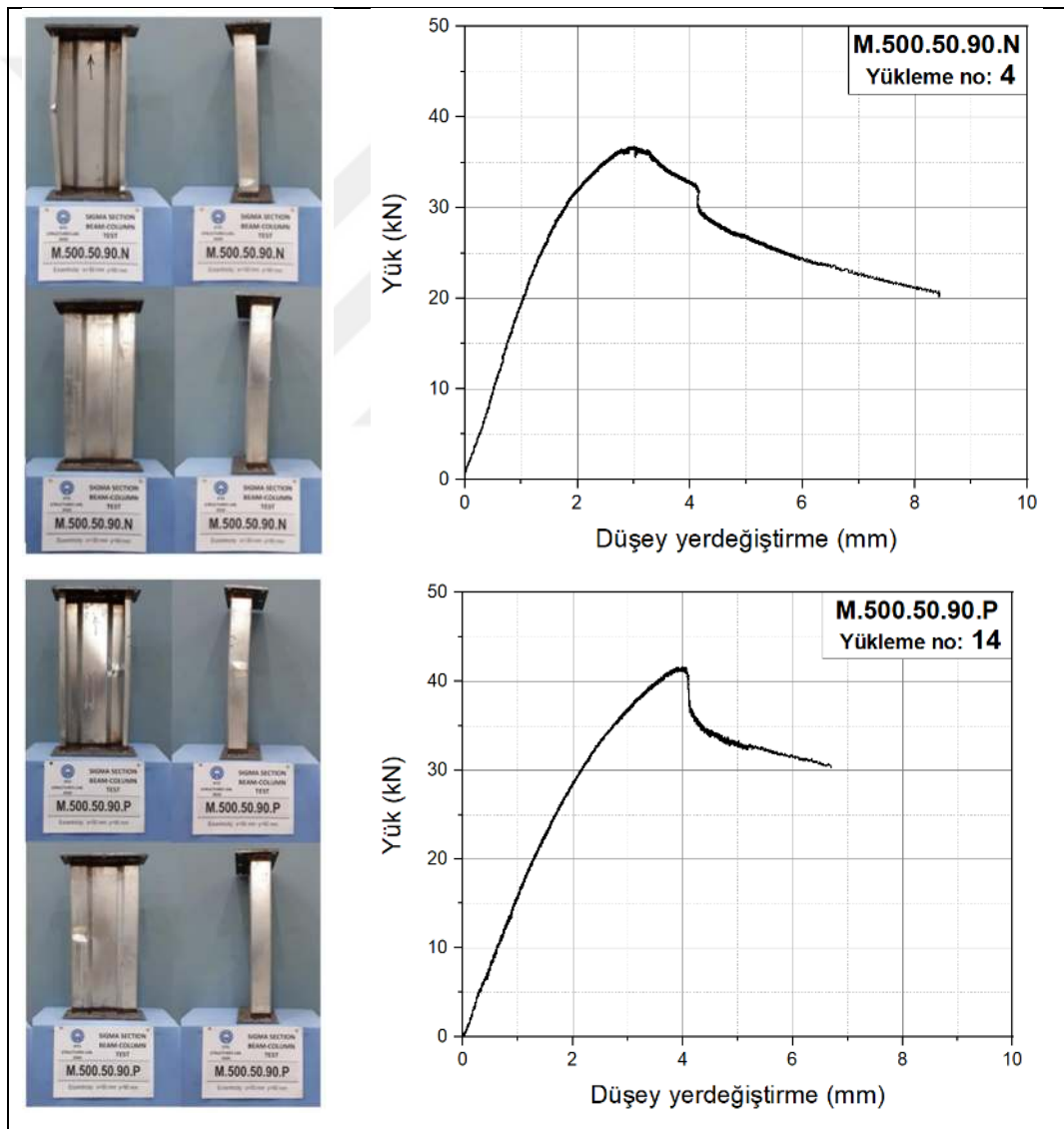


şekil 55. M.500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



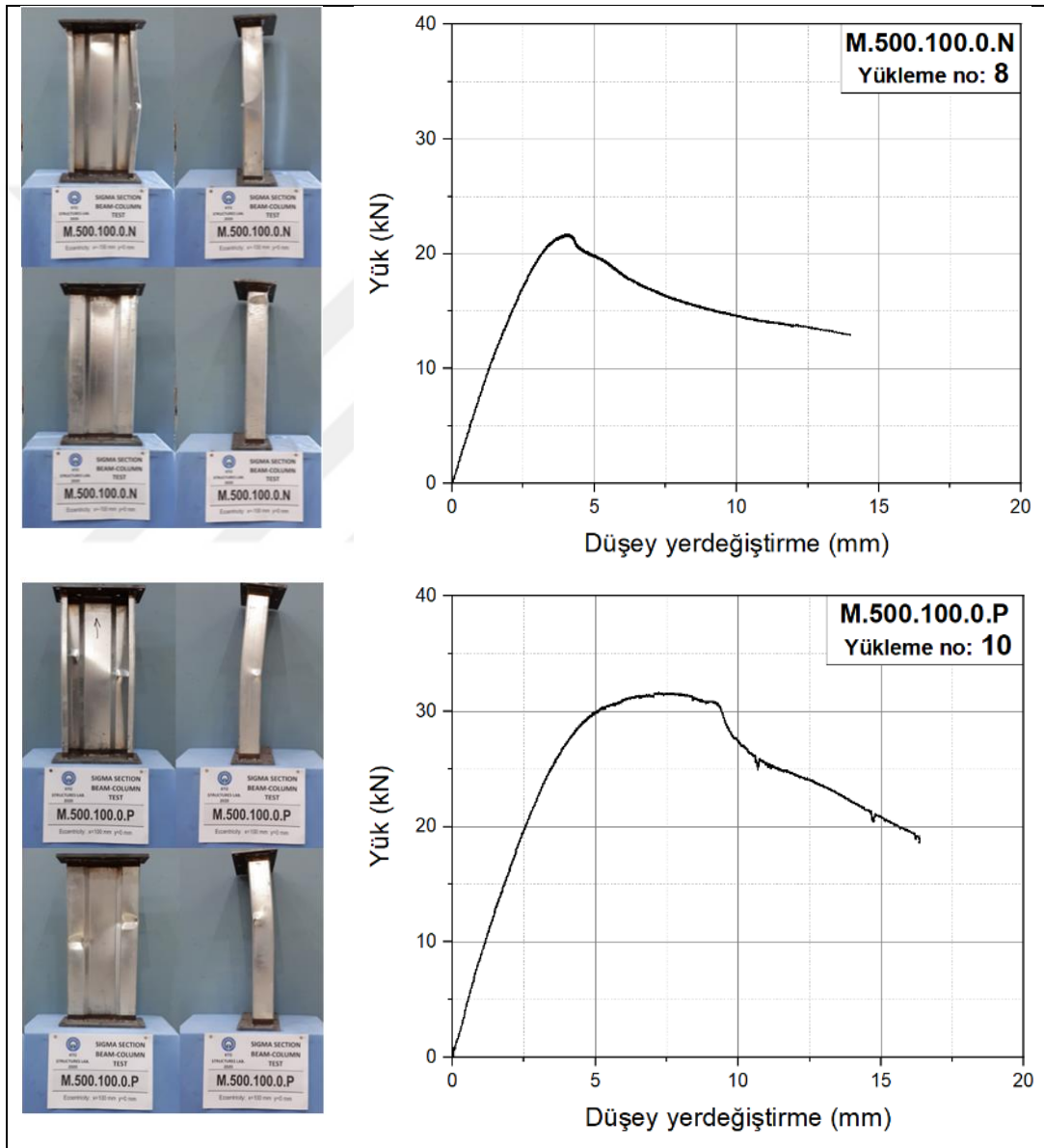
şekil 56. M.500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 57’de verilmektedir. Sigma profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.50.90.N numunesinin flanşında öncelikle yükleme doğrultusunda yerel burkulma tespit edilmiş yüklemenin ileriki adımlarında taban plakasına yakın bir bölgede faklı bir yerel burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme kuvveti altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.50.90.P numunesinin gövde kısmının flanşa yakın bölgesinde yerel burkulma tespit edilmiştir, farklı bir bölgede burkulma meydana gelmeden numune yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır.



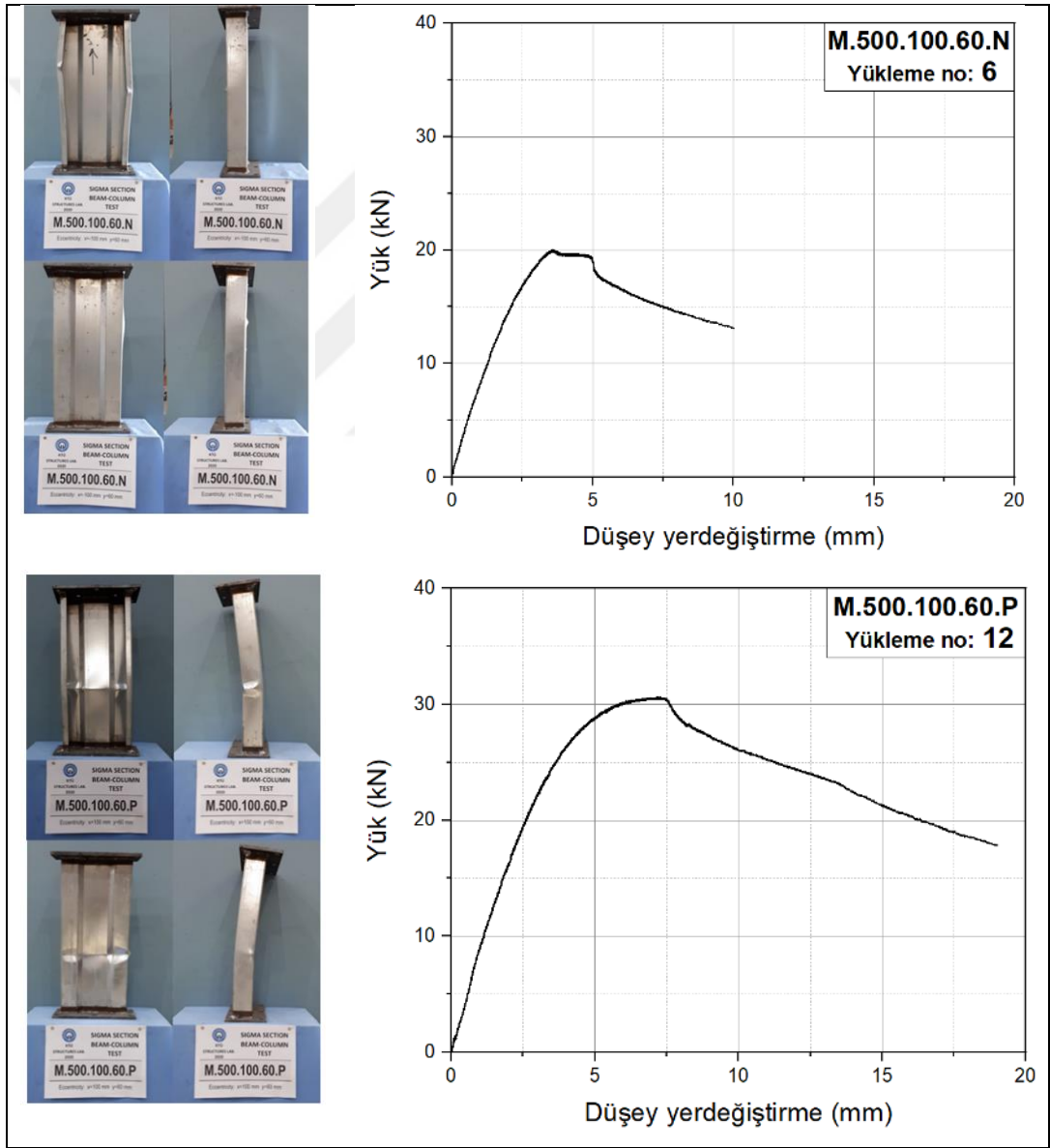
Şekil 57. M.500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 58’de verilmektedir. $e_x=100$ mm eksantriklikle yüklü yalnızca zayıf eksen eğilmesi altındaki (dudaklar basınç kuvveti altında) M.500.100.0.N numunesinin yalnızca bir flanşında yerel burkulma gözlemlenmiştir. Yalnız zayıf eksen eğilmesi ve dudaklar çekme kuvveti altında olan M.500.100.0.P numunesinin gövdesinde oluşan basınç gerilme durumu sonucunda profilin gövdesinde oluşan yerel burkulma şekilde açıkça görülmektedir.



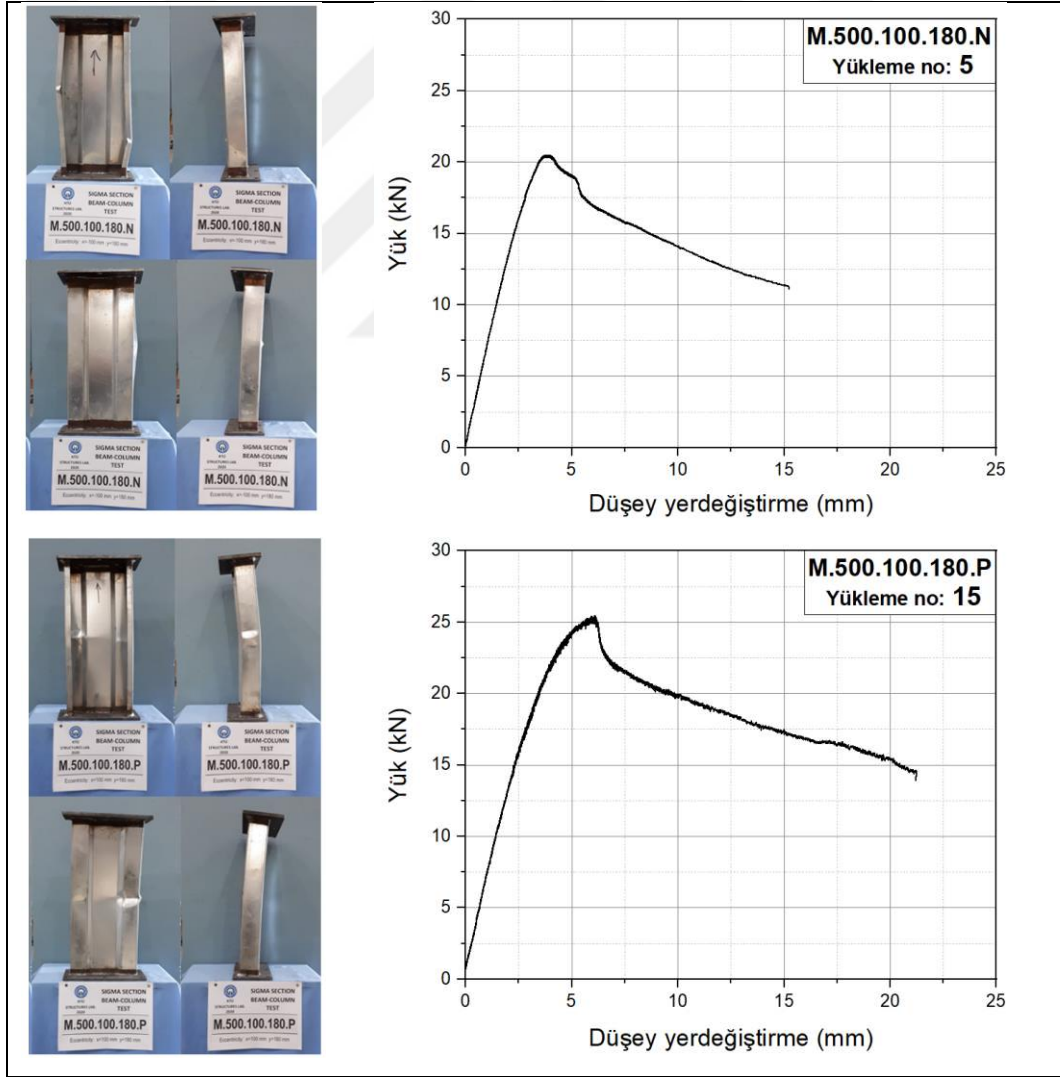
Şekil 58. M.500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 59’da verilmektedir. Profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.60.N numunesinin dudaklarında oluşan basınç gerilme dağılımı altında dudaklarda yükleme doğrultusunda yerel burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme kuvveti altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.60.P numunesinin benzer durumdaki olduğu diğer numunelerdeki gibi, oluşan basınç gerilmesi neticesinde gövdede belirgin olarak yerel burkulma oluşmuştur.



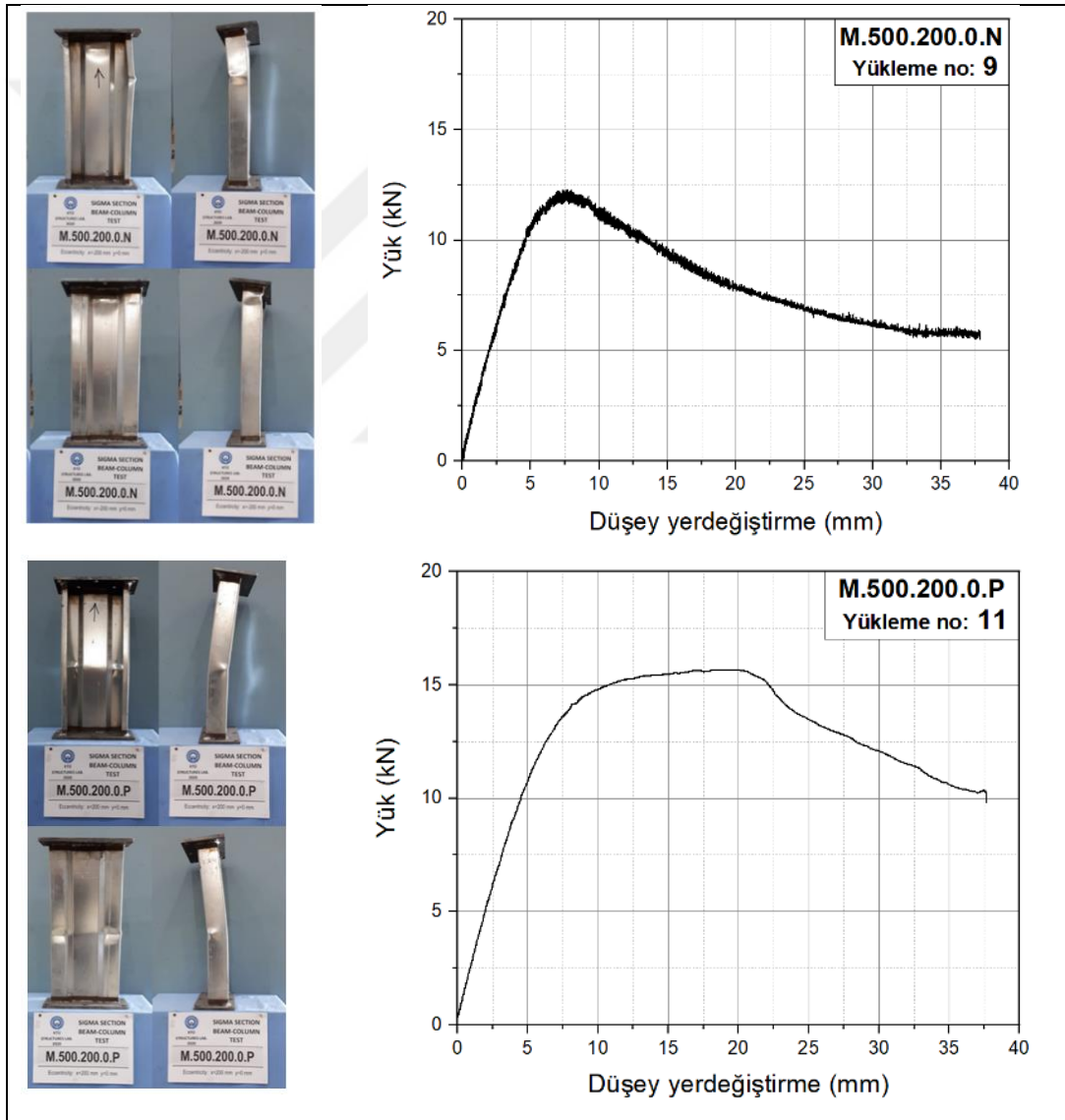
Şekil 59. M.500.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 60'ta verilmektedir. Profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.180.N numunesine oluşan basınç gerilme dağılımı altında dudaklarda yükleme doğrultusunda yerel burkulma meydana gelmiştir. Bileşik eğilme etkilerinin olduğu diğer numunelerde de görülen dudakların farklı bölgelerinde oluşan yerel burkulmalar benzer olarak bu numunede de görülmüştür. Dudakların basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.180.P numunesinde ise, dudakların çekme gerilme dağılıma maruz kaldığı diğer numunelere benzer olarak, gövdede yerel burkulma meydana gelmiştir. Ayrıca, güçlü eksen eğilmesi etkisi yükleme doğrultusundaki flanşta da yerel burkulma meydana getirmiştir.



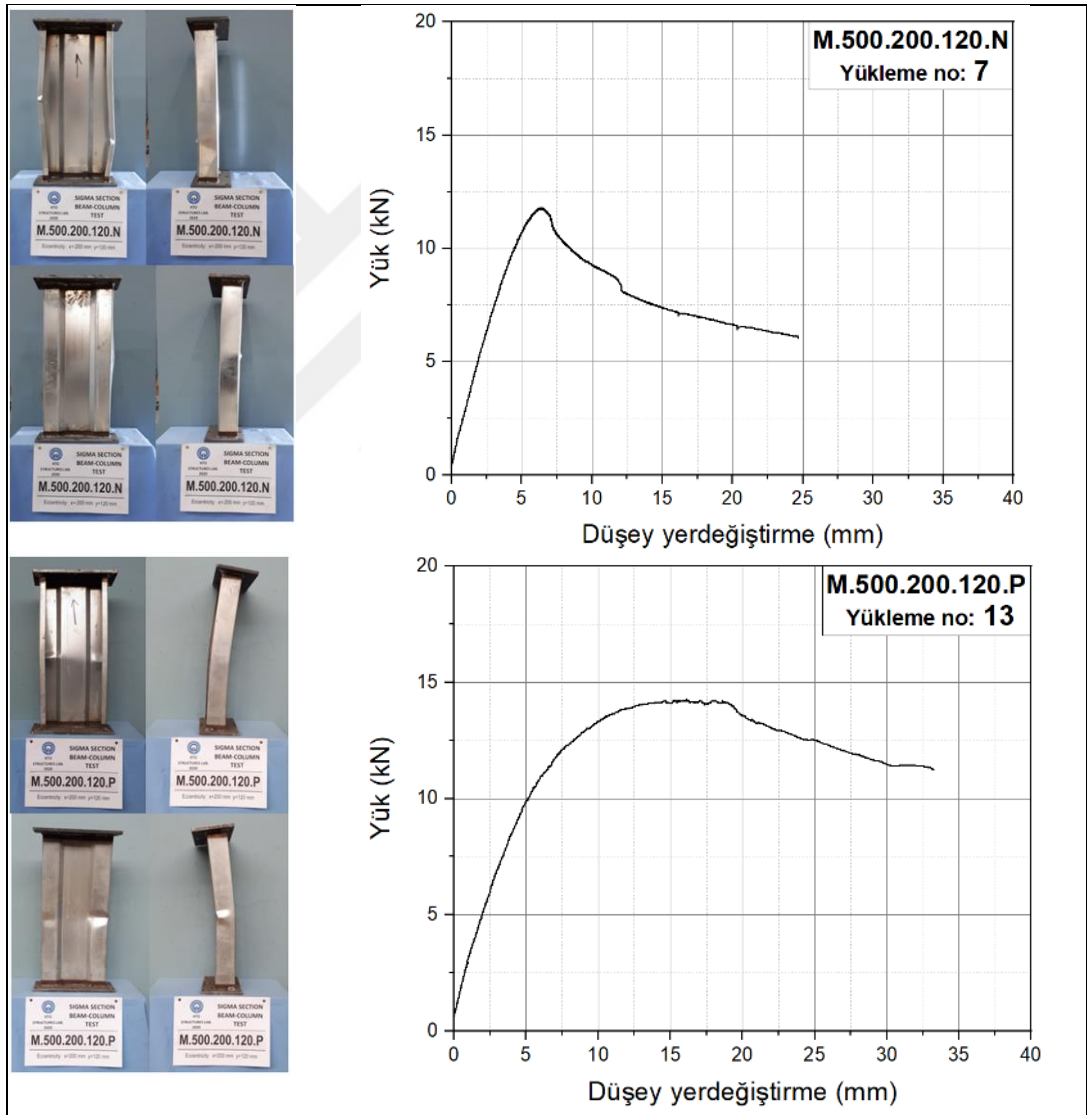
Şekil 60. M.500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.200.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 61’de verilmektedir. Yalnız zayıf eksen eğilmesi etkisinde ve M.500.100.0.N numunesinin iki katı eksantrisite ile yüklenen M.500.200.0.N numunesinde dudaklar oluşan basınç gerilmesi nedeniyle yerel burkulmaya maruz kalmış olup ayrıca taban plakasına yakın bir bölgede de burkulma gözlemlenmiştir. Eksenel yük ve zayıf eksen eğilmesi altındaki M.500.200.0.P numunesinin gövdesinin basınç, dudakların ise çekme gerilmesi altında bulunduğu bu yükleme durumunda şekilde görüldüğü gibi gövdede yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 61. M.500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.500.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 62’de verilmektedir. Dudaklarda basınç gerilmesi meydana getiren ve bileşik eğilme durumu oluşturan en büyük eksantrisitenin uygulandığı M.500.200.120.N numunesinde, diğer bileşik eğilme numunelerinde de gözlemlenen, dudakların her ikisinde ve numune merkezinin iki farklı ucuna doğru oluşan yerel burkulmalar görülmüştür. Oluşan basınç gerilme dağılımı nedeniyle dudaklarda oluşan yerel burkulma şekilde görülmektedir. M.500.200.120.P deney numunesinde ise, gövde basınç, dudaklar çekme gerilmesine maruz kaldığından, bu yükleme durumunda yerel burkulma yalnızca gövdede meydana gelmiştir.



Şekil 62. M.500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

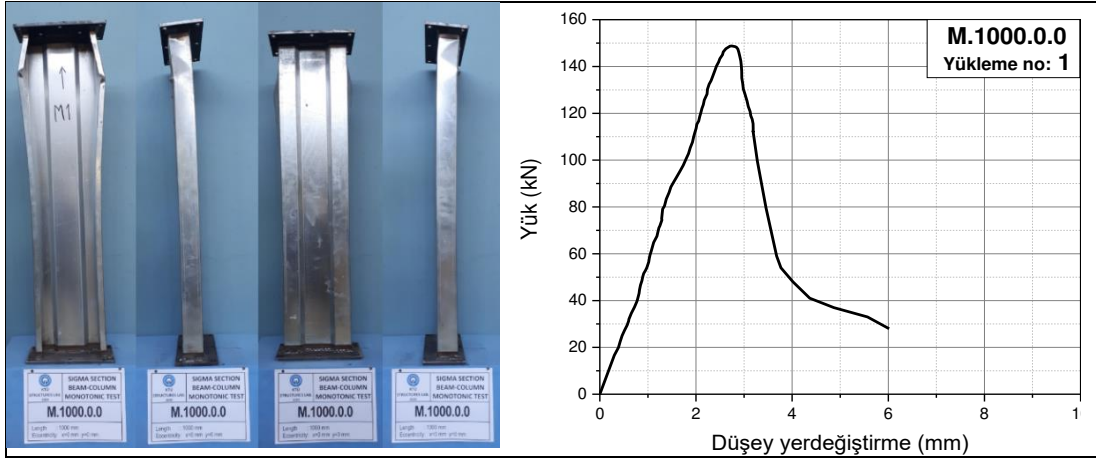
3.1.2. L=1000 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları

Profillerdeki çarpılmalı burkulmaların gözlemlenebilmesi için seçilen 1000 mm boyundaki hafif çelik sigma profiller üzerinde gerçekleştirilen toplam 15 adet monotonik yükleme deneyine tabi tutulan numunelerin deney sonrası görüntüsü aşağıdaki Şekil 63'te verilmektedir. M.1000.0.0 numunesinin yalnız aksenal yükleme altındaki davranışının gözlemlendiği deney sonucuna ait burkulma şekli, monotonik ve tersinir tekrarlı yüklemelere ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 64'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, yüklemenin yapıldığı üst bölgedeki profil dudaklarında yerel burkulma ve flanşlarında ise çarpılma burkulması gözlemlenmiştir.

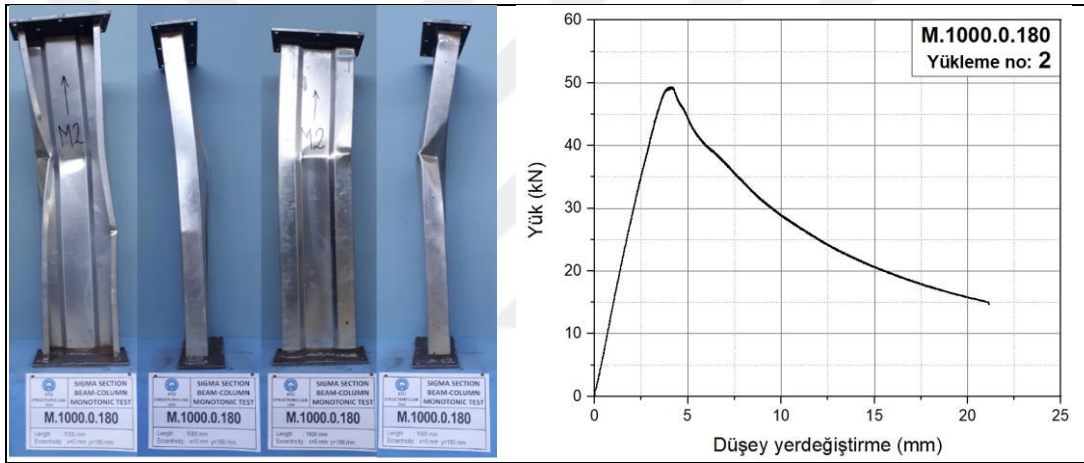


Şekil 63. L=1000 mm'lik numunelerin deney sonrası görünümü

Kuvvetli eksen doğrultusunda 180 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1000.0.180 numunesinin deney sonundaki hali, monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisiyle birlikte Şekil 65'te verilmektedir. Bu numunenin orta bölgesinde flanşların içe döndüğü çarpılma burkulma meydana gelmiştir. Şekil 66'da kuvvetli eksen doğrultusunda 360 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1000.0.360 numunesinin deney sonundaki hali, monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisiyle birlikte verilmektedir. Bu numunenin taban bölgesindeki flanşında yerel burkulma meydana gelmiştir.



Şekil 64. M.1000.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

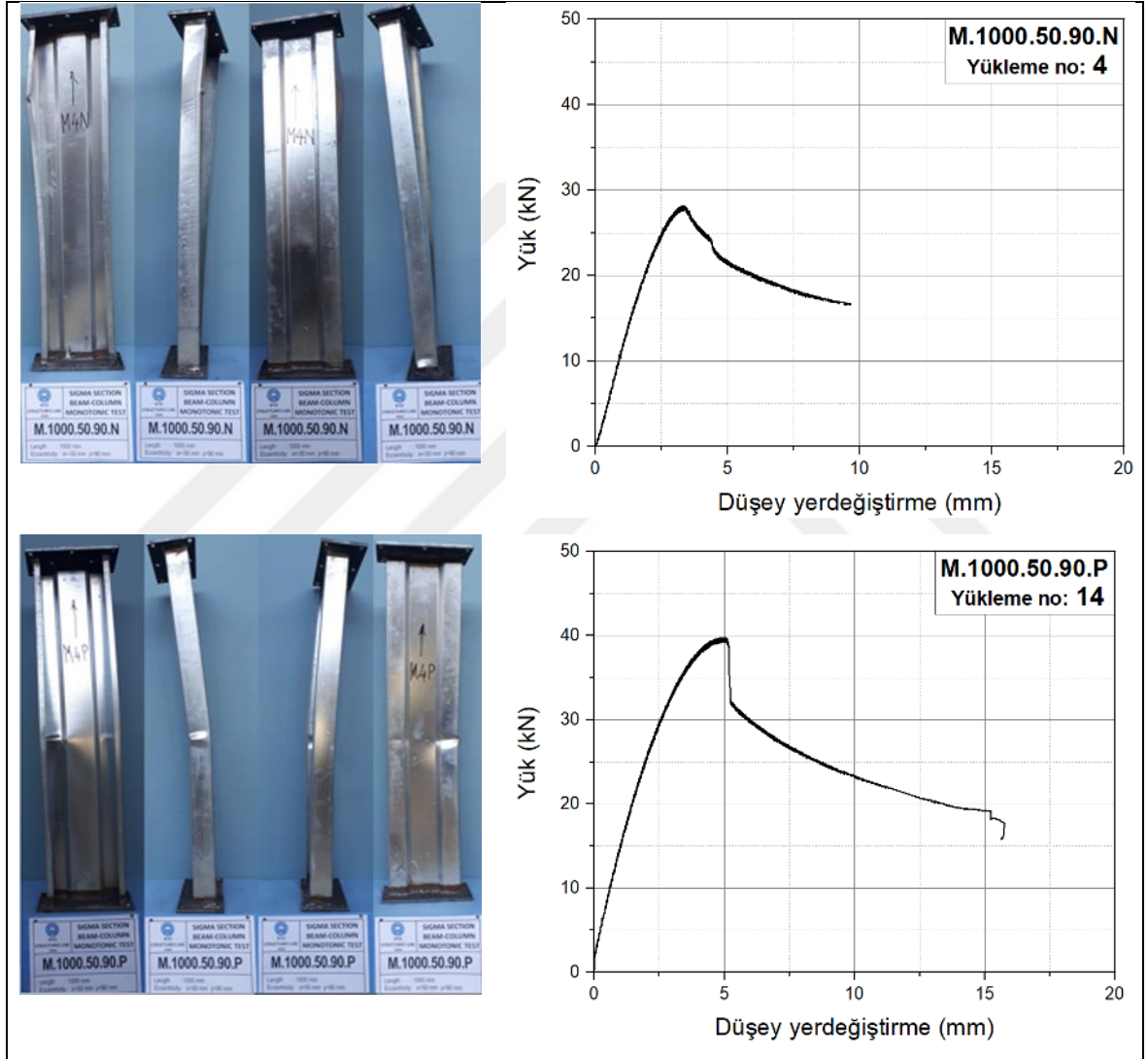


Şekil 65. M.1000.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



Şekil 66. M.1000.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

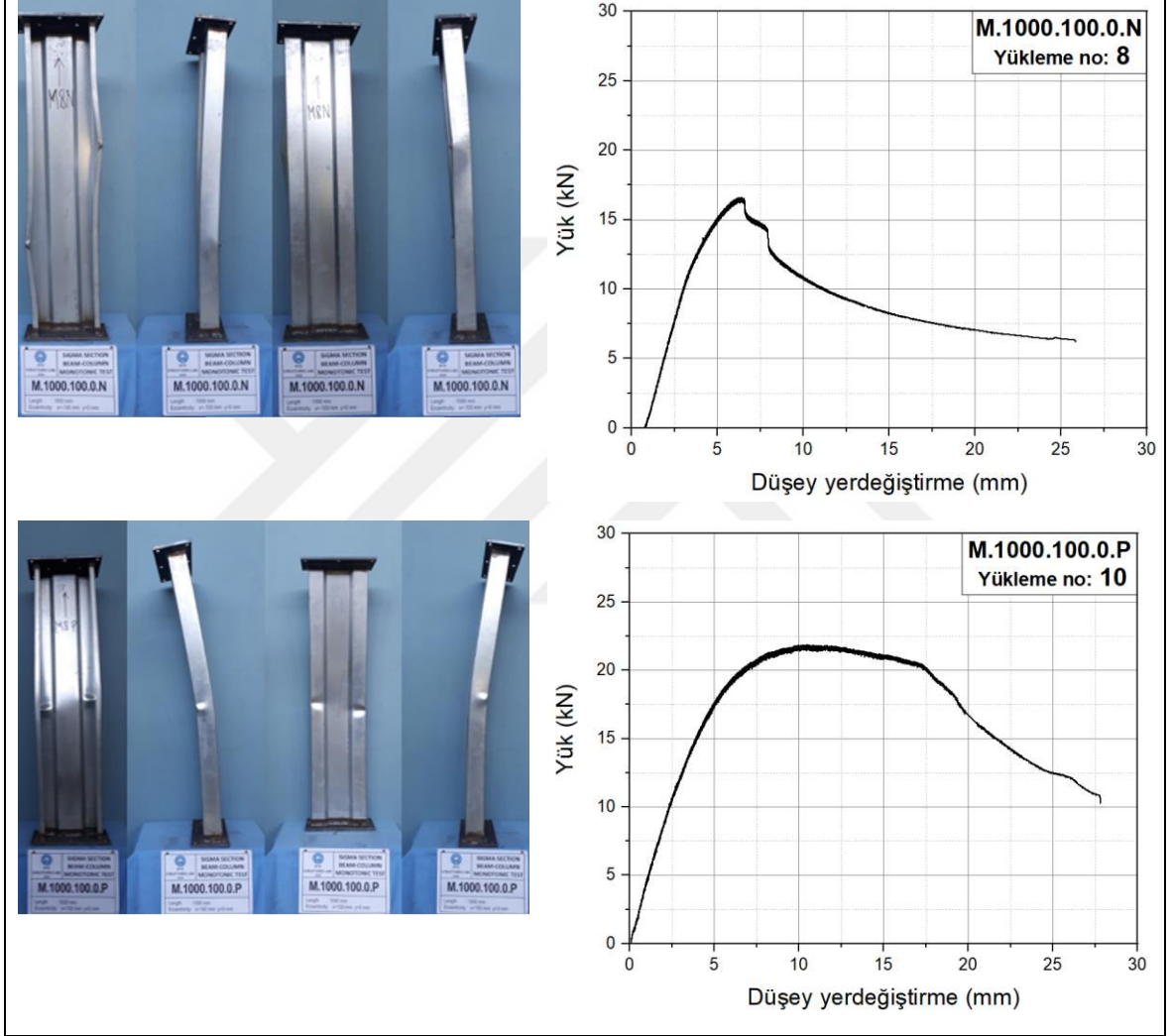
M.1000.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 67’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.50.90.N numunesinde, yüklemenin yapıldığı uca yakın bölgedeki flanşın dışa dönmesi şeklinde ortaya çıkan çarpımalı burkulma görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.50.90.P numunesinde ise numunenin orta bölgesinde oluşan gövdenin yerel burkulması görülmektedir.



Şekil 67. M.1000.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1000.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 68’de verilmektedir. Yalnızca zayıf eksen eğilmesinin incelendiği ve profilin

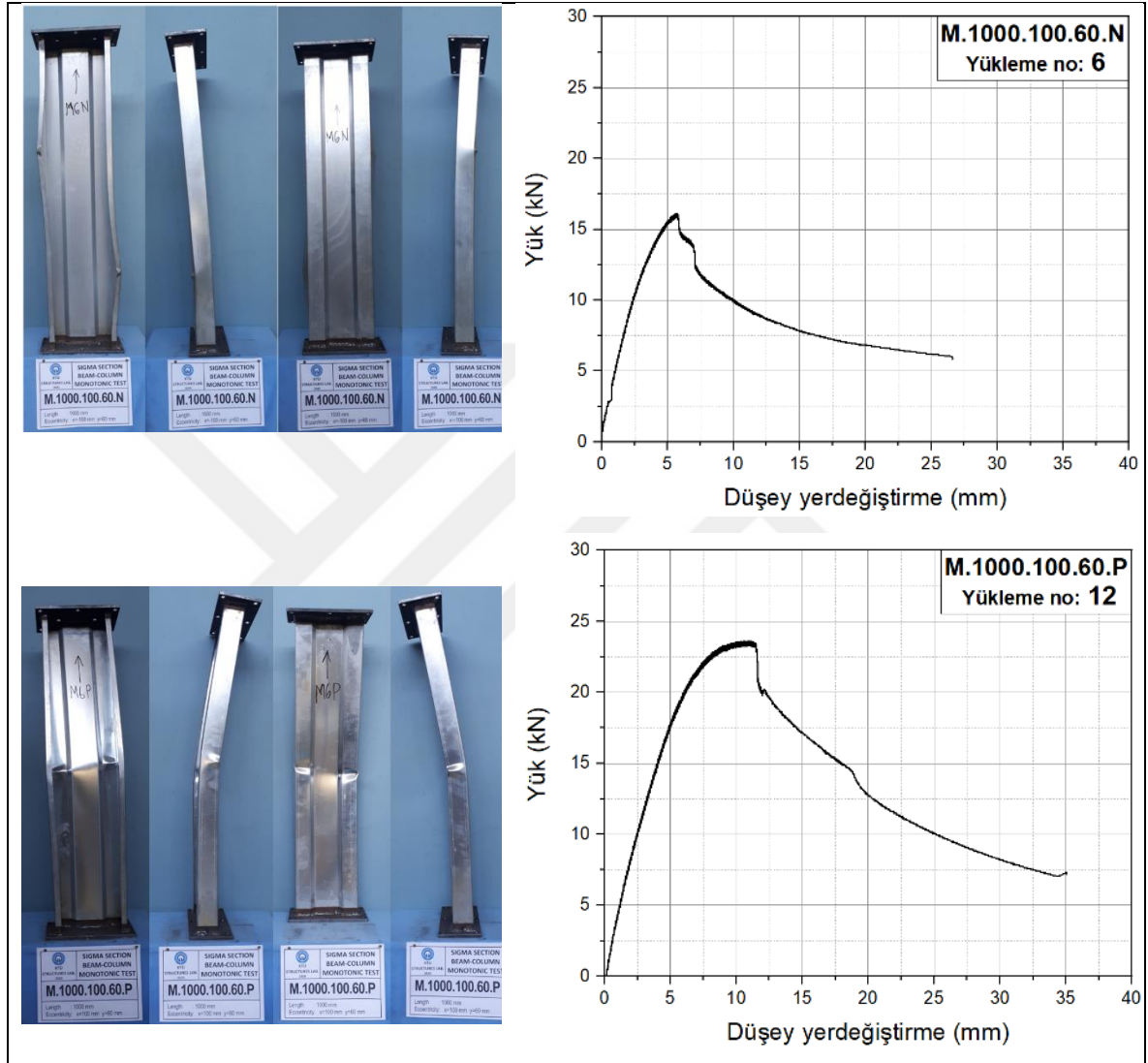
dudaklarında basınç gerilmesinin olduğu M.1000.100.0.N numunesinin flanşlarında yerel burkulma ve ardından flanşların dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Yalnızca zayıf eksen eğilmesinin incelendiği ve profilin dudaklarında çekme gerilmesinin olduğu M.1000.100.0.P numunesinde ise profilin orta bölgesinde oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 68. M.1000.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1000.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 69'da verilmektedir Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.100.60.N numunesinin flanşlarında yerel burkulma ve ardından flanşların

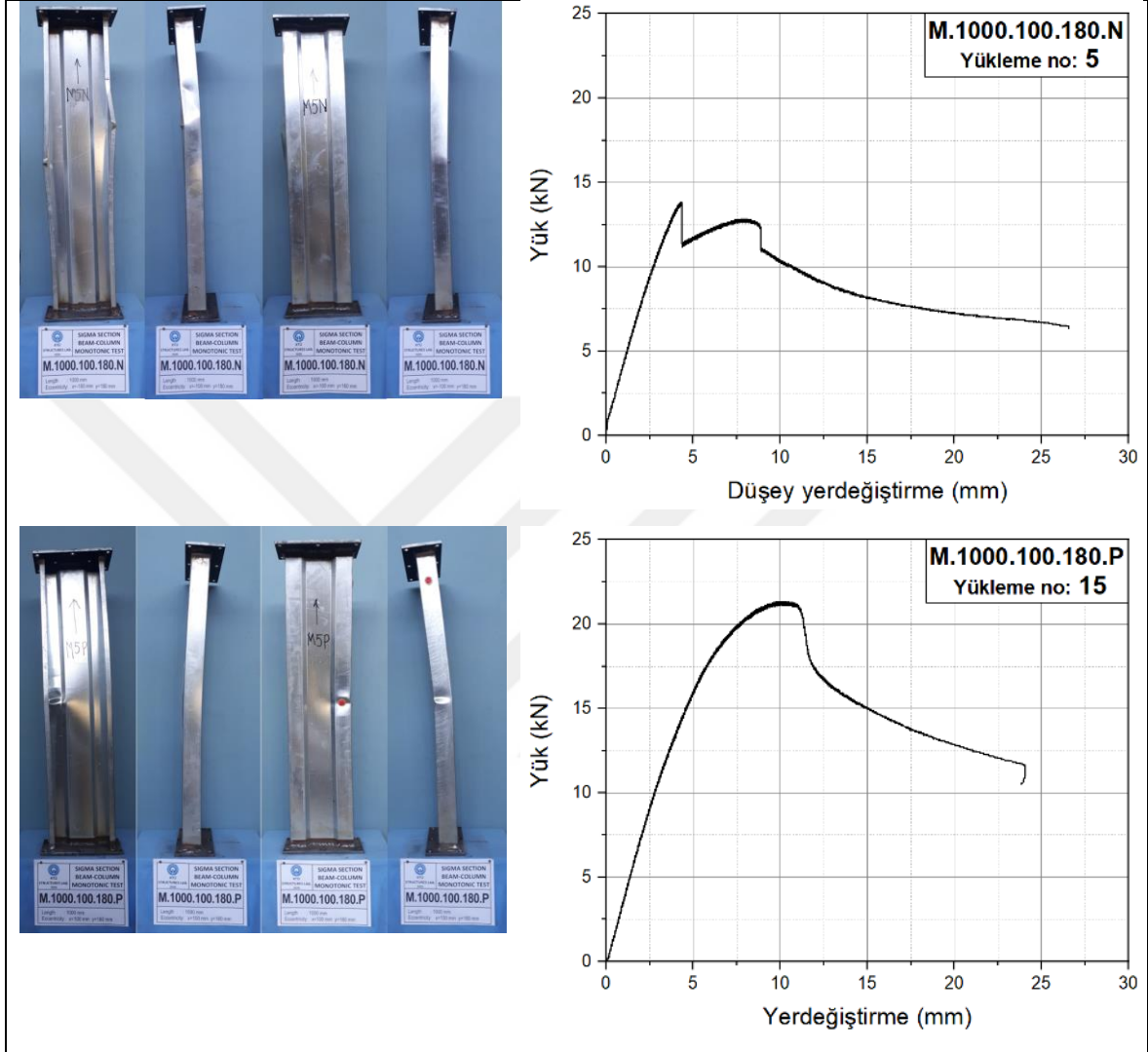
dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.100.60.P numunesinde ise profilin orta bölgesinde oluşan gövdenin yerel burkulması görülmektedir.



Şekil 69. M.1000.100.60 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

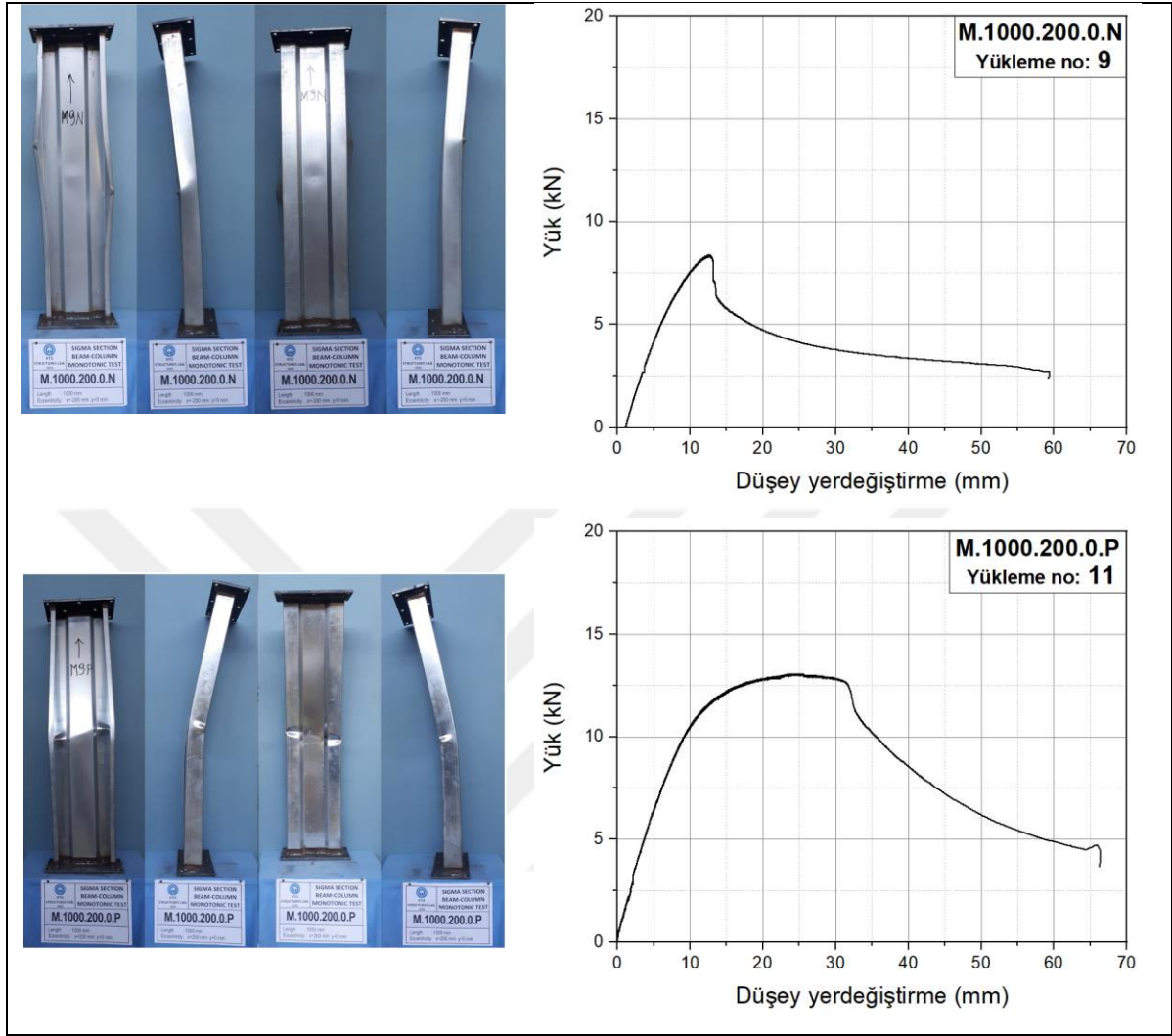
M.1000.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 70’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.100.180.N numunesinin flanşlarında yerel burkulma ve ardından flanşların dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.100.180.P numunesinin orta

bölgesinde, kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede oluşan yerel burkulma görülmektedir.



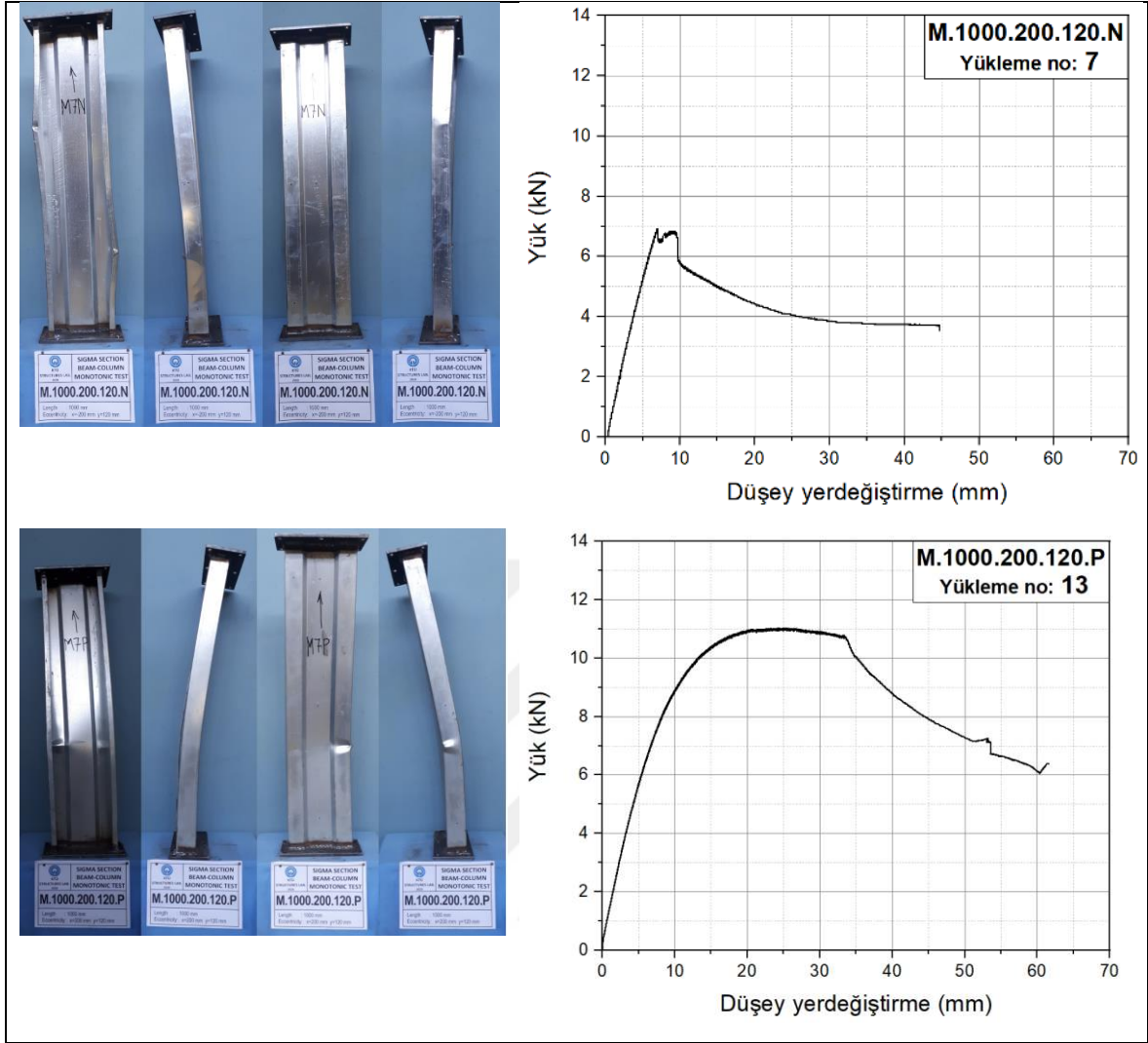
Şekil 70. M.1000.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1000.200.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 71’de verilmektedir. Yalnızca zayıf eksen eğilmesi etkisinde ancak M.1000.100.0.N numunesin iki katı eksantrisite altında yüklenen M.1000.200.0.N numunesinin dudaklarında, eksantrik yükleme nedeniyle oluşan basınç gerilmesi altında yerel burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme gerilmesine maruz kaldığı M.1000.200.0.P numunesinin gövdesinde basınç gerilme dağılımı nedeniyle yerel burkulma olduğu şekilde görülmektedir.



Şekil 71. M.1000.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1000.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 72’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.200.120.N numunesinin flanşlarında yerel burkulma ve ardından flanşların dışarı doğru dönmesiyle çarpılmalı burkulma olduğu görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.200.120.P numunesinin orta bölgesinde, kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 72. M.1000.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

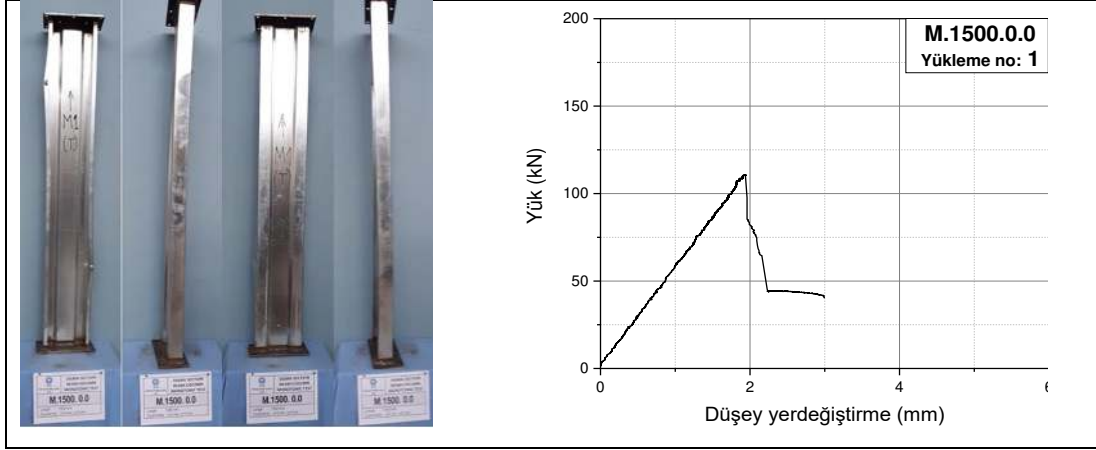
3.1.3. L=1500 mm'lik Numunelerin Monotonik Deney Sonuçları

Genel burkulmanın gözlemlenebilmesi için seçilen 1500 mm boyundaki hafif çelik sigma profiller üzerinde gerçekleştirilen toplam 15 adet monotonik yükleme deneyi sonrasında elde edilen şekildeğiştirme görüntüleri aşağıdaki Şekil 73'te verilmektedir.

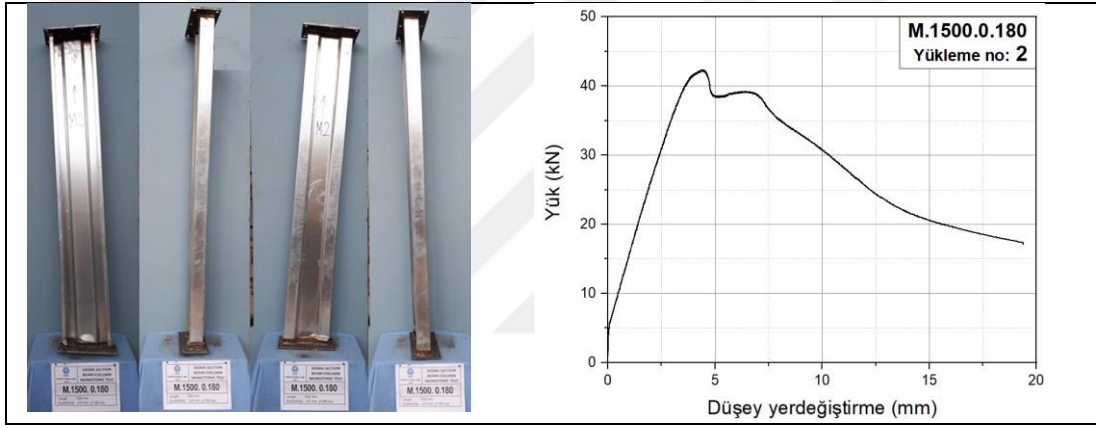


Şekil 73. L=1500 mm'lik numunelerin deney sonrası görünümü

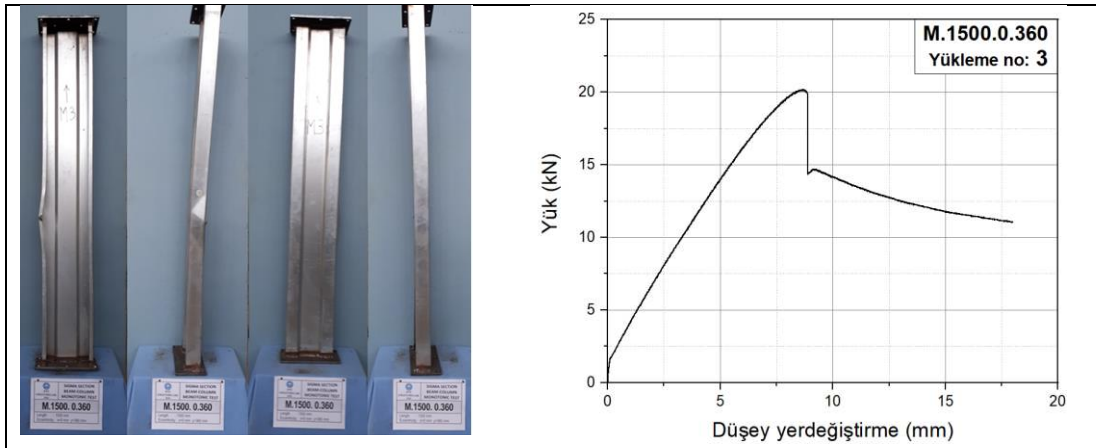
M.1500.0.0 numunesi ile profilin aksenal yükleme altındaki davranışının gözlemlendiği deney sonucuna ait burkulma şekli ve monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 74'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, profilin dudaklarında numune boyunun yaklaşık 1/3' üne denk gelen bölgede yerel burkulma olduğu ve bu noktadan sonra yük taşıma kapasitesinin hızlı bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Kuvvetli eksen doğrultusunda 180 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1500.0.180 numunesinin deney sonundaki burkulma şekli ve monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 75'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi alt mesnet noktasına yakın bölgedeki flanşa yerel burkulma oluşmuştur. Kuvvetli eksen doğrultusunda 360 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1500.0.360 numunesinin deney sonundaki burkulma şekli ve monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 76'da verilmektedir. Şekildeğiştirme, numunenin orta bölgesinde flanşın yerel burkulması şeklinde meydana gelmiştir.



Şekil 74. M.1500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

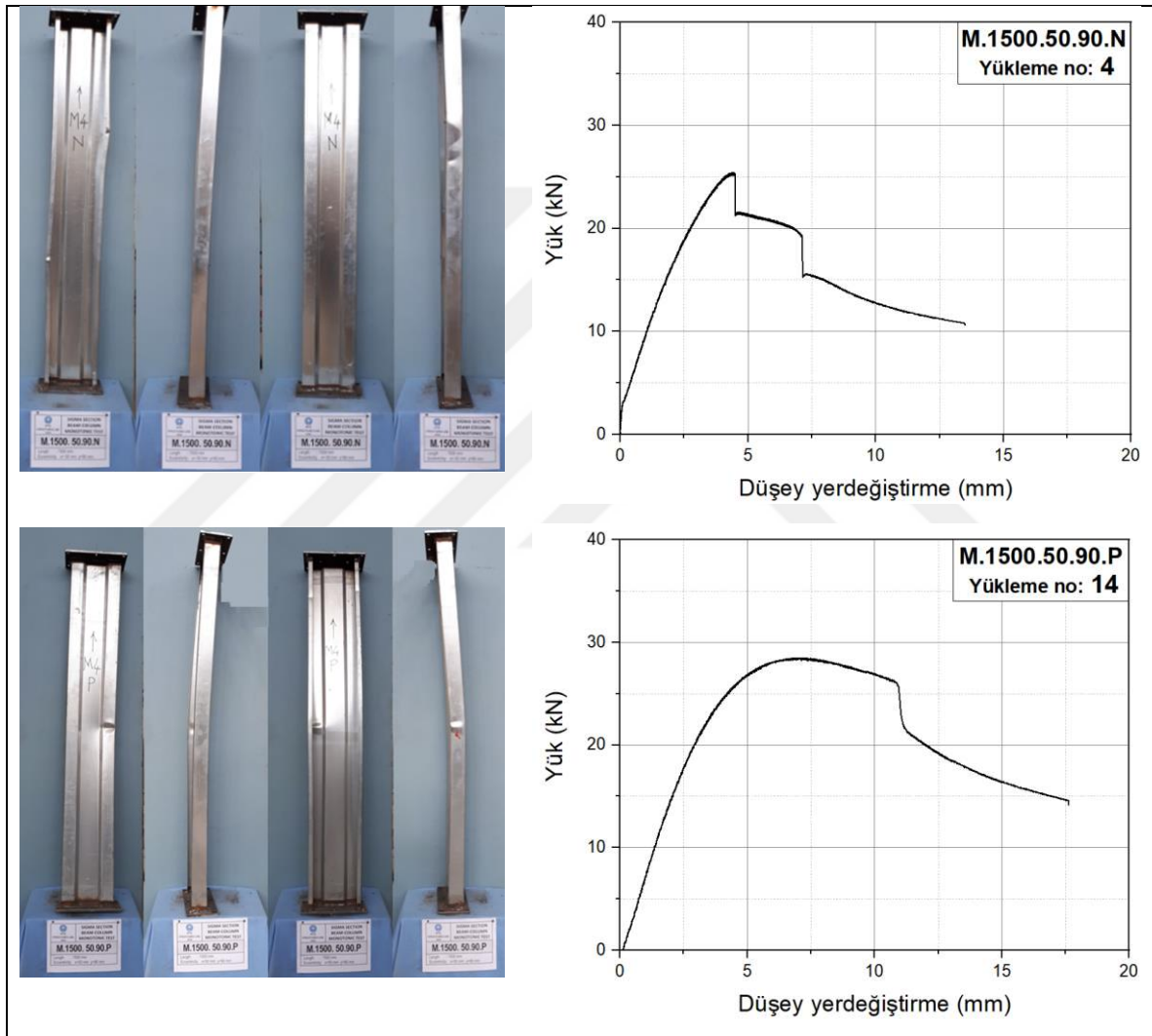


Şekil 75. M.1500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



Şekil 76. M.1500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

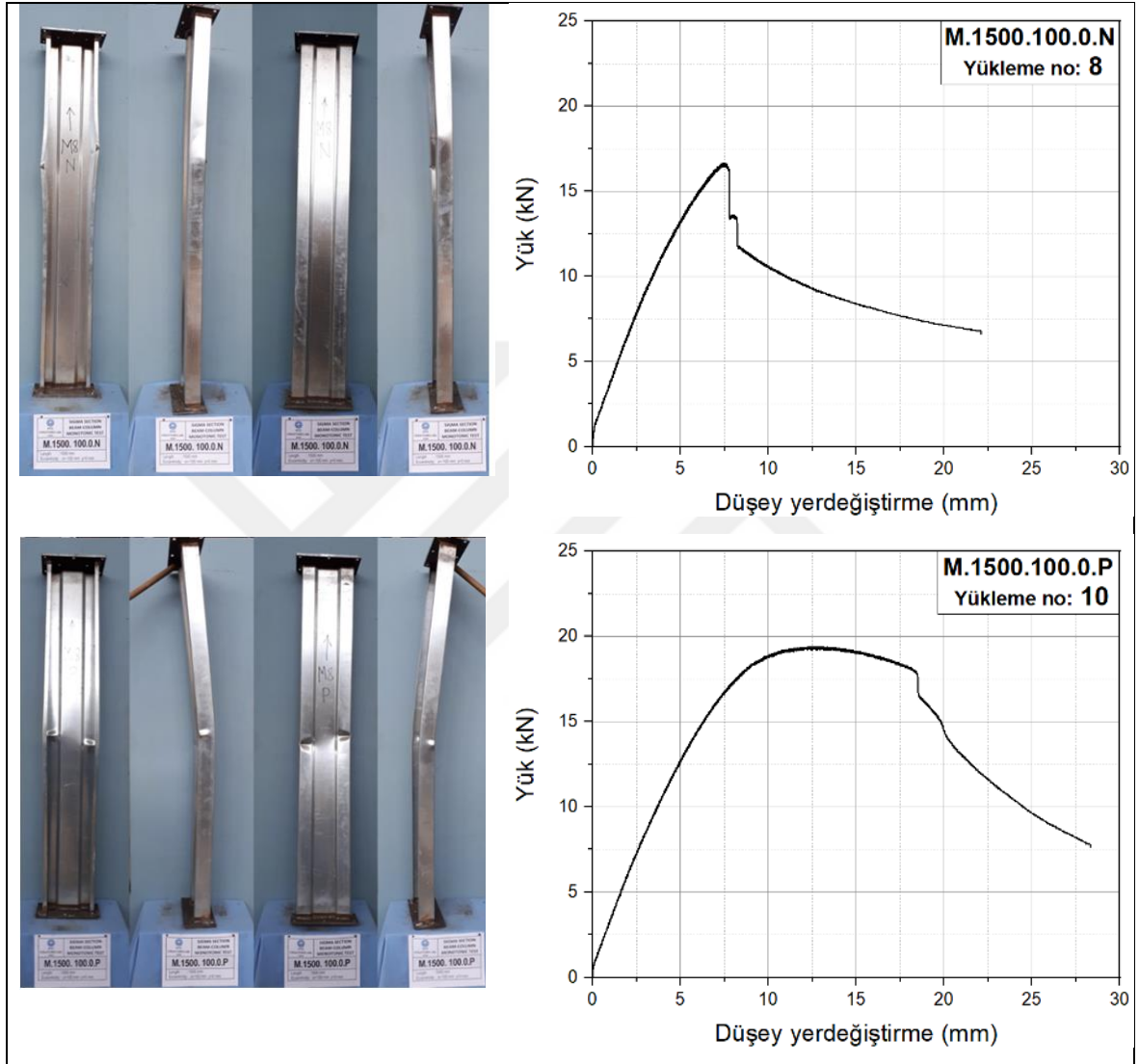
M.1500.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 77’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.50.90.N numunesinin her iki mesnete yakın bölgesinde flanşların dışa dönmesi şeklinde ortaya çıkan burkulma görölmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.50.90.P genel burkulma numunesinin orta bölgesinde ise genel burkulma meydana geldiği görölmektedir.



şekil 77. M.1500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Yalnızca zayıf eksen eğilmesinin incelendiği M.1500.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 78’de verilmektedir. Profilin dudaklarında basınç gerilmesinin oluştuğu M.1500.100.0.N numunesinin üst mesnetine

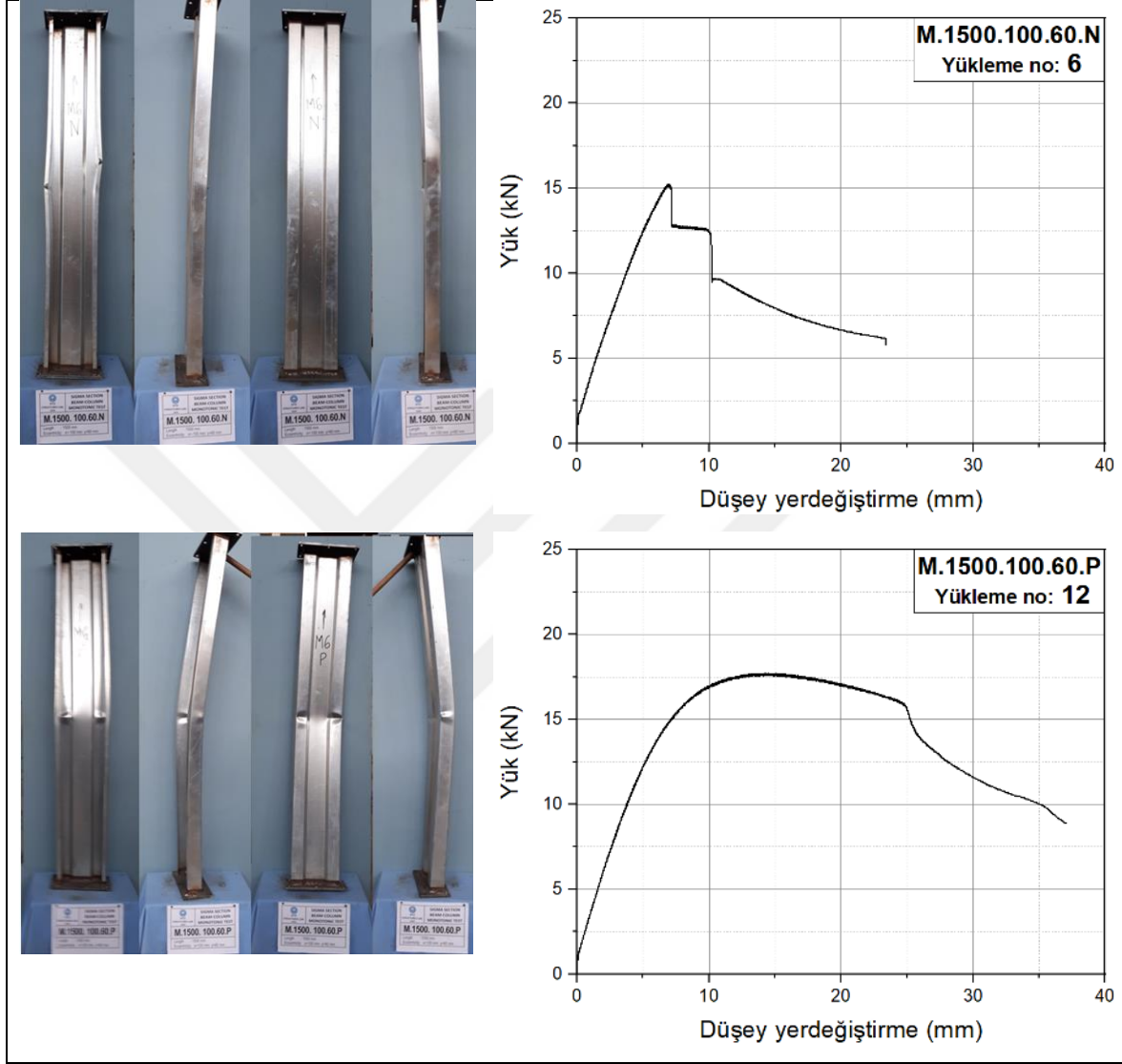
yakın bölgede flanşların dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Profilin dudaklarında çekme gerilmesinin olduğu M.1500.100.0.P numunesinin orta bölgesinde oluşan genel burkulma görülmektedir.



Şekil 78. M.1500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1500.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 79’da verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.100.60.N numunesinin ortasına yakın bölgede profilin flanşların dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme

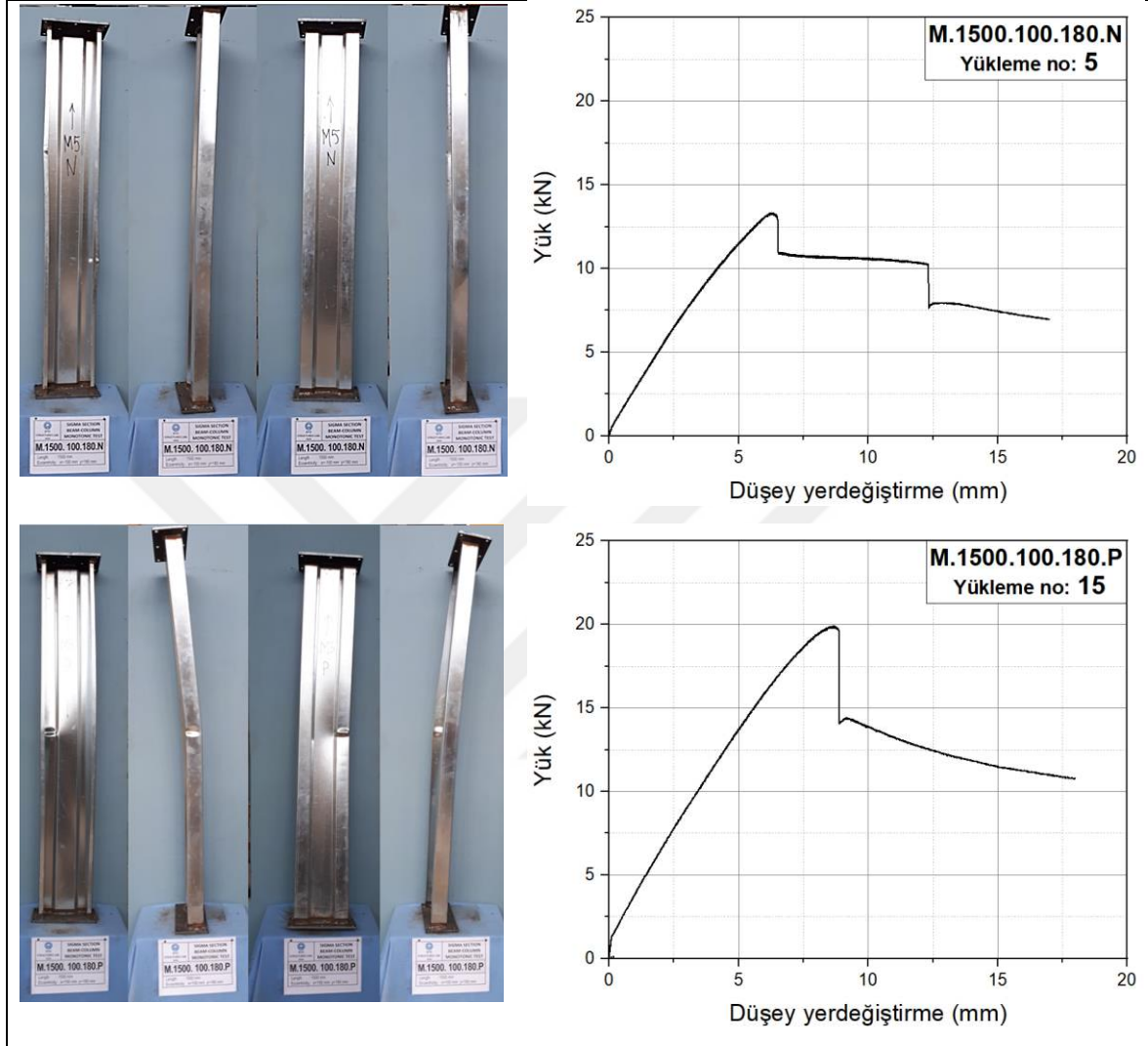
gerilmesi altında olduğu M.1500.100.60.P numunesinin orta bölgesinde oluşan genel burkulma ve ardından gövdede oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 79. M.1500.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1500.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 80’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.100.180.N numunesinin flanşlarında numune boyunun üçte biri mesafede oluşan yerel burkulma görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.100.180.P genel burkulma numunesinin orta bölgesinde kuvvetli eksen

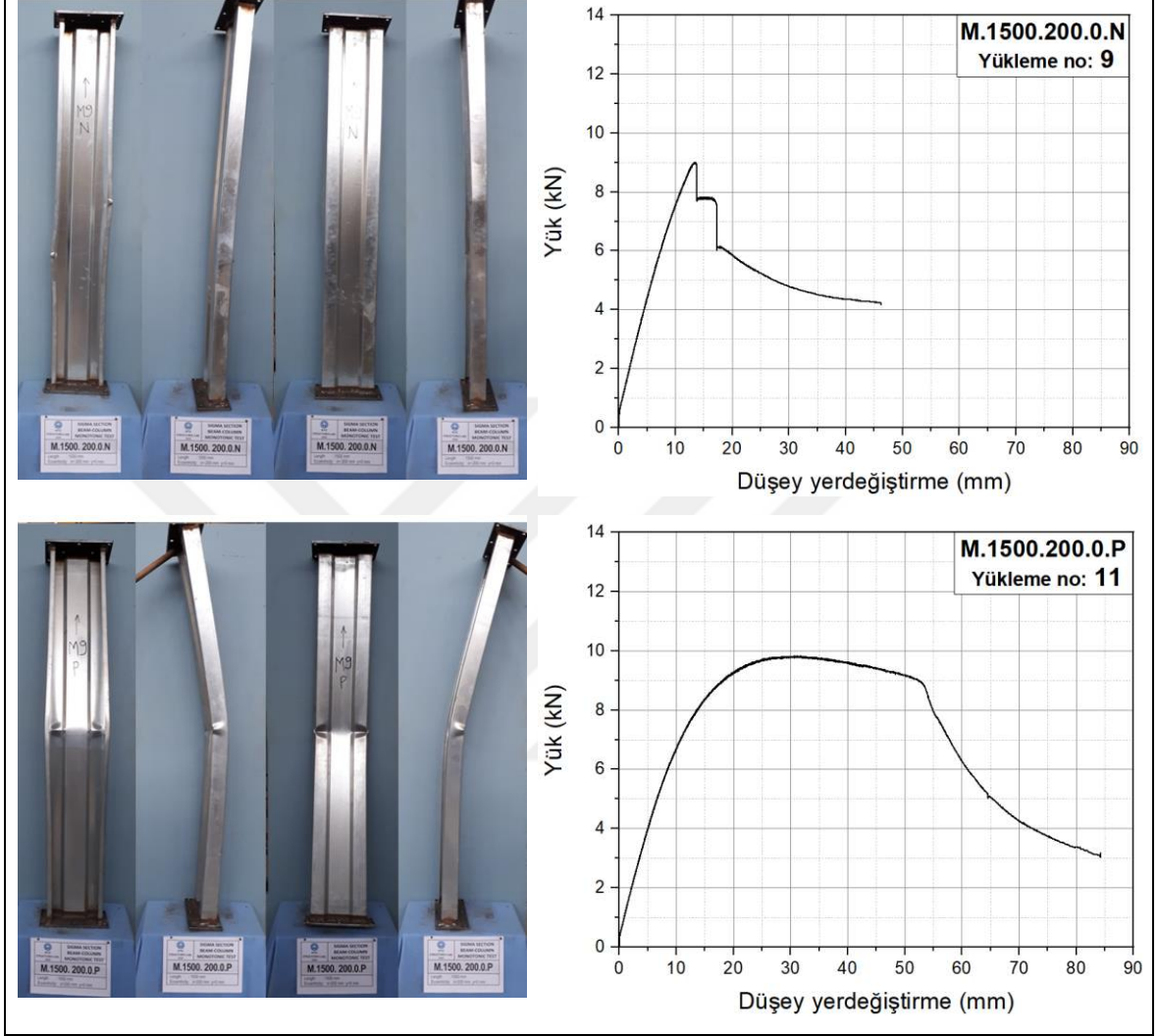
yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede oluşan yerel ve genel burkulma görülmektedir.



Şekil 80. M.1500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

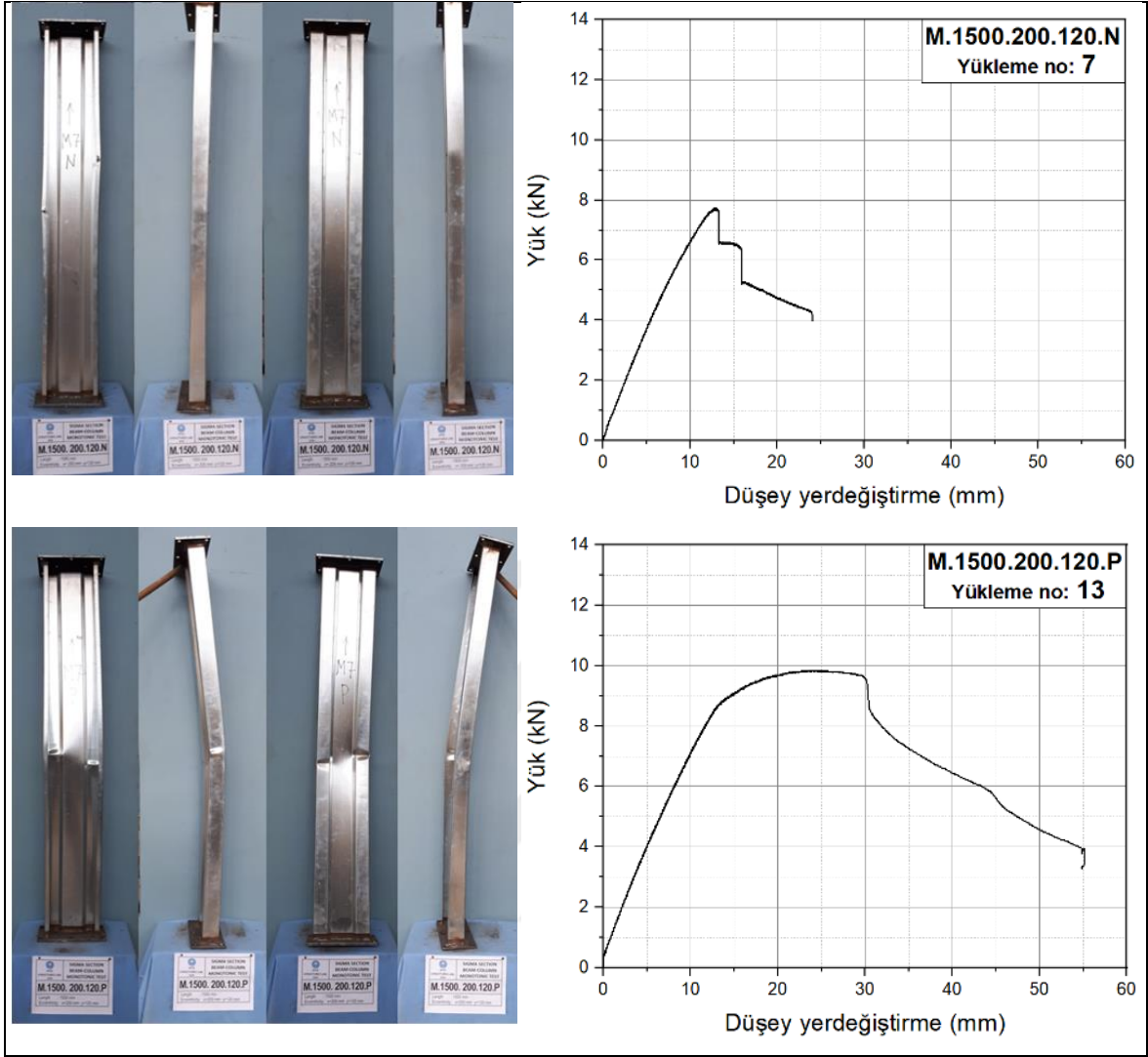
Yalnızca zayıf eksen eğilmesi etkisinde M.1500.200.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 81’de verilmektedir. M.1500.100.0.N numunesin iki katı kadar bir eksantrisite altında yüklenen M.1500.200.0.N numunesinin dudaklarında alt mesnete daha yakın bir bölgede, eksantrik yükleme nedeniyle oluşan basınç gerilmesi altında yerel burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme gerilmesine maruz kaldığı aksenal yük ve zayıf eksen eğilmesi altındaki burkulma davranışı gözlemlenen

M-1500-200-0-P genel burkulma numunesinin gövdesinde oluşan basınç gerilmesi nedeniyle genel burkulma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 81. M.1500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

M.1500.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 82’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.200.120.N numunesinin dudaklarında üst mesnete daha yakın bir bölgede oluşan yerel burkulma görülmektedir. Sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.200.120.P genel burkulma numunesinin orta bölgesinde, kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede genel burkulma görülmektedir..



Şekil 82. M.1500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

3.2. Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları

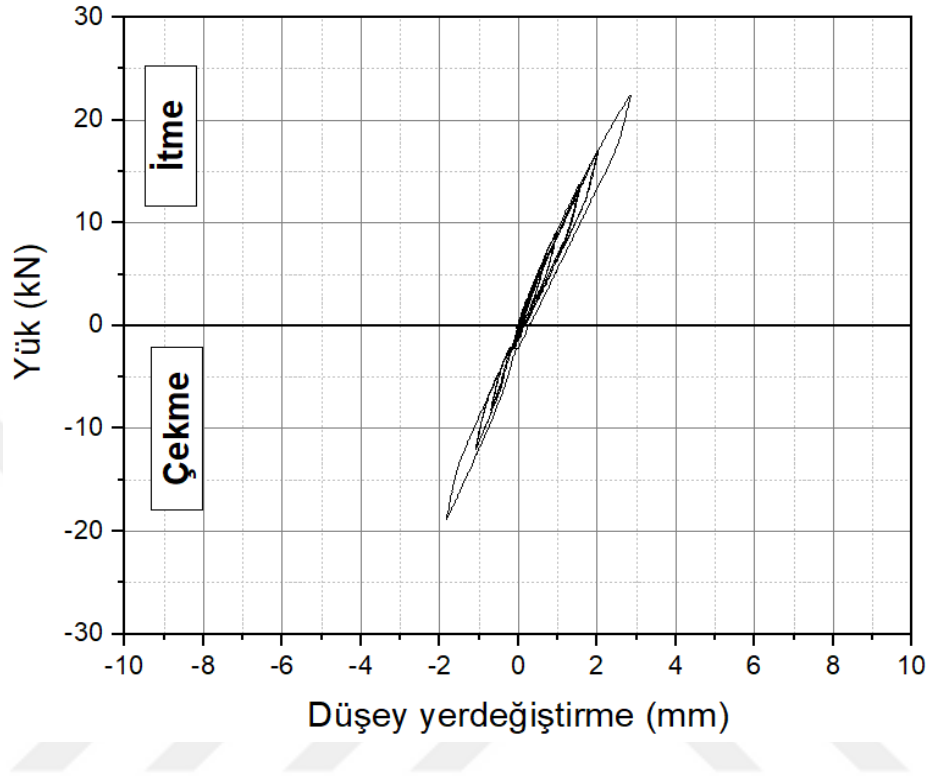
Sigma profil numunelerin yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarını deneysel olarak ayrı ayrı gösterecek şekilde seçilmiş olan sigma numunelerin aksel ve eksantrik yük altındaki enerji sönümleme, rijitlik kaybı ve süneklik davranışlarını incelemek için 45 adet tersinir-tekrarlı deney yapılmıştır. Tersinir-tekrarlı profil yükleme deneylerine ait bazı görünüm Şekil 83'te verilmektedir.



Şekil 83. Tersinir-tekrarlı yükleme deneylerinden görünümeler

Tersinir-tekrarlı yükleme deneyleri, daha önce de belirtildiği gibi, yarı statik ve yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, tersinir-tekrarlı yükleme için FEMA-461 (2007)'de tanımlanan iki tekrarlı, her iki adım sonrasında yerdeğiştirme değerinin %40 artırıldığı yükleme protokolü (bkz. Şekil 43) esas alınmıştır. Şekil 84'te görüldüğü gibi ilk 6 çevrimde her boydaki numunelerin basınç ve çekme yönündeki davranışını lineer olmuştur. Tersinir tekrarlı yükleme altındaki 500 mm, 1000 mm ve 1500

mm boyundaki numunelere ait tersinir-tekrarlı deney sonuçları aşağıda ayrı başlıklar altında verilmiştir.



Şekil 84. Tersinir-tekrarlı yükleme altındaki numunenin ilk 6 çevrimdeki yük- yerdeğiştirme eğrisi

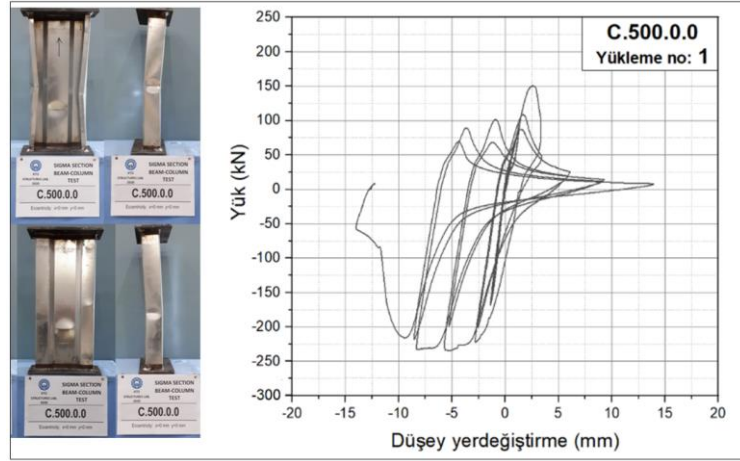
3.2.1. L=500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları

Yerel burkulmanın gözlemleneceği L=500 mm boyundaki 15 adet sigma profil üzerinde gerçekleştirilen tersinir-tekrarlı deneyler sonrasında numunelerin toplu görünümü Şekil 85'te verilmektedir. Deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinde burkulmalar nedeniyle basınç ve çekme bölgelerinde asimetrik davranış gözlenmiştir. Basınç altında oluşan elastik olmayan şekil değiştirmeler nedeniyle rijitlik ve dayanımda azalmalar meydana gelmiştir.

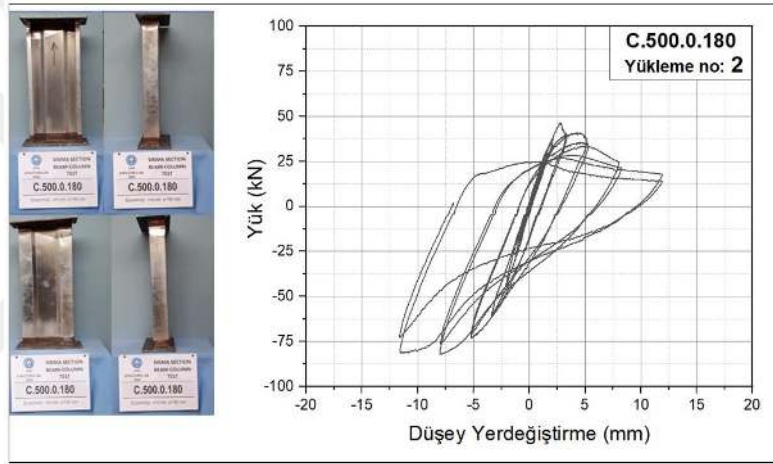


Şekil 85. L=500 mm'lik numunelerin tersinir-tekrarlı deneyler sonrası görünüşleri

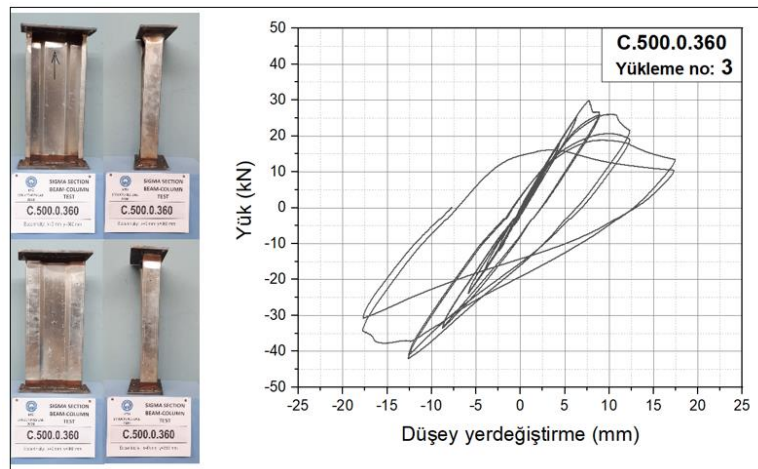
C.500.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı Şekil 86'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlı bir şekilde azalmıştır. Süneklik ve rijitlik de çekme bölgesine göre oldukça fazla azalmıştır. Şekil 87'de verilen C.500.0.180 numunesinin burkulma hali ve yük-yerdeğiştirme eğrisinden görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşın yükleme bölgesine yakın bölgesinde meydana gelmiştir. C.500.0.360 numunesinde de Şekil 88'de görüldüğü gibi basınç bölgesinin rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma C.500.0.180 numunesine benzer şekilde flanşın yükleme bölgesine yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



Şekil 86. C.500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

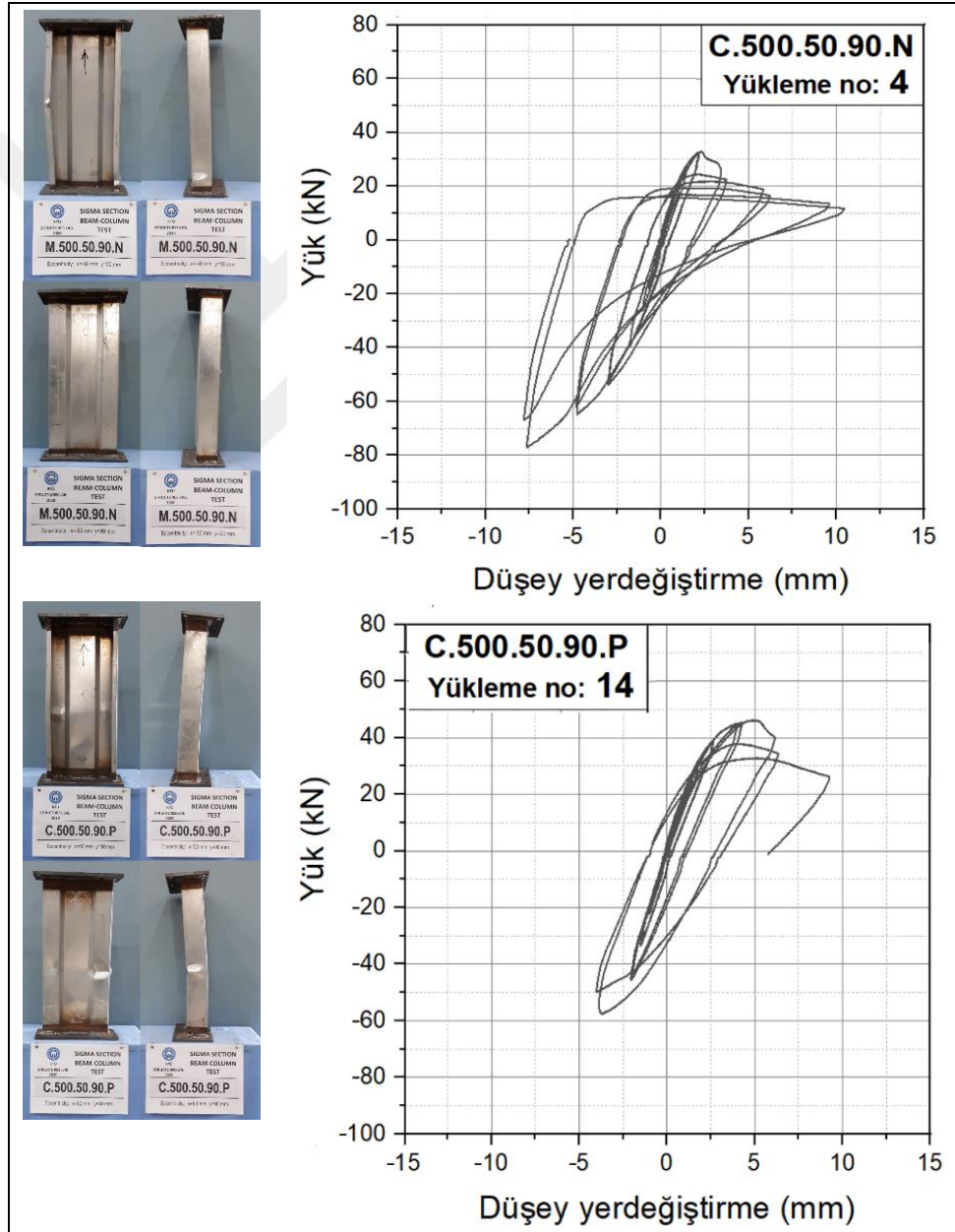


Şekil 87. C.500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



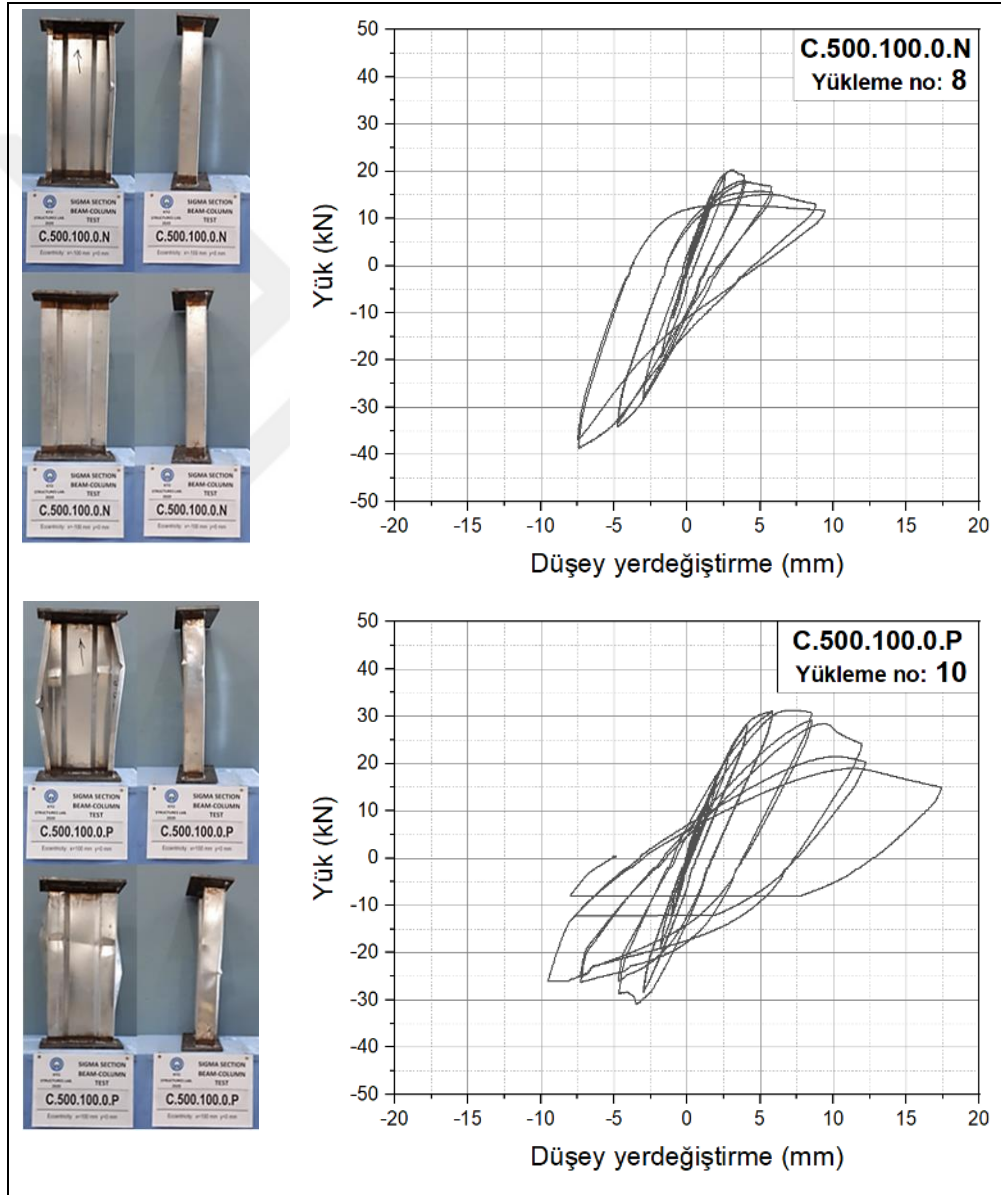
Şekil 88. C.500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 89’da verilmektedir. C.500.50.90.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmış ancak çekme bölgesinde kapasite artışı görülmüştür. Burkulma numunenin ortasında, yükleme yönündeki flanşa ve taban plakasına yakın bölgede meydana gelmiştir. C.500.50.90.P numunesinde ise basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ve burkulma gövdede numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



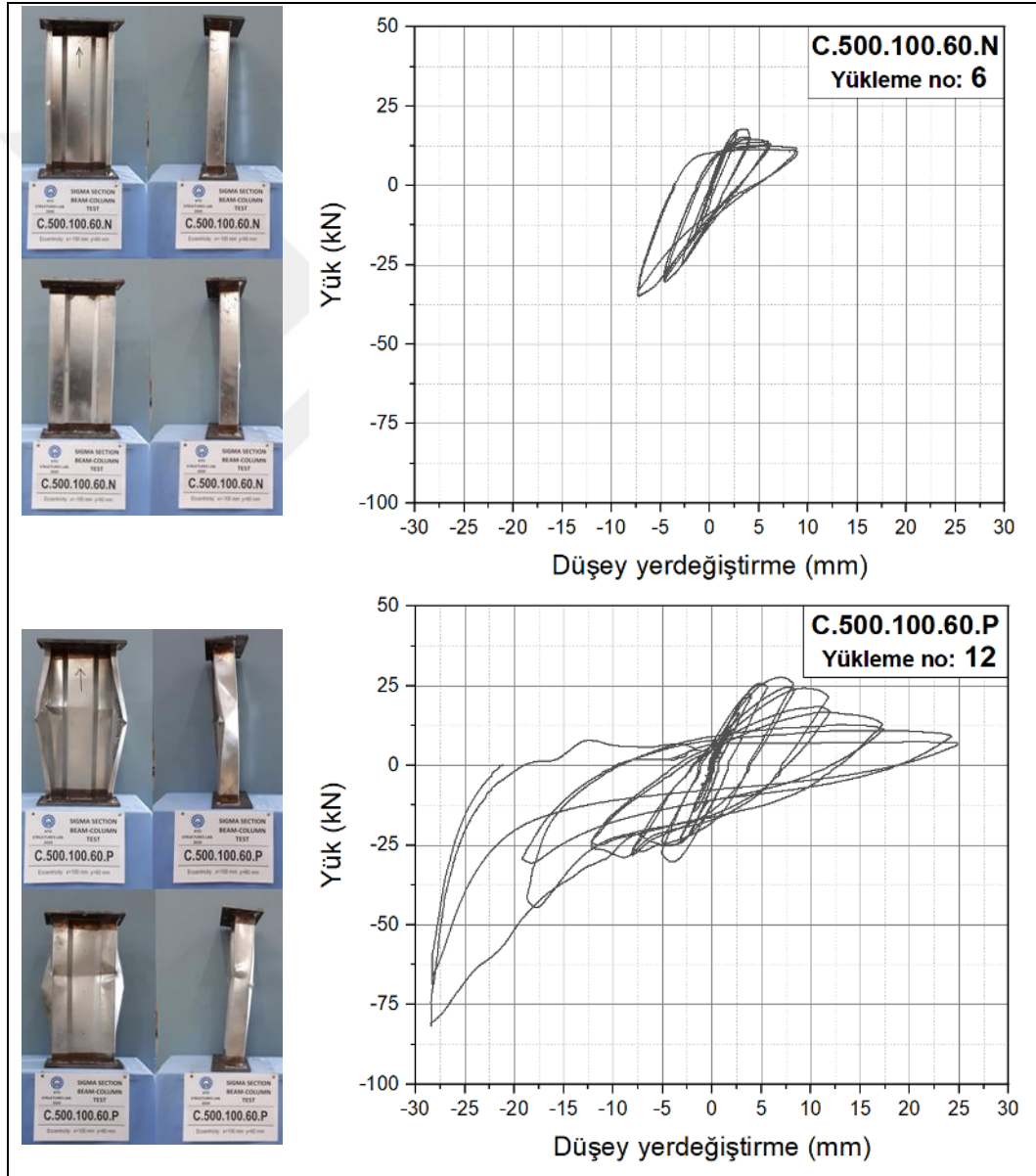
Şekil 89. C.500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 90’da verilmektedir. C.500.100.0.N basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı grlmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşta meydana gelmiştir. C.500.100.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesine nazaran daha sünek bir davranış grlmştr. Ayrıca burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta meydana gelmiştir.



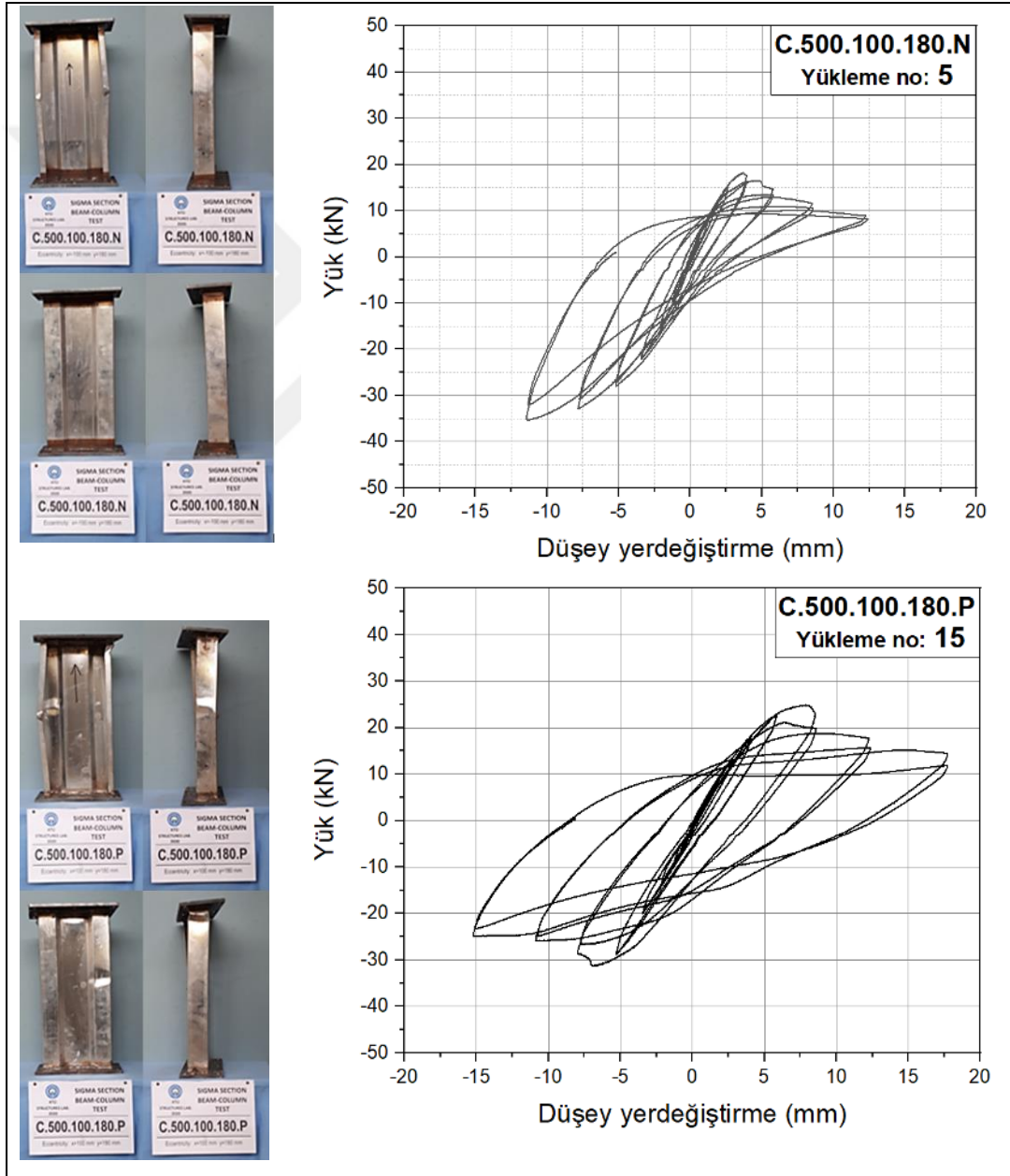
Şekil 90. C.500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 91’de verilmektedir. C.500.100.60.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşa meydana gelmiştir. C.500.100.60.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmış ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Ayrıca burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşa meydana gelmiştir.



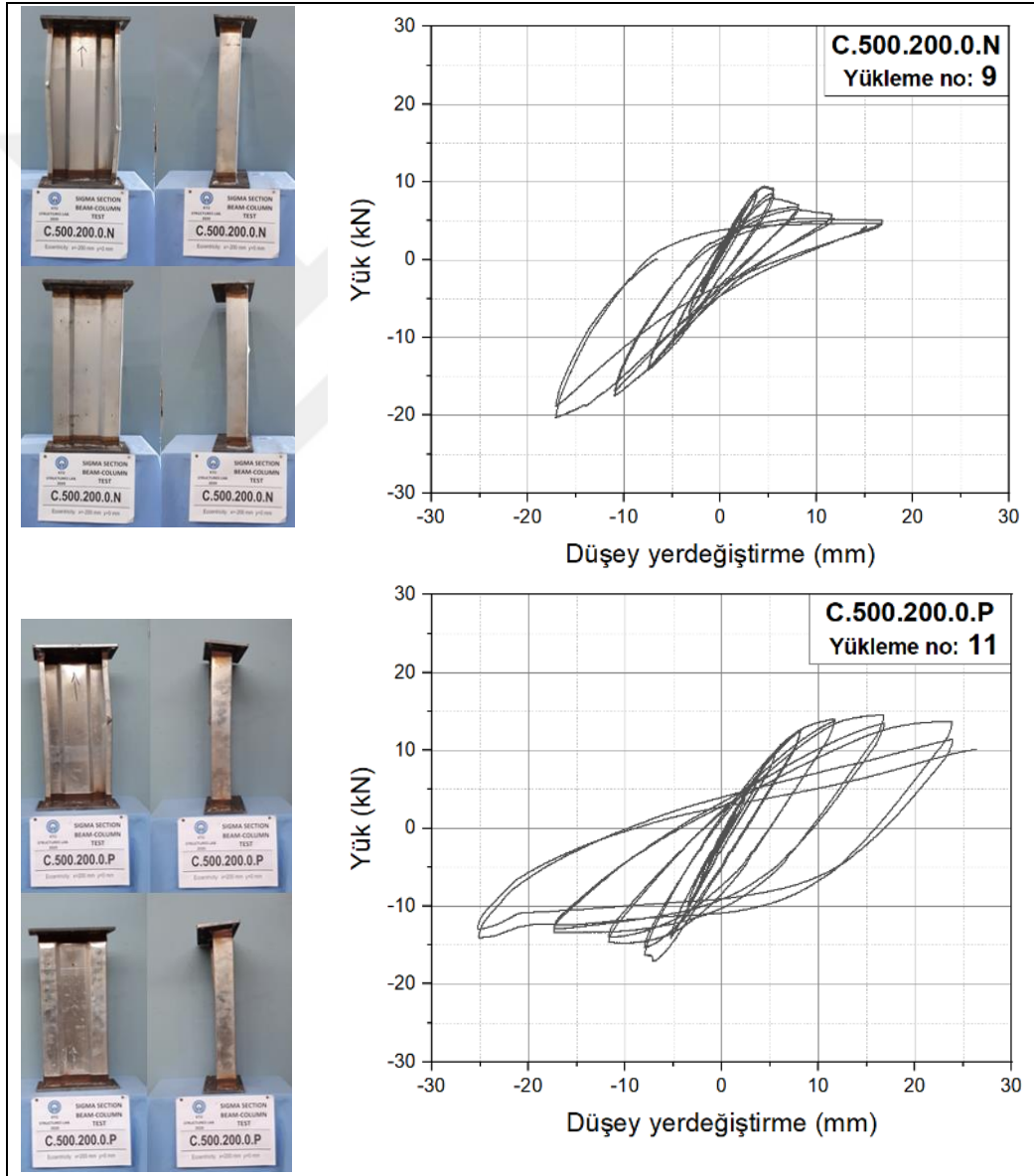
Şekil 91. C.500.100.60.P numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 92’de verilmektedir. C.500.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşa meydana gelmiştir. C.500.100.180.P basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşa meydana gelmiştir.



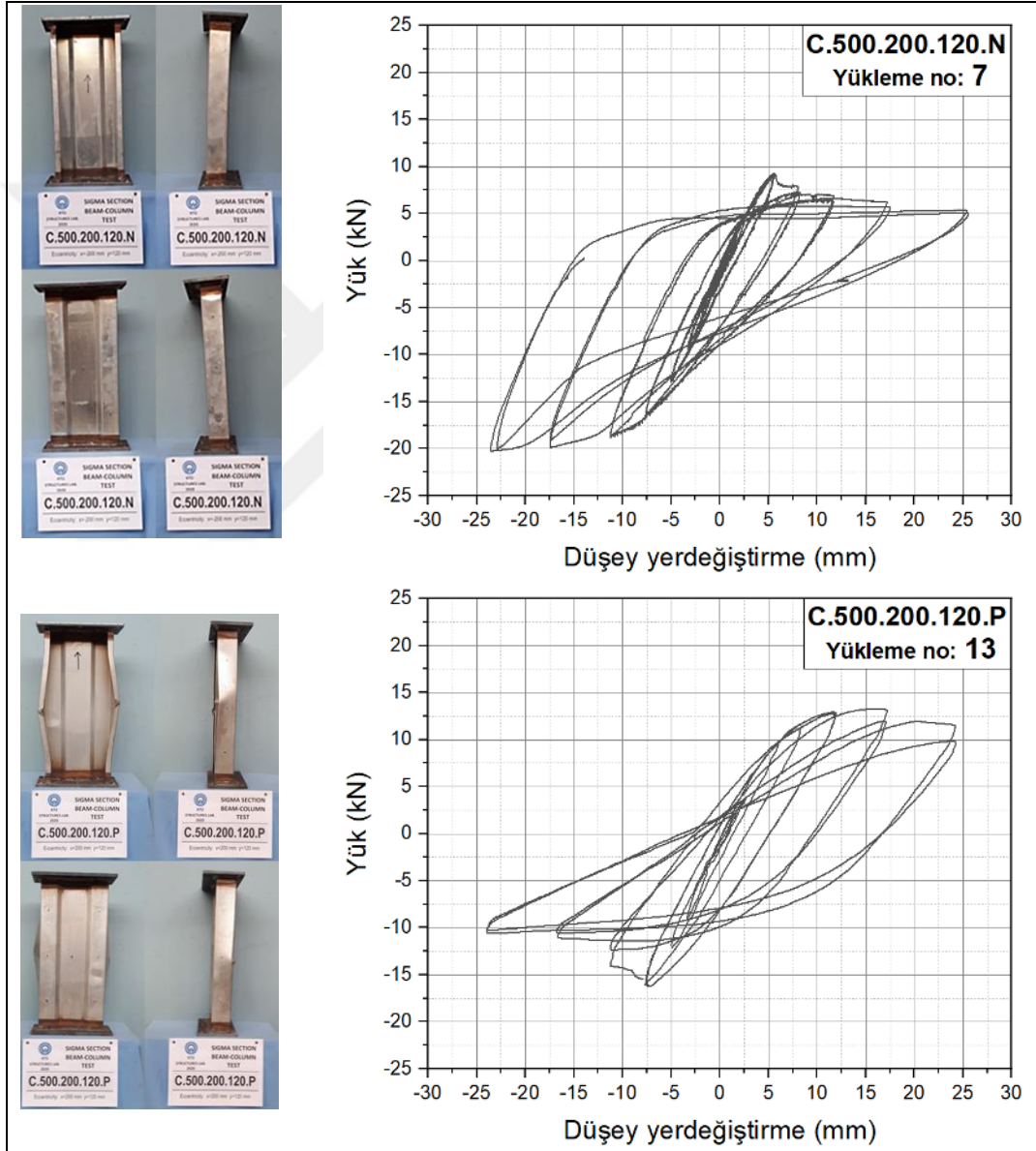
Şekil 92. C.500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.200.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 93'te verilmektedir. C.500.200.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta simetrik olarak meydana gelmiştir. C.500.200.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme ve basınç bölgesindeki davranış birbirine yakın olmuştur. Ayrıca burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşta meydana gelmiştir.



Şekil 93. C.500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.500.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 94’te verilmektedir C.500.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma numunenin alt mesnetine yakın bölgesinde gövdede meydana gelmiştir. C.500.200.120.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta meydana gelmiştir.



Şekil 94. C.500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

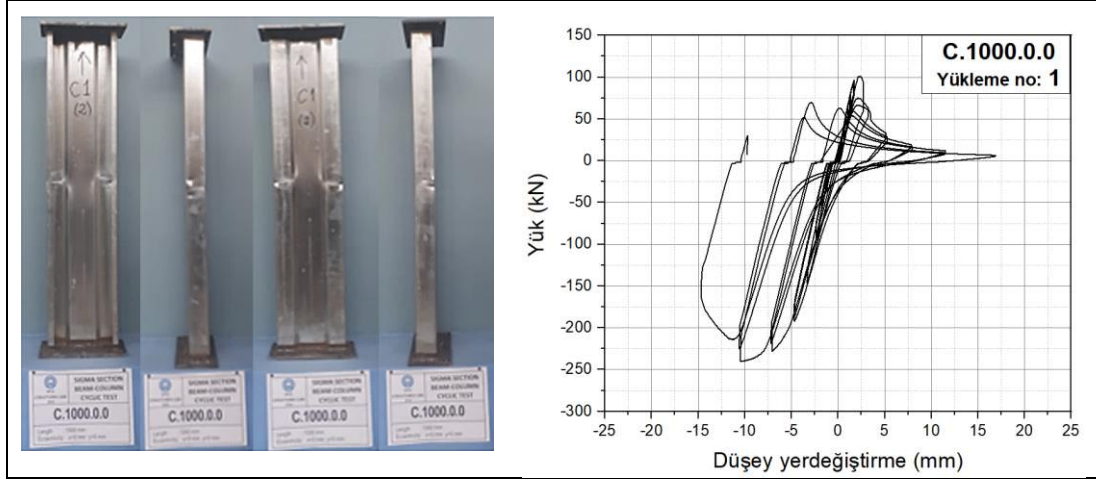
3.2.2. L=1000 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları

Çarpılmalı burkulmanın gözlemleneceği 1000 mm boyundaki 15 adet numune üzerinde gerçekleştirilen tersinir-tekrarlı deney sonrasına ait görünüşler Şekil 95'te verilmiştir. Eğrilerin tamamında, numunelerde meydana gelen burkulmalar nedeniyle basınç ve çekme bölgelerinde asimetrik davranış gözlenmiştir. Basınç altında oluşan elastik olmayan şekildeğştirmeler nedeniyle rijitlik ve dayanımda azalmalar meydana gelmiştir.

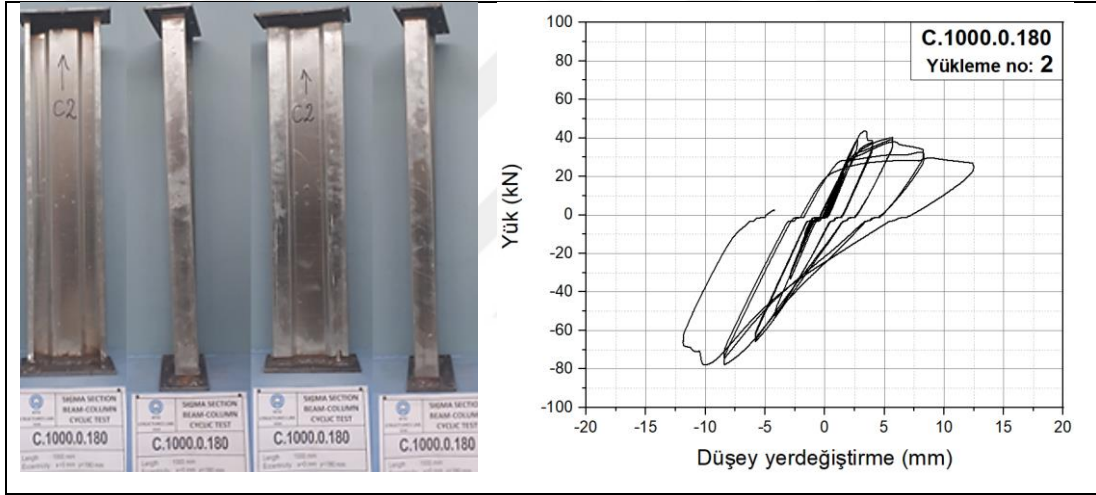


Şekil 95. 1000 mm'lik tersinir tekrarlı yükleme numunelerinin deney sonrası görünüşü

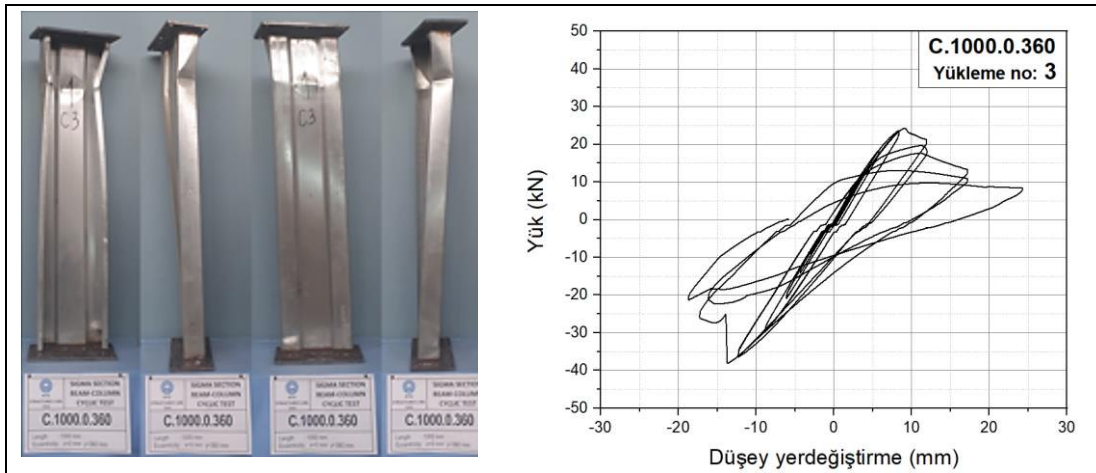
C.1000.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğştirme davranışı Şekil 113'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin alt mesnetine yakın bölgesinde gövdede meydana gelmiştir. C.1000.0.180 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğştirme davranışı Şekil 114'te verilmektedir. Basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ancak süneklik basınç bölgesine nazaran daha düşük olmuştur ve burkulma numunenin alt taban plakasına yakın bölgesinde flanşta meydana gelmiştir. Şekil 115'te ise C.1000.0.360 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğştirme davranışı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma yükleme noktasına yakın bölgede gövdede ve her iki flanşta meydana gelmiştir.



Şekil 96. C.1000.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

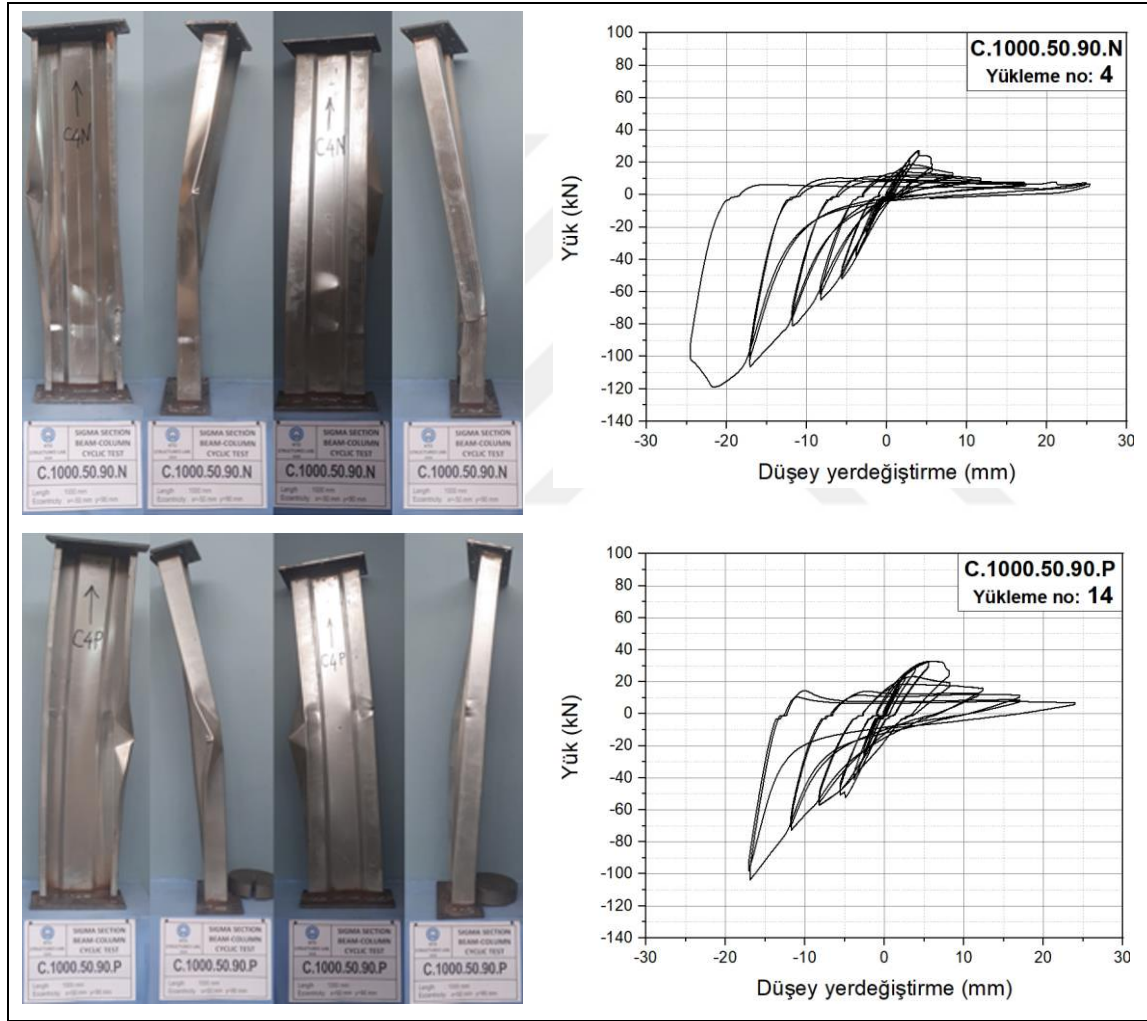


Şekil 97. C.1000.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



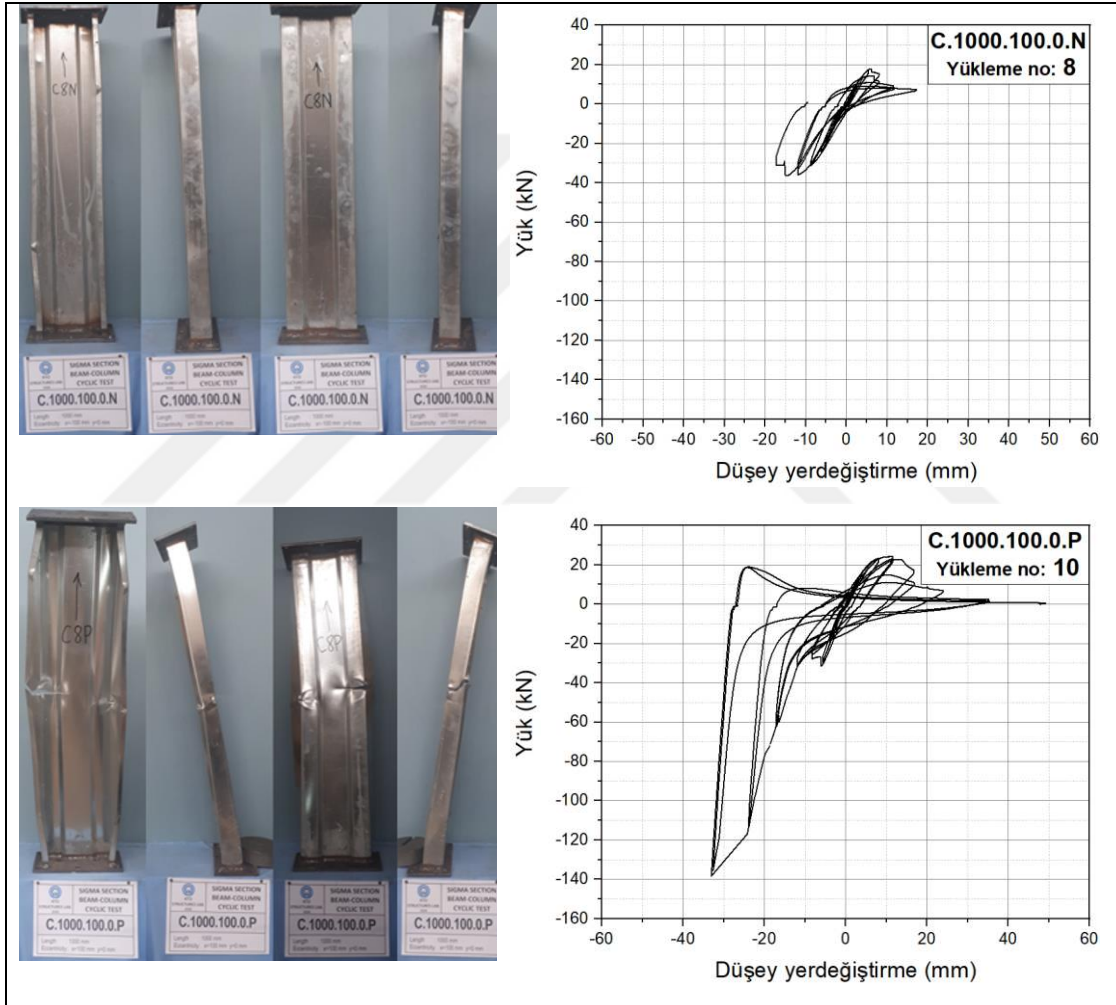
Şekil 98. C.1000.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Şekil 99’da C.1000.50.90.N ve P numunelerinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. C.1000.50.90.N numunesinin eğrisinin rijitliği basınç bölgesindeki burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin alt mesnetine yakın bölgesindeki flanşlarda ve gövdede meydana gelmiştir. C.1000.50.90.P numunesinin de rijitliği basınç bölgesindeki burkulmalar nedeniyle azalmıştır ve çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma ise numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşa meydana gelmiştir.



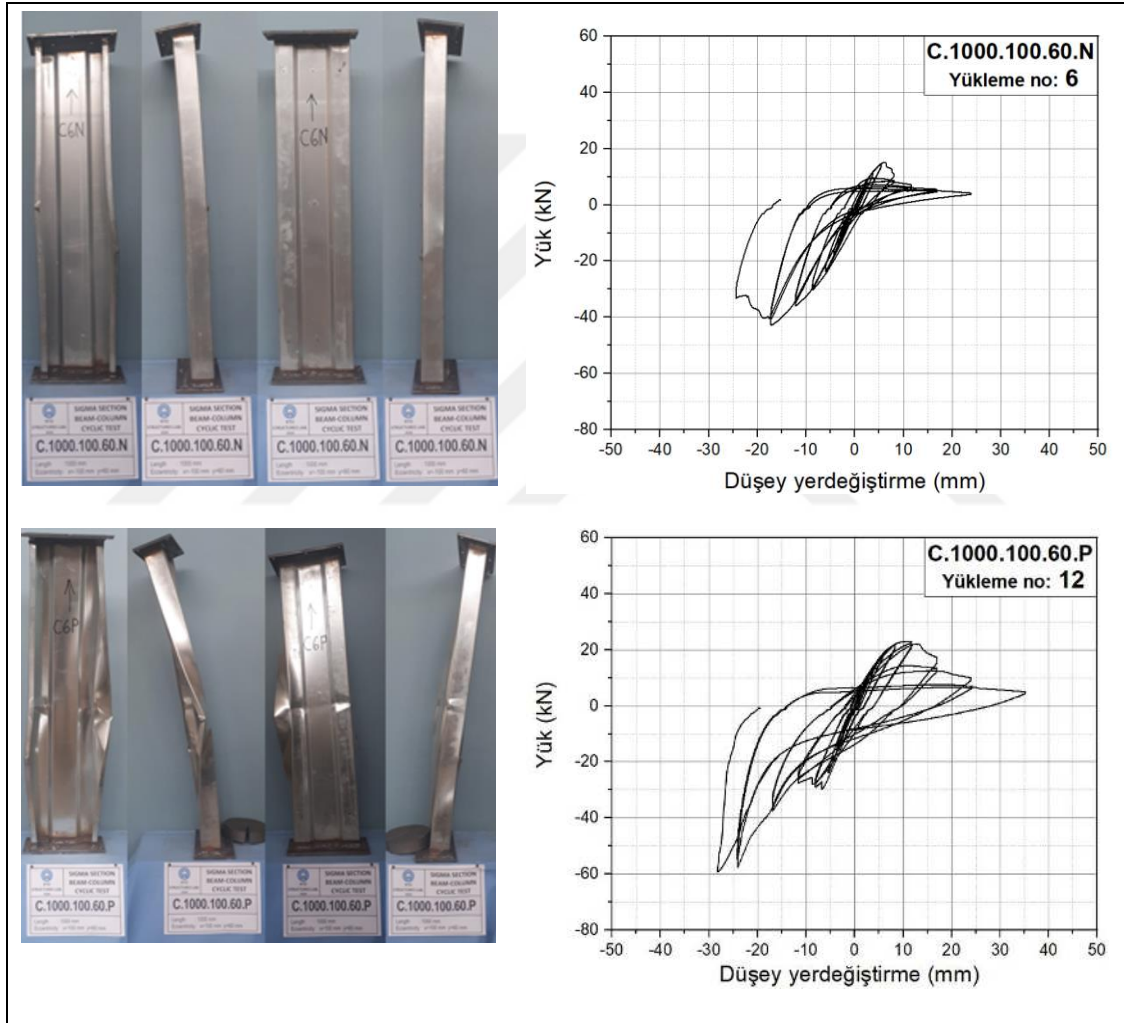
Şekil 99. C.1000.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1000.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 100'de verilmektedir. C.1000.100.0.N numunesinde, basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma flanşların numunenin ortasına uzak bölgesinde meydana gelmiştir. C.1000.100.0.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma gövdenin numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



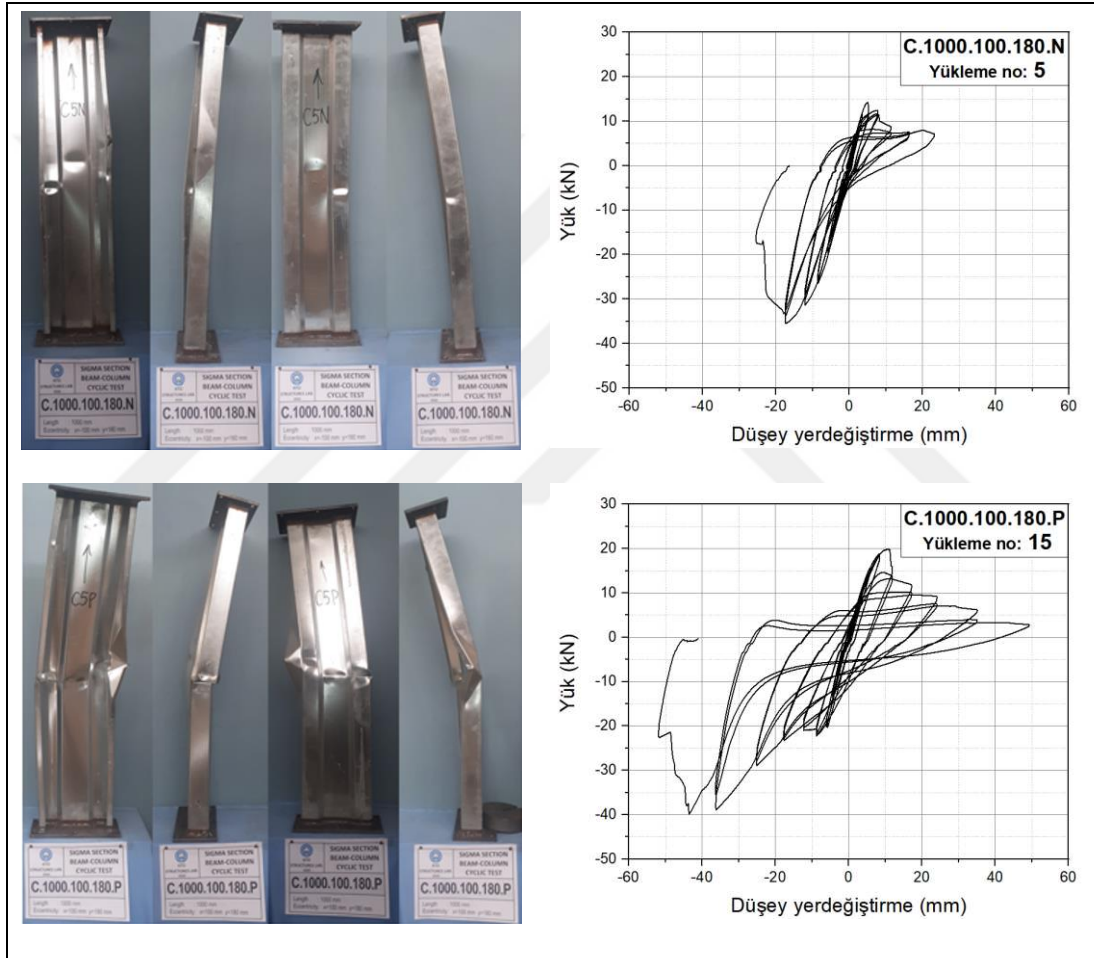
Şekil 100. C.1000.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Şekil 101’de C.1000.100.60.N ve P numunelerinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi C.1000.100.60.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir. C.1000.100.60.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



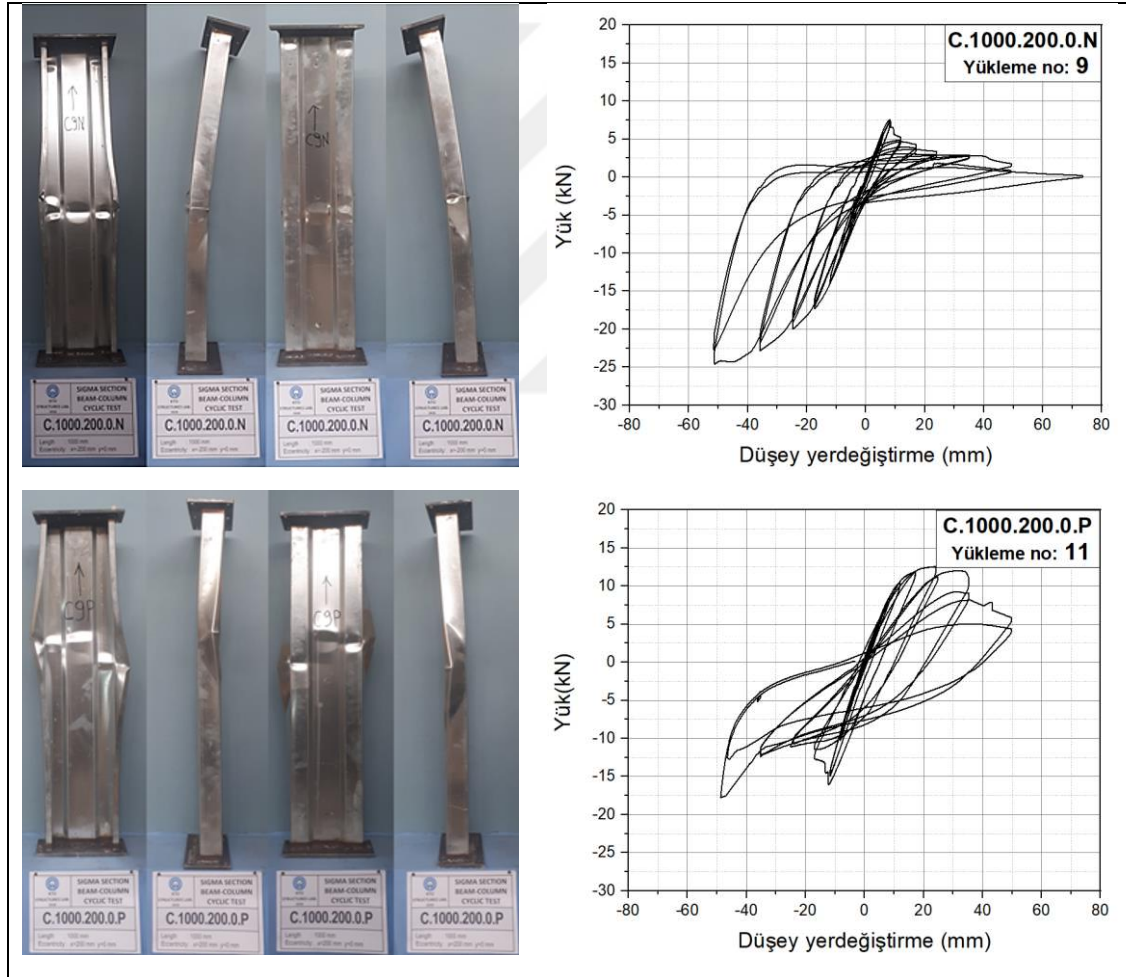
Şekil 101. C.1000.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Şekil 102’de C.1000.100.180.N ve P numunelerinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi C.1000.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir. Benzer şekilde, C.1000.100.180.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma gövdenin ve flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



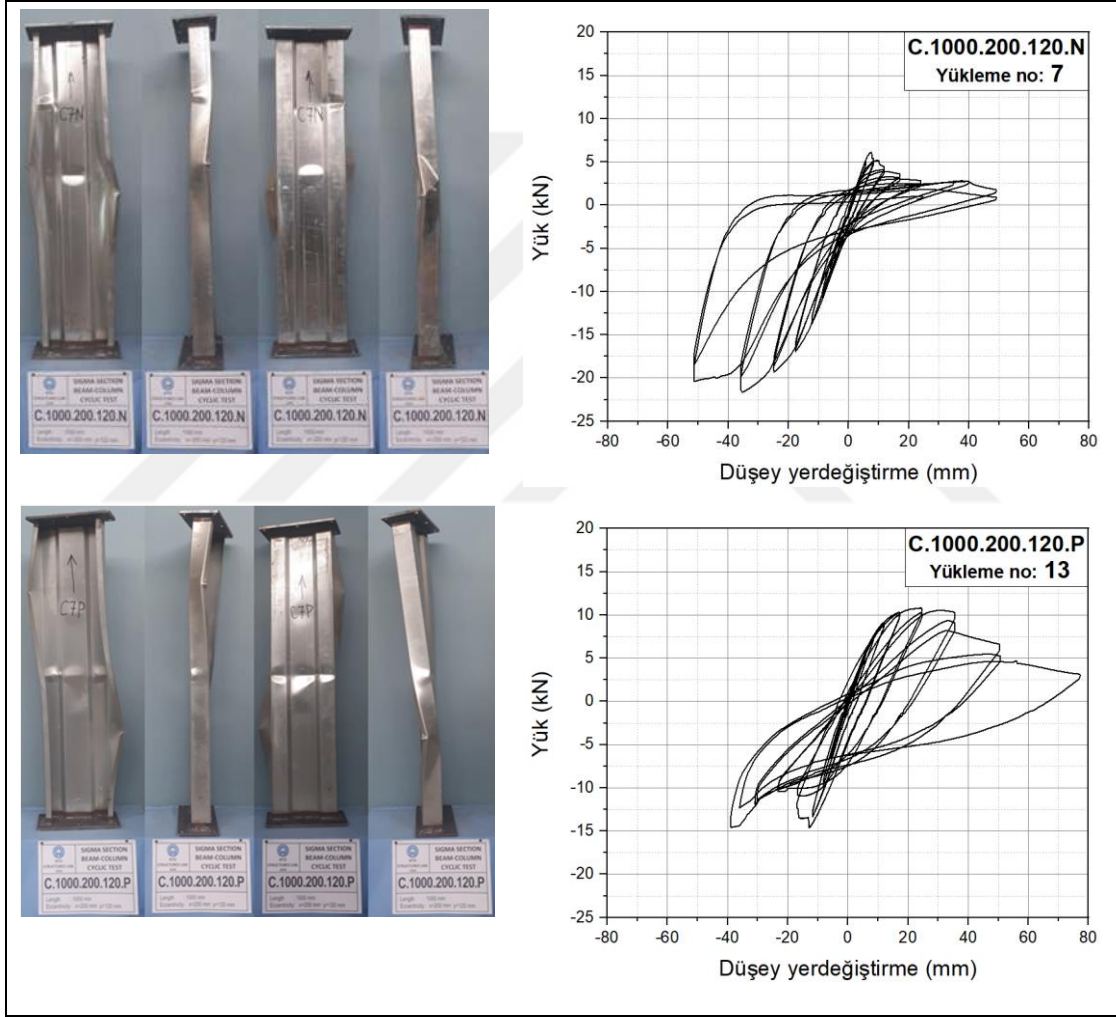
Şekil 102. C.1000.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1000.200.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 103'te verilmektedir. Profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu C.1000.200.0.N numunesinin eğrisinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır buna karşın çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Ayrıca burkulma gövdenin ve flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir. Profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında bulunduğu C.1000.200.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma gövdenin ve flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



Şekil 103. C.1000.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1000.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 104'te verilmektedir. C.1000.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir ve burkulma flanşların numunenin ortasına yakın bölgesinde meydana gelmiştir. Benzer olarak, C.1000.200.120.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir. Burkulma gövdede ve flanşların mesnetlere yakın bölgesinde meydana gelmiştir.



şekil 104. C.1000.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

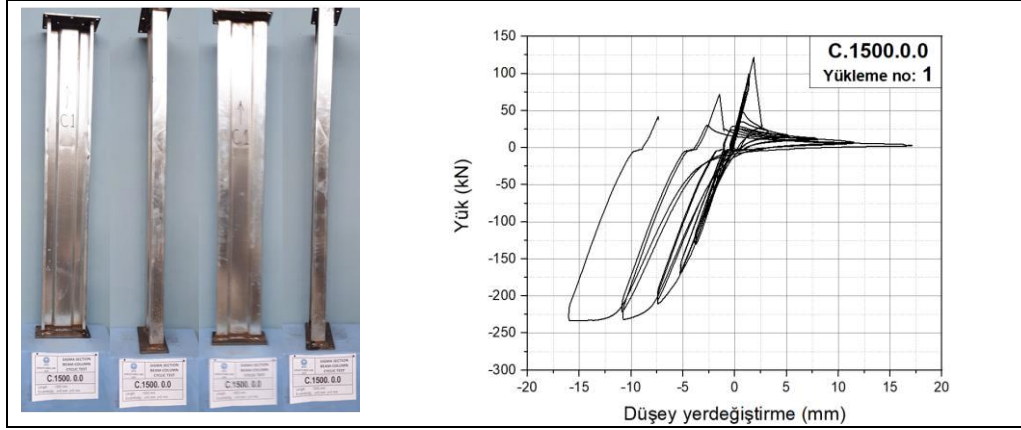
3.2.3. L=1500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Deney Sonuçları

Genel burkulmanın gözlemleneceği 1500 mm boyundaki numunelere ait tersinir-tekrarlı deneylerin sonrasına ait görünüşler Şekil 105'te verilmiştir. Eğrilerin tamamında, beklenildiği gibi, numunelerde meydana gelen burkulmalar nedeniyle basınç ve çekme bölgelerinde asimetrik davranış gözlenmiştir. Basınç altında oluşan elastik olmayan şekildeğiştirmeler nedeniyle rijitlik ve dayanımda azalmalar meydana gelmiştir.

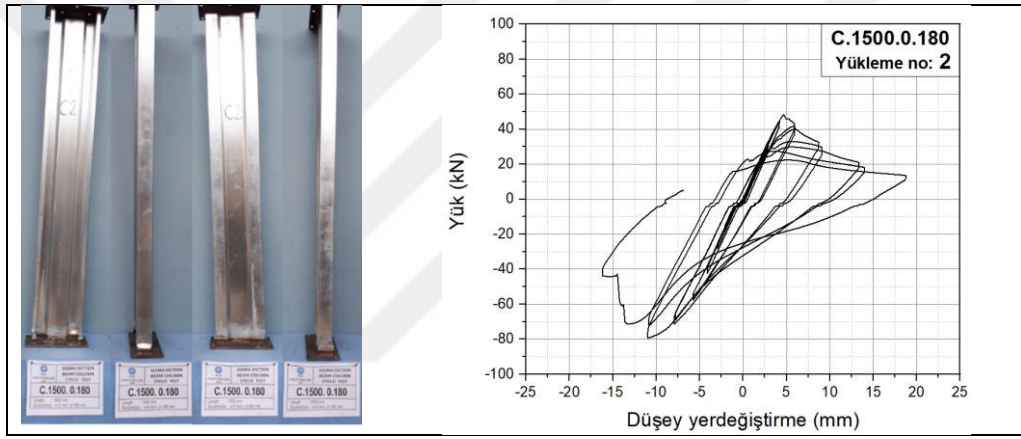


Şekil 105. 1500 mm'lik numunelerin tersinir-tekrarlı deney sonrası görünüşleri

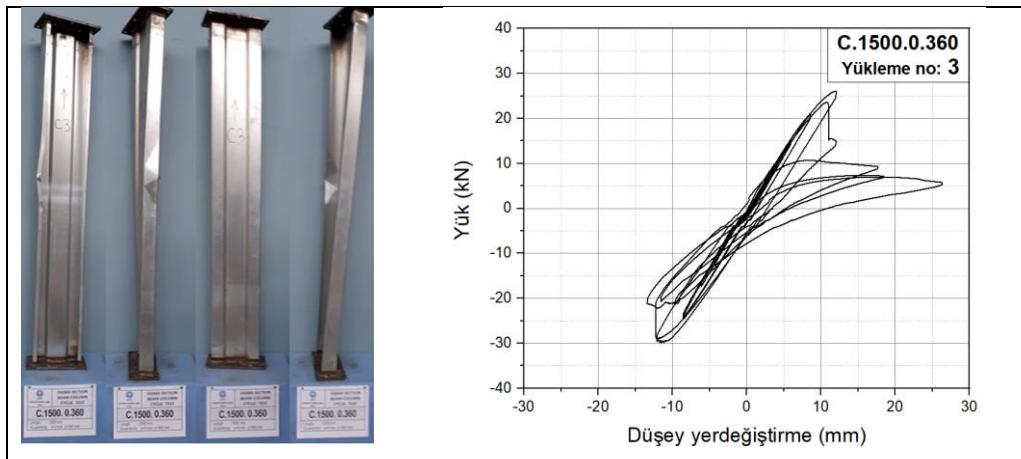
Şekil 106'da C.1500.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir. Şekil 107'de C.1500.0.180 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşa alt mesnete yakın bölgede meydana gelmiştir. Şekil 108'de C.1500.0.360 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Süneklik her iki bölgede birbirine yakın olmuştur. Burkulma gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.



Şekil 106. C.1500.0.0 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



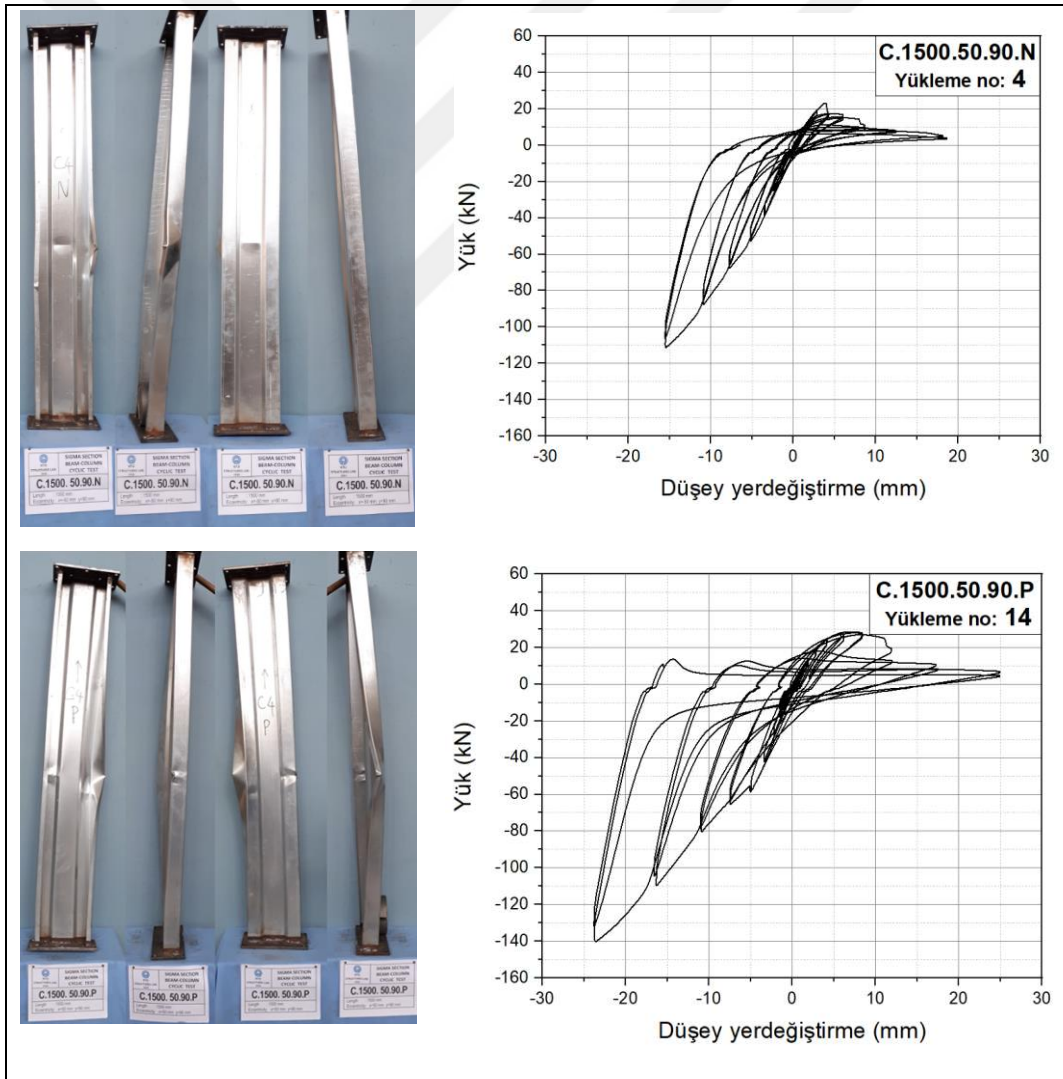
Şekil 107. C.1500.0.180 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı



Şekil 108. C.1500.0.360 numunesinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1500.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 109’da verilmektedir. Sigma profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü C.1500.50.90.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma gövdede ve flanşlarda numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

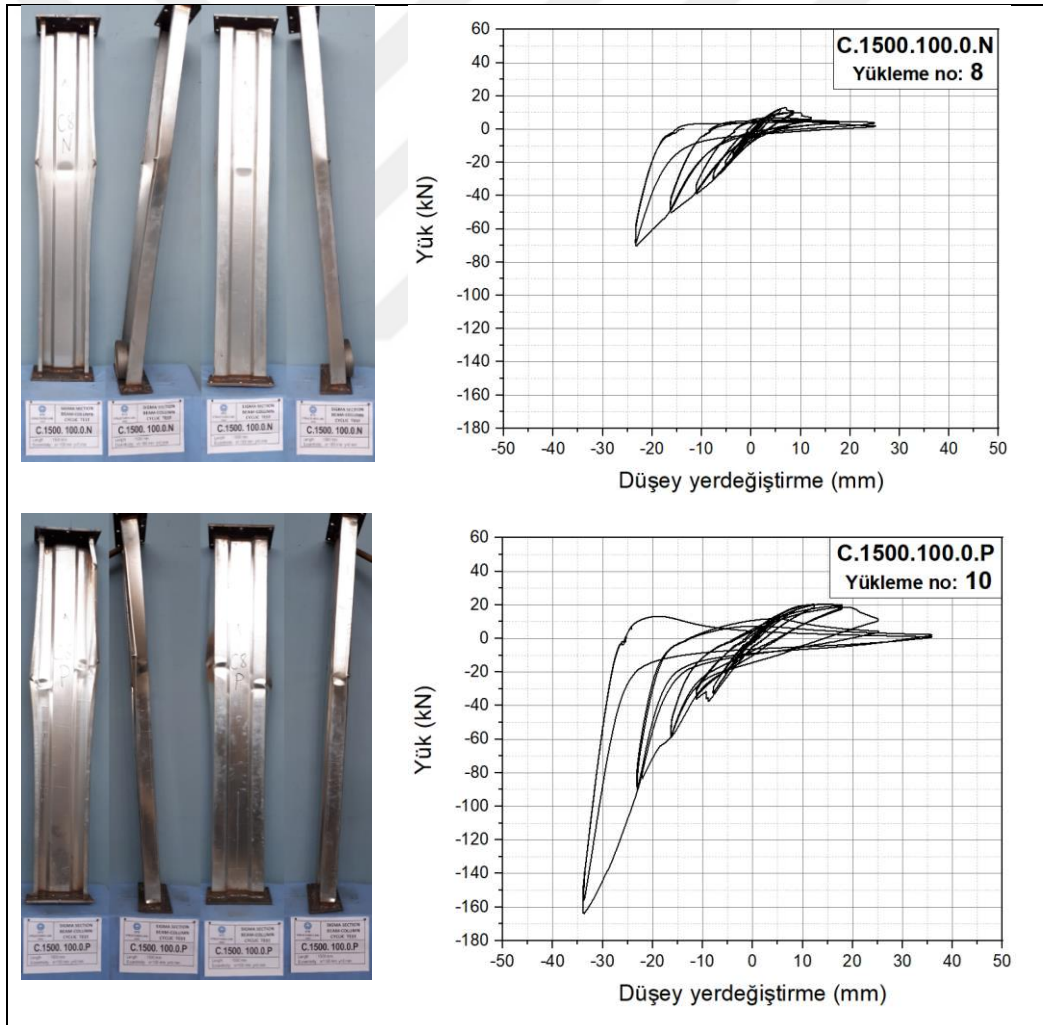
Profil dudaklarının çekme kuvveti altında olduğu C.1500.50.90.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır buna karşın çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.



Şekil 109. C.1500.50.90 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

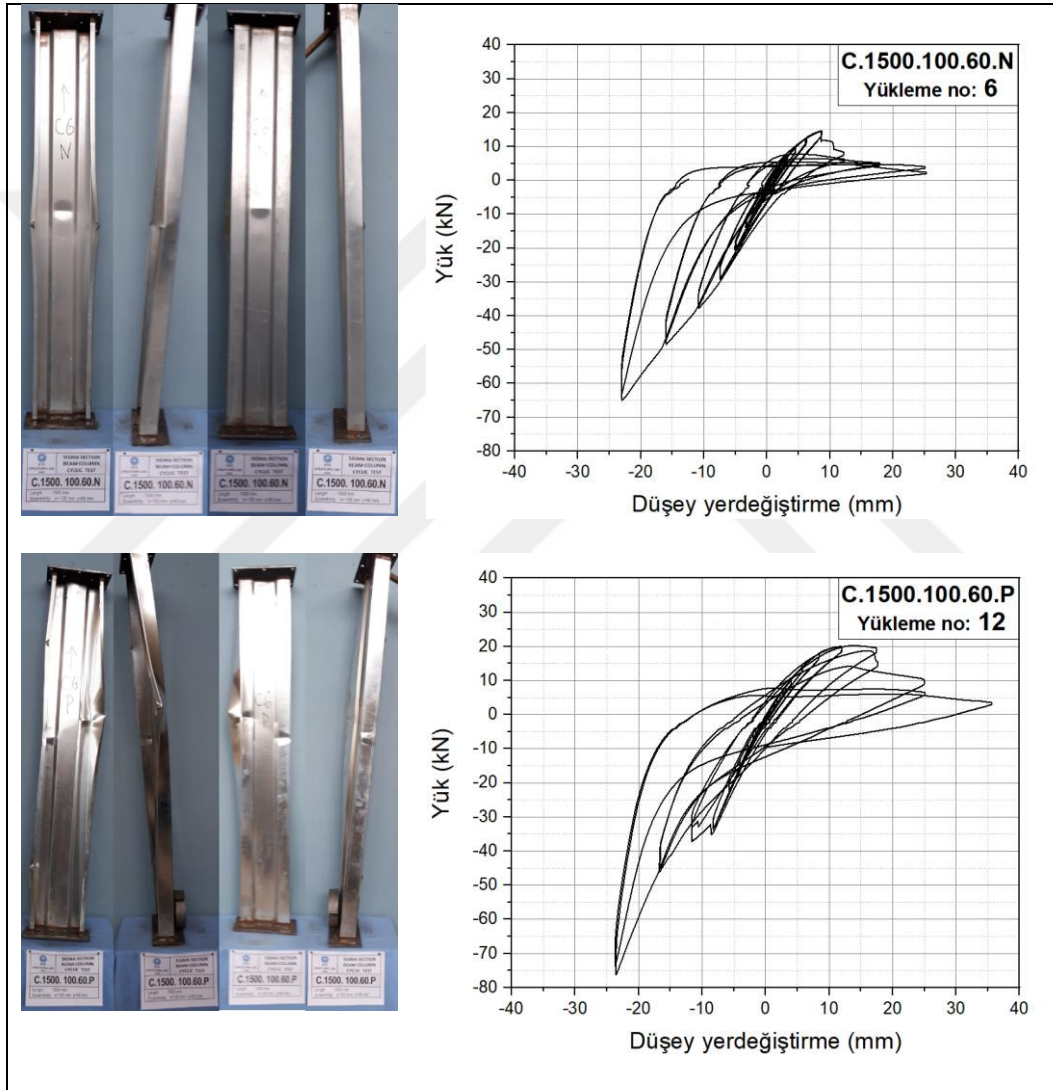
C.1500.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 110'da verilmektedir. $e_x=100$ mm eksantriklikle yüklü yalnızca zayıf eksen eğilmesi altındaki (dudaklar basınç kuvveti altında) C.1500.100.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşların her iki mesnete yakın bölgesinde meydana gelmiştir.

Yalnız zayıf eksen eğilmesi ve dudaklar çekme kuvveti altında olan C.1500.100.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.



Şekil 110. C.1500.100.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Şekil 111’de C.1500.100.60.N ve P numunelerinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme eğrileri verilmektedir. Her iki numunenin de basınç bölgesindeki rijitlikleri burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. C.1500.100.60.N profilindeki burkulma flanşlarda numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir. C.1500.100.60.P numunesindeki burkulma ise flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

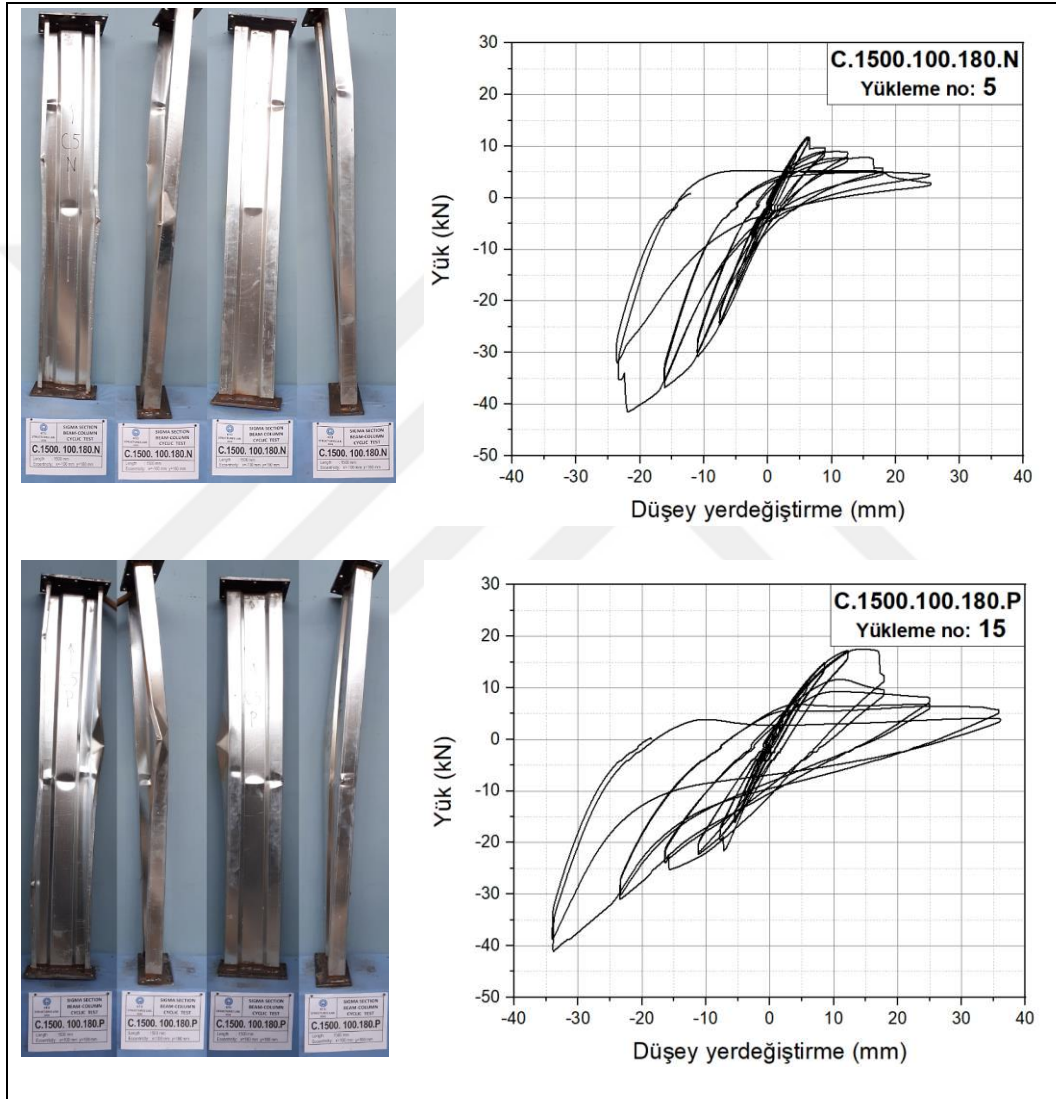


Şekil 111. C.1500.100.60 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1500.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 112’de verilmektedir. C.1500.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı

görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

Benzer olarak, C.1500.100.180.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

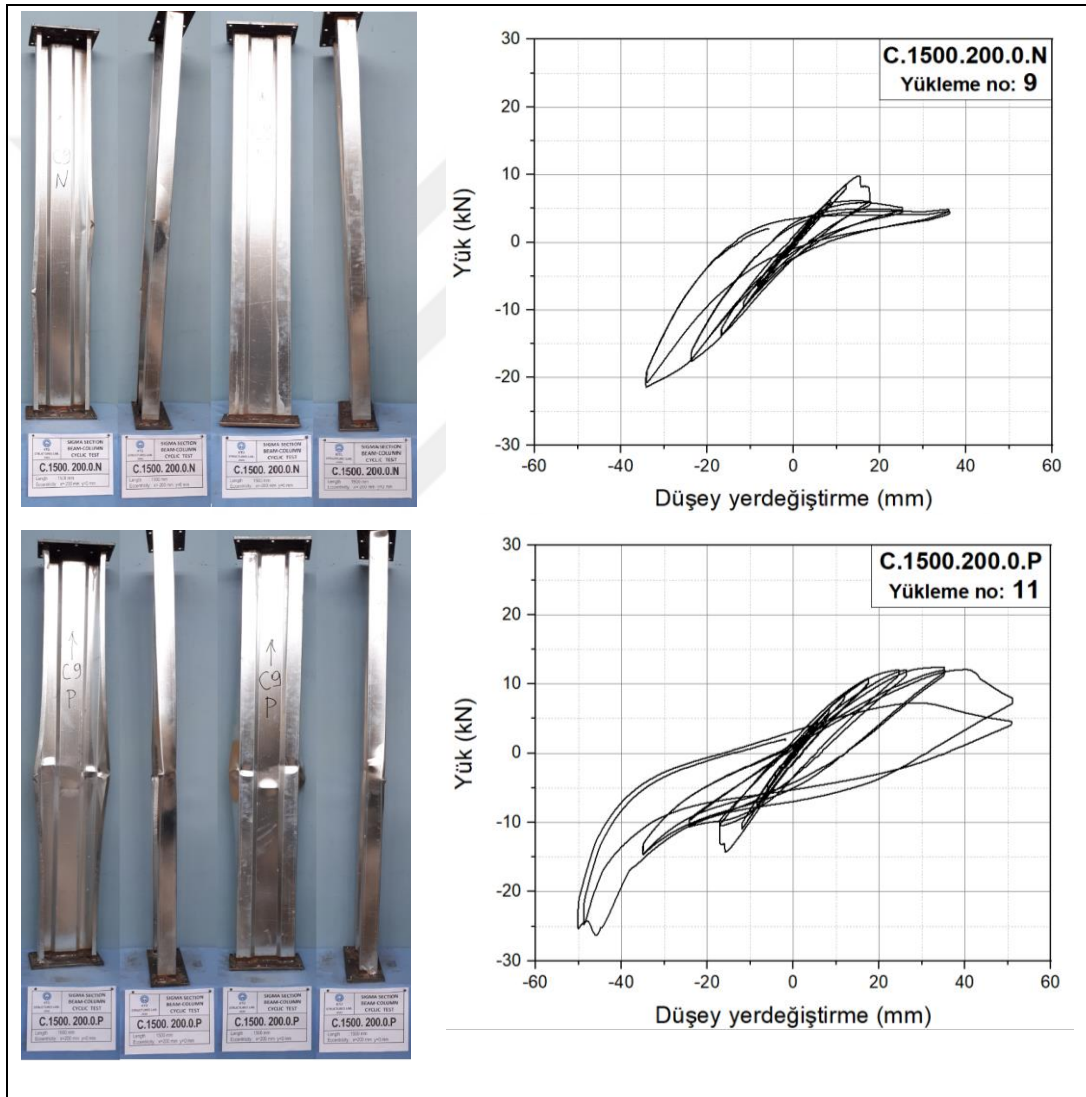


Şekil 112. C.1500.100.180 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

Şekil 113'te C.1500.200.0.N ve P numunelerinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı verilmektedir. Yalnız zayıf eksen eğilmesi etkisindeki C.1500.200.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır

ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

Profil dudaklarının çekme gerilmesi altında bulunduğu C.1500.200.0.P numunesinin de basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

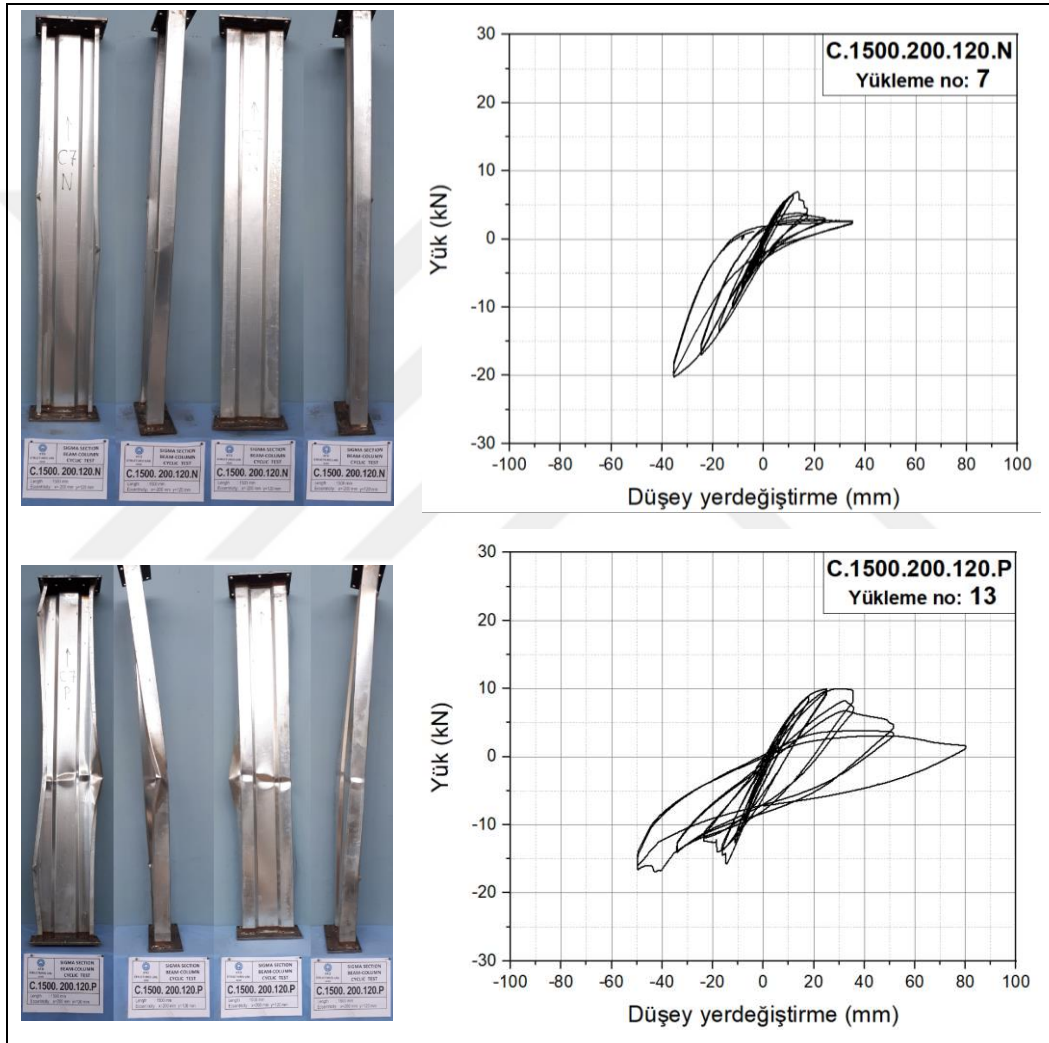


Şekil 113. C.1500.200.0 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

C.1500.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 114'te verilmektedir. C.1500.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki

rijitlik burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.

C.1500.200.120.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma mesnetlere yakın flanşlarda ve gövdede numunenin ortasına yakın bölgede meydana gelmiştir.



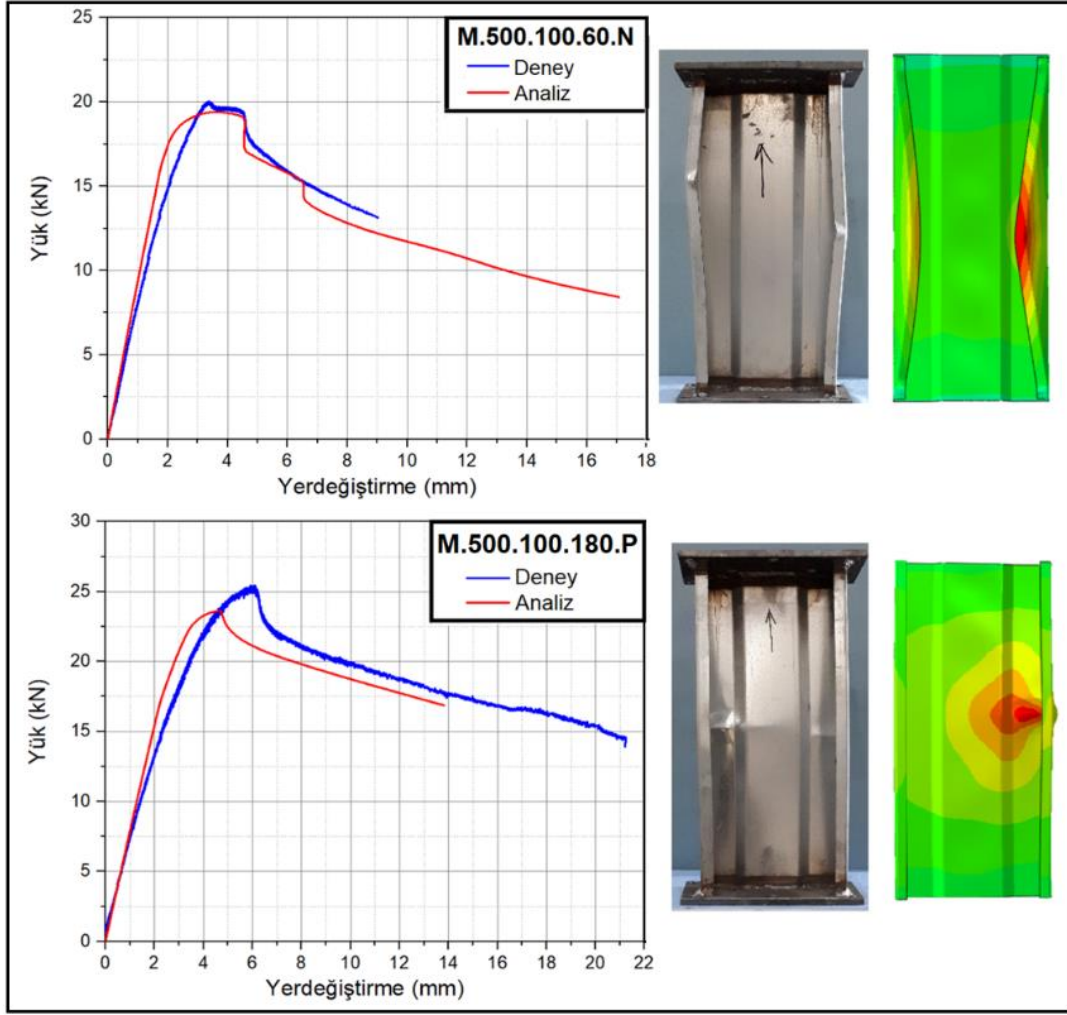
Şekil 114. C.1500.200.120 numunelerinin burkulma ve yük-yerdeğiştirme davranışı

3.3. Sonlu Eleman Modellerinin Deneylerle Doğrulanması

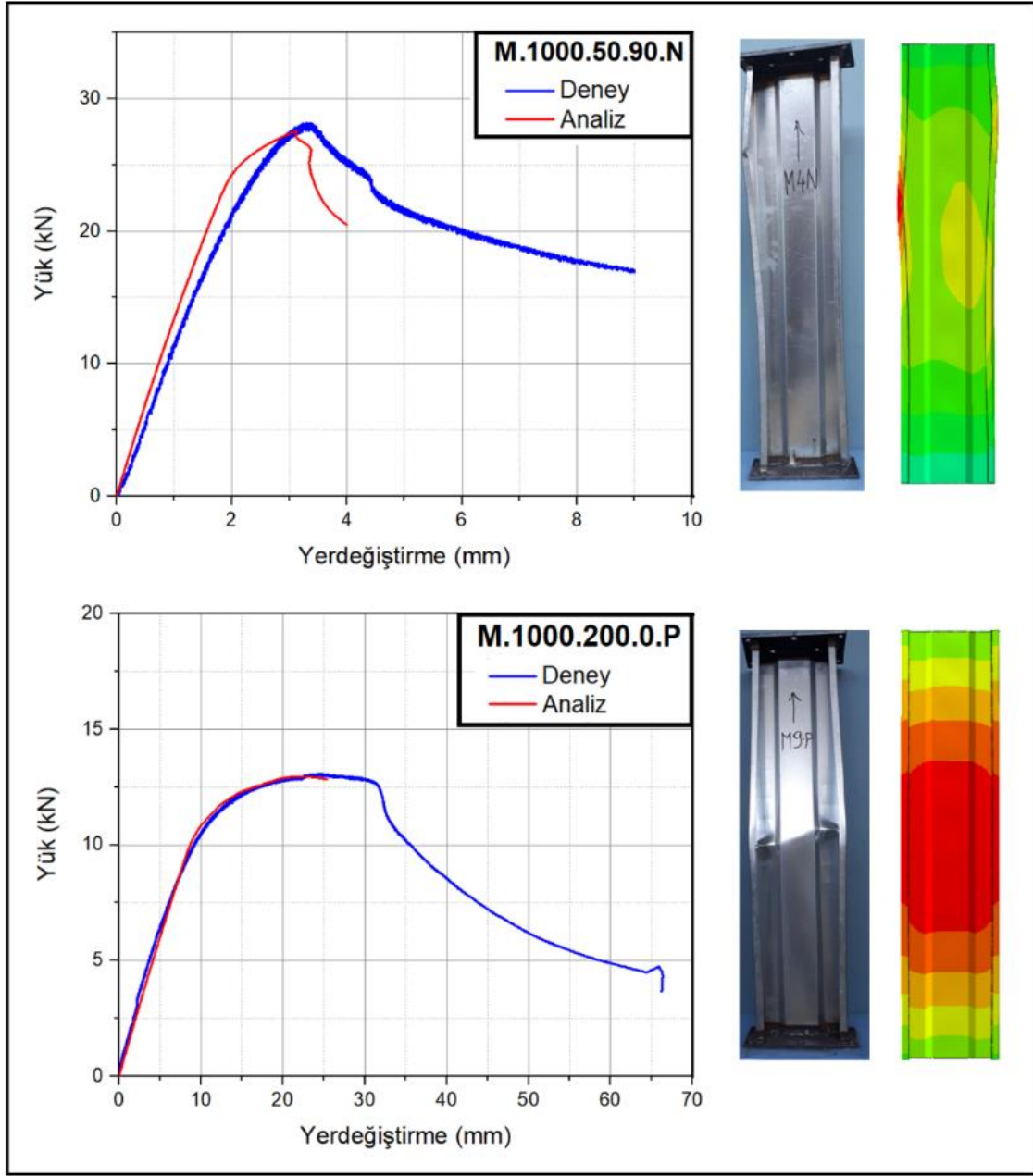
Aşağıdaki Şekil 115-Şekil 117’de boyları $L=500$ mm, $L=1000$ mm ve $L=1500$ mm olan ve deneysel sonuçların sonlu eleman analizleriyle uyumluluğu görece daha yüksek olan numunelere ait sonlu eleman analiz sonuçlarından ve deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri üzerinden karşılaştırılmıştır. Deney ve analizlerin sonucunda elde edilen nihani burkulmalar da aynı şekiller üzerinde verilmiştir. Ayrıca, sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen burkulma şekillerindeki konturlar her numunenin kendi içindeki şekildeğiştirme büyüklüğünü ifade etmektedir. Numunelerin deney ve sonlu eleman analizinden elde edilen kapasiteleri ve oranları Tablo 4’te verilmektedir. Deneysel eğrilerle analizlerden elde edilen eğrilerin arasında kabul edilebilir uyum elde edilmiştir. Daha sonra 45 adet numunenin monotonik sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 8. Bazı monotonik deney ve sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması

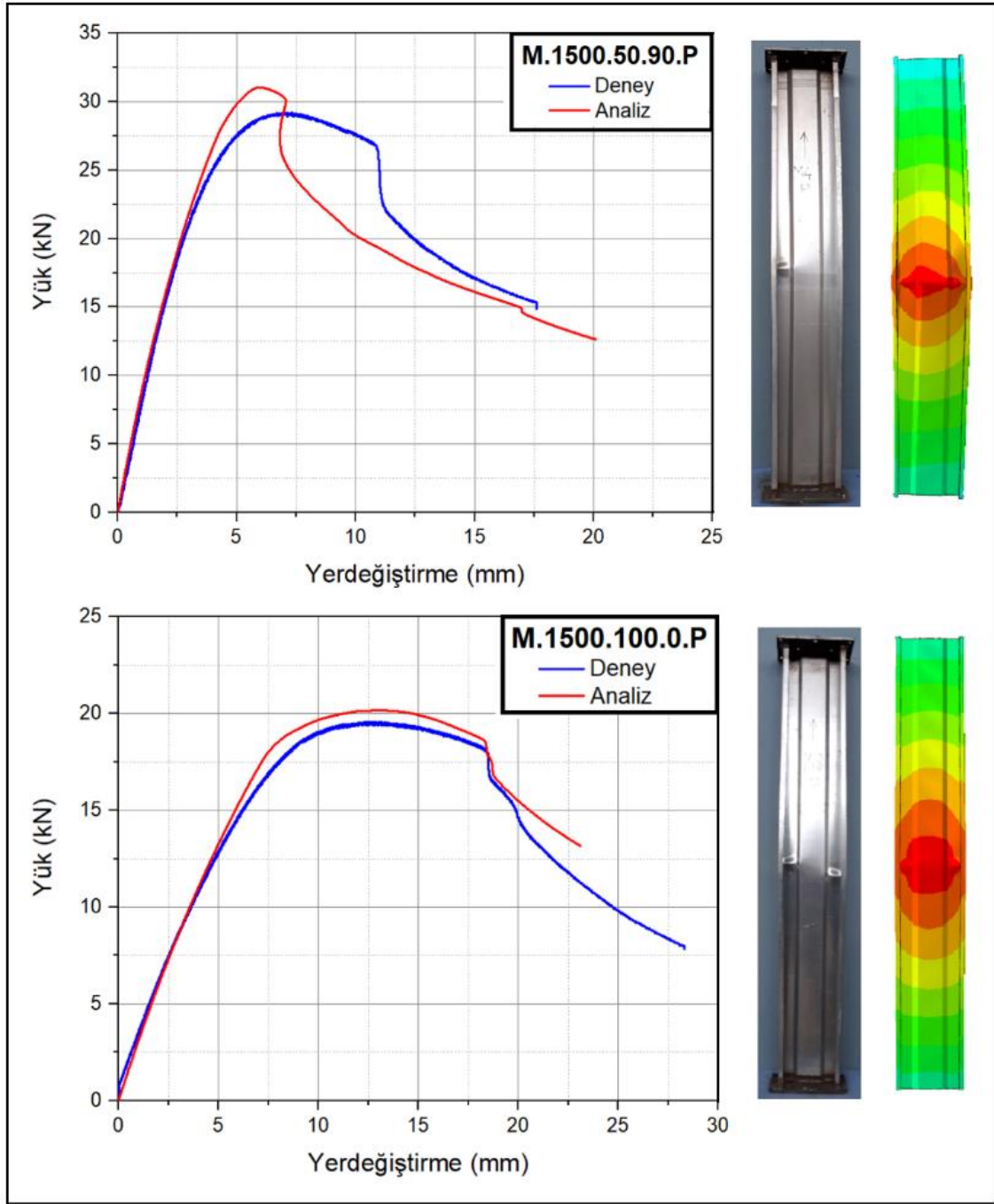
Numune	Numune Boyu, L (mm)	Kapasite (kN)		Analiz / Deney
		Deney	Sonlu eleman analizi	
M.500.100.60.N	500	20.03	19.4	0.968
M.500.100.180.P	500	25.43	23.6	0.928
M.1000.50.90.N	1000	28.17	27.55	0.978
M.1000.200.0.P	1000	13.07	12.96	0.992
M.1500.50.90.P	1500	29.19	31.04	1.063
M.1500.100.0.P	1500	19.56	20.16	1.03



Şekil 115. $L=500$ mm'lik iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 116. L=1000 mm'lik iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



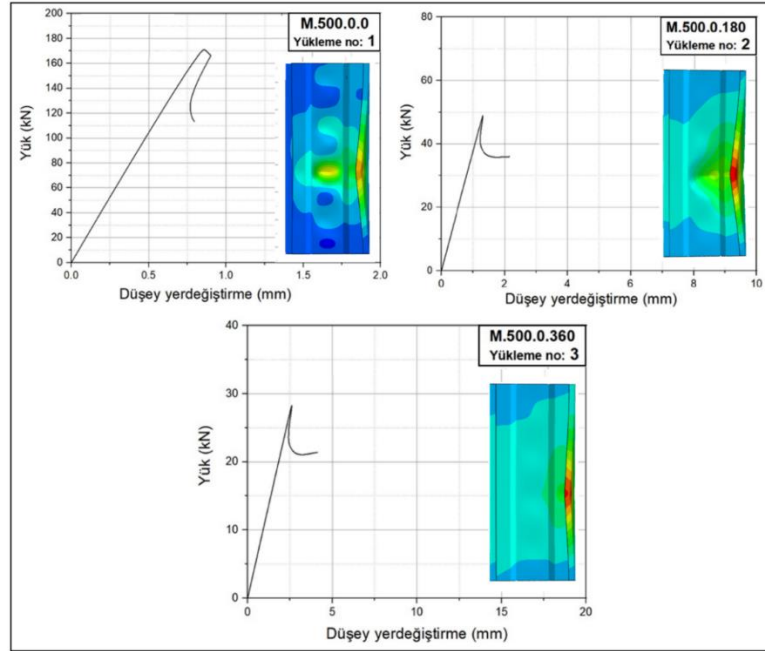
Şekil 117. L=1500 mm'lik iki numunenin deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

3.4 Monotonik Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

Sonlu eleman modellerinin yukarıdaki şekilde doğrulanmasının ardından deneysel çalışmaları tamamlanan 45 adet numunenin modellenmesinin ardından monotonik yükleme altında sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri ve burkulma şekilleri ve aşağıda verilmiştir.

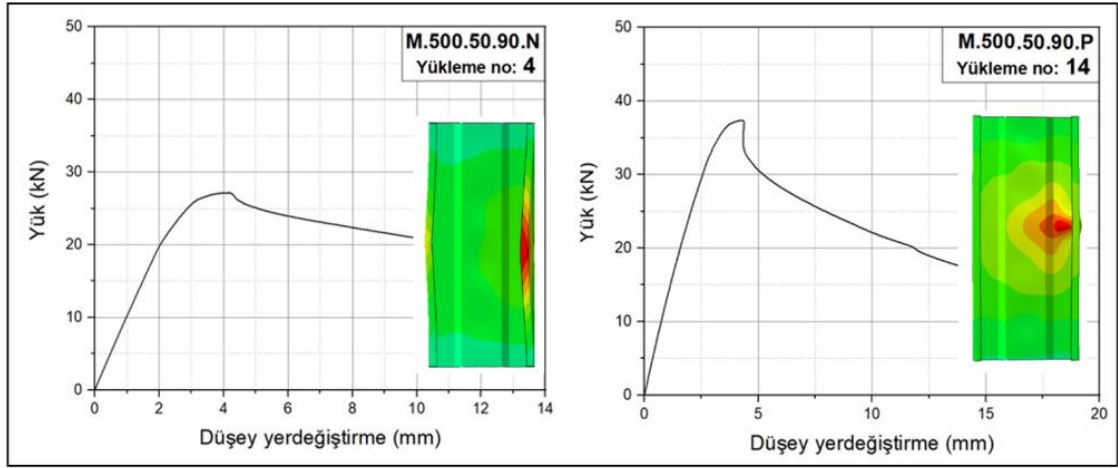
3.4.1 L=500 mm'lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları

M.500.0.0, M.500.0.180 ve M.500.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrisi ve burkulma durumu Şekil 118'de görülmektedir. Eksenel yükleme numunesi olan M.500.0.0'ın flanşında yerel burkulma olduğu görülmektedir. $e_y=180$ mm eksantrik yüklü, yalnızca kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.500.0.180 numunesinin analizinde yerel burkulma eksantrik yükleme noktasının oluşturduğu basınç gerilmesi nedeniyle yükleme tarafındaki flanşta meydana gelmiştir. $e_y=360$ mm eksantrik yüklü, yalnızca kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.500.0.360 numunesinde yerel burkulma, benzer olarak, yükleme noktası tarafındaki flanşta oluşmuştur.



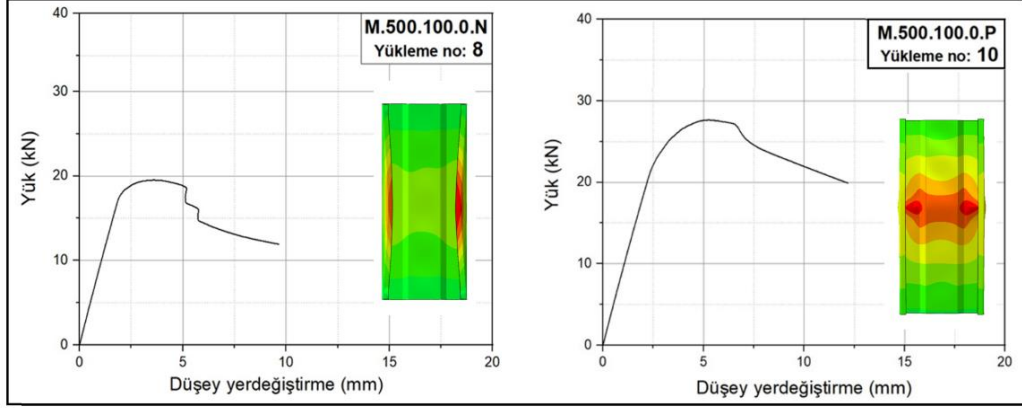
Şekil 118. M.500.0.0, M.500.0.180 ve M.500.0.360 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonuçları

M.500.50.90 N ve P numunelerinin analizine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri ve burkulma durumu şekil 119’da verilmektedir. Sigma profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.50.90.N numunesinin flanşında yükleme doğrultusunda yerel burkulma oluşmuştur. Profilin dudaklarının çekme kuvveti altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.50.90.P numunesinin gövde kısmının flanşa yakın bölgesinde yerel burkulma oluşmuştur.



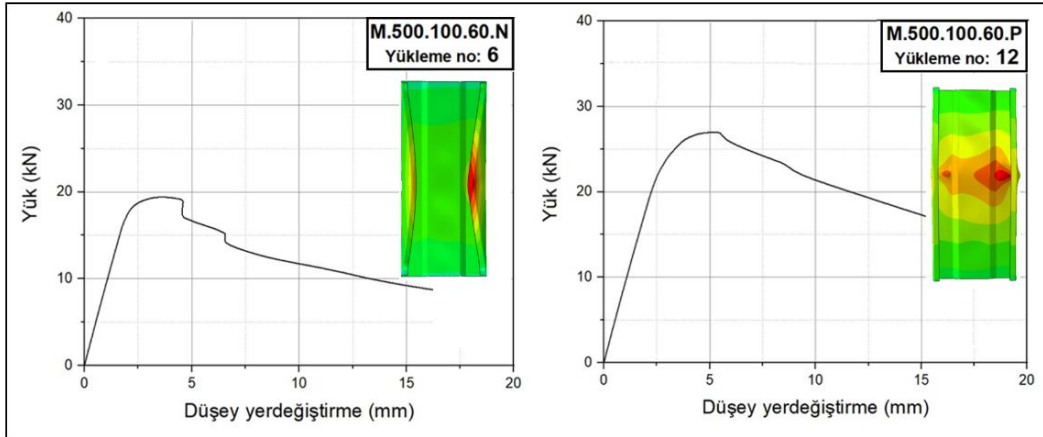
şekil 119. M.500.50.90 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

Aşağıdaki şekil 120’de ise 100 mm eksantrik yüklü yalnızca zayıf eksen eğilmesi altındaki (dudaklar basınç kuvveti altında) M.500.100.0.N numunesinin şekildeğiştirme görüntüsü ve yük-yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir. şekilde görüldüğü gibi yalnızca her iki flanşta yerel burkulma gözlemlenmiştir. Yine şekil 120’de 100 mm eksantrik yüklü yalnızca zayıf eksen eğilmesi altındaki (dudaklar çekme kuvveti altında) M.500.100.0.P numunesinin şekildeğiştirme görüntüsü ve yük-yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir. Gövdede oluşan basınç gerilme durumu sonucunda hafif çelik sigma profilin gövdesinde oluşan yerel burkulma şekilde açıkça görülmektedir.



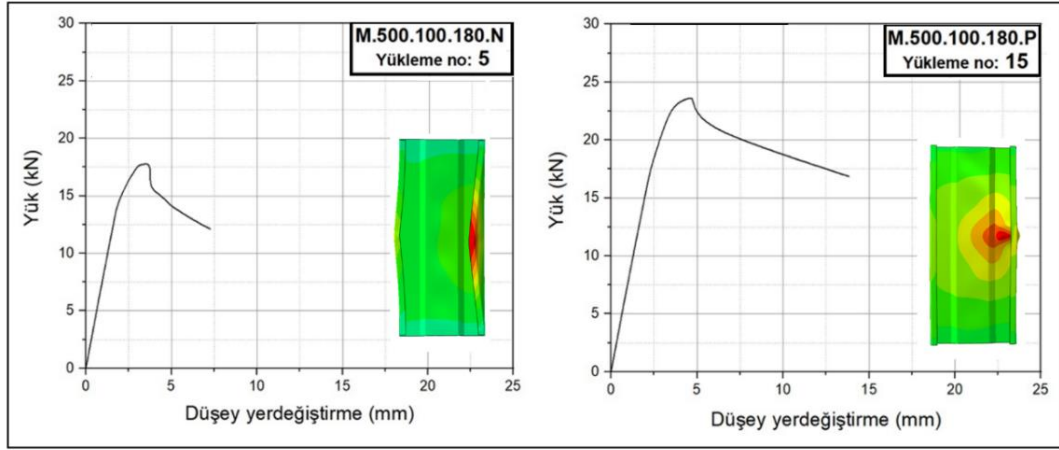
Şekil 120. M.500.100.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

M.500.100.60 N ve P numunelerine ait analizlerden elde edilen burkulma ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 121’de verilmektedir. Profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.60.N numunesinin dudaklarında oluşan basınç gerilme dağılımı altında dudaklarda yükleme doğrultusunda yerel burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme kuvveti altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.60.P numunesinin benzer durumdaki olduğu diğer numunelerdeki gibi, oluşan basınç gerilmesi neticesinde gövdede belirgin olarak yerel burkulma oluşmuştur.



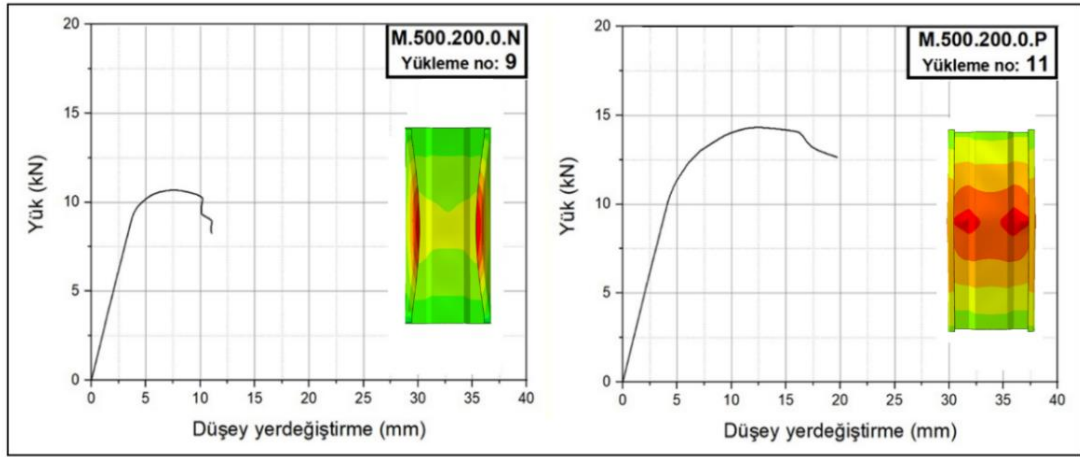
Şekil 121. M.500.100.60 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

M.500.100.180 N ve P numunelerine ait analizlerden elde edilen burkulma ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 122’de verilmektedir. Profil dudaklarının basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.180.N numunesine oluşan basınç gerilme dağılımı altında dudaklarda yükleme doğrultusunda yerel burkulma meydana gelmiştir. Dudakların basınç altında olduğu ve bileşik eğilme momenti etkilerinin görüldüğü M.500.100.180.P numunesinde ise, dudakların çekme gerilme dağılımına maruz kaldığı diğer numunelere benzer olarak, gövdede yerel burkulma meydana gelmiştir.



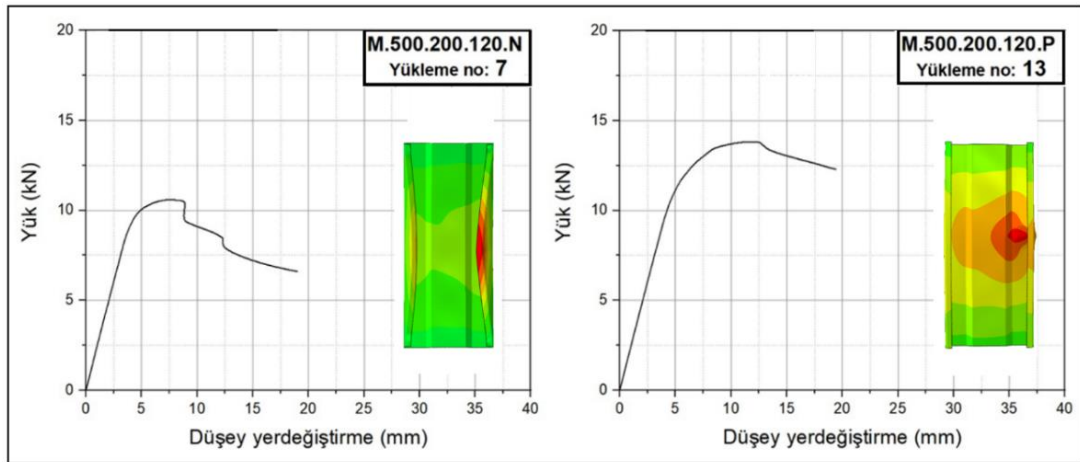
şekil 122. M.500.100.180 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

M.500.200.0 N ve P numunelerine ait analizlerden elde edilen burkulma ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 123’te verilmektedir. Yalnız zayıf eksen eğilmesi etkisinde yüklenen M.500.200.0.N numunesinde dudaklarda oluşan basınç gerilmesi nedeniyle yerel burkulma gözlemlenmiştir. Eksenel yük ve zayıf eksen eğilmesi altındaki M.500.200.0.P numunesinin gövdesinin basınç, dudakların ise çekme gerilmesi altında bulunduğu bu yükleme durumunda şekilde görüldüğü gibi gövdede yerel burkulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 123. M.500.200.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

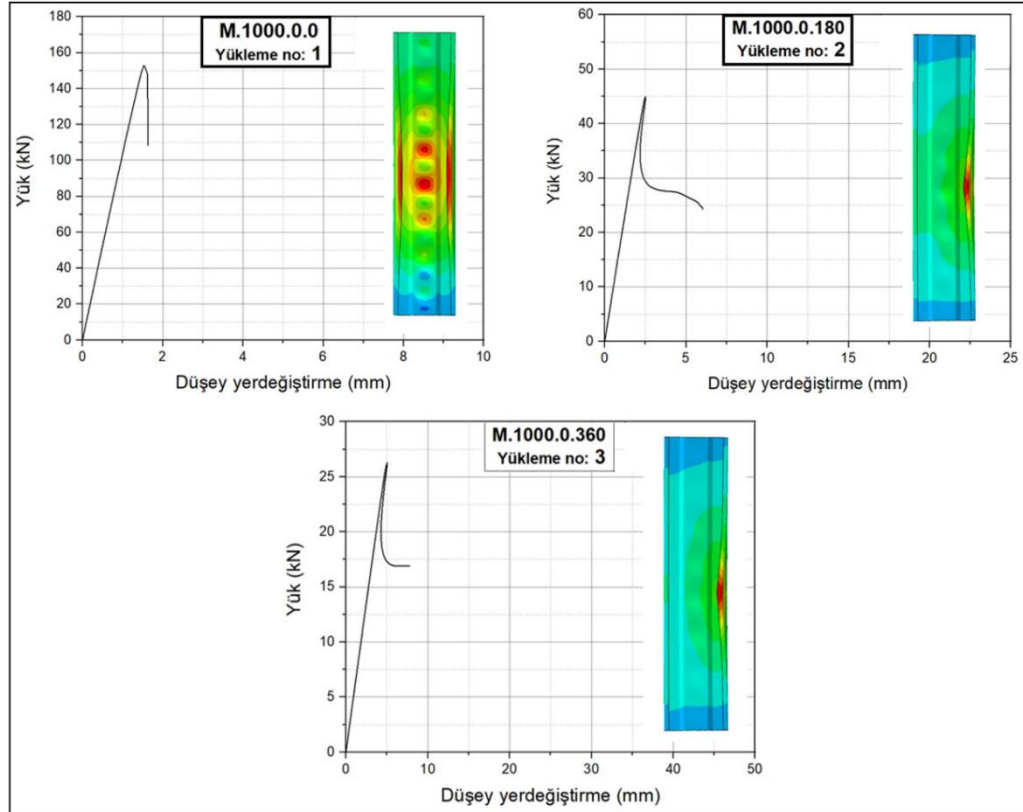
M.500.200.120 N ve P numunelerine ait analizlerden elde edilen burkulma ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 124’te verilmektedir. Dudaklarda basınç gerilmesi meydana getiren ve bileşik eğilme durumu oluşturan en büyük eksantrisitenin uygulandığı M.500.200.120.N numunesinde oluşan basınç gerilme dağılımı nedeniyle dudaklarda ortaya çıkan yerel burkulma şeklinde görülmektedir. M.500.200.120.P deney numunesinde ise, gövde basınç, dudaklar çekme gerilmesine maruz kaldığından, bu yükleme durumunda yerel burkulma yalnızca gövdede meydana gelmiştir.



Şekil 124. M.500.200.120 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

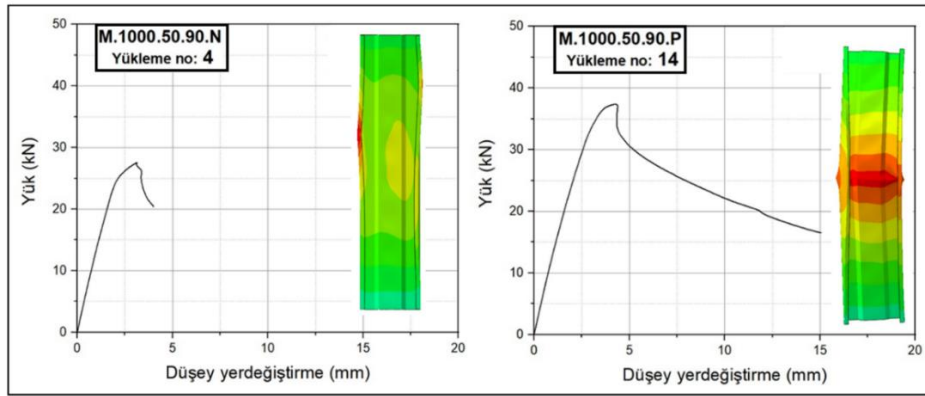
3.4.2. L=1000 mm'lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları

Profillerdeki çarpılmalı burkulmaların gözlemlenebilmesi için seçilen 1000 mm boyundaki hafif çelik sigma profiller üzerinde gerçekleştirilen toplam 15 adet monotonik yükleme deneyine tabi tutulan numunelerin sonlu eleman analizi sonuçları aşağıda verilmektedir. M.1000.0.0, M.1000.0.180 ve M.1000.0.360 numunelerinin burkulma şekli ve monotonik yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 125'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi M.1000.0.0 numunesinin flanşlarında çarpılma burkulması gözlemlenmiştir. Kuvvetli eksen doğrultusunda 180 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1000.0.180 numunesinin orta bölgesinde flanşın içe döndüğü çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. Kuvvetli eksen doğrultusunda 360 mm eksantrik yüklü, aksenal yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1000.0.360 numunesinde şekildeğiştirme numunenin orta bölgesinde flanşın içe döndüğü çarpılma burkulma şeklinde meydana gelmiştir.



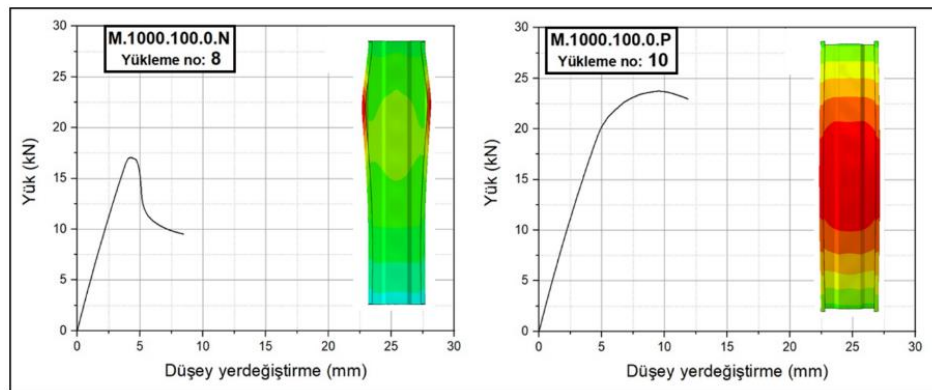
Şekil 125. M.1000.0.0, M.1000.0.180 ve M.1000.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizi sonuçları

M.1000.50.90 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görüntü ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 126’da verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.50.90.N numunesinde, yüklemenin yapıldığı uca yakın bölgedeki flanşın dışa dönmesi şeklinde ortaya çıkan çarpılmalı burkulma görölmektedir. Aynı şekilde sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.50.90.P numunesinin orta bölgesinde oluşan gövdenin yerel burkulması görölmektedir.



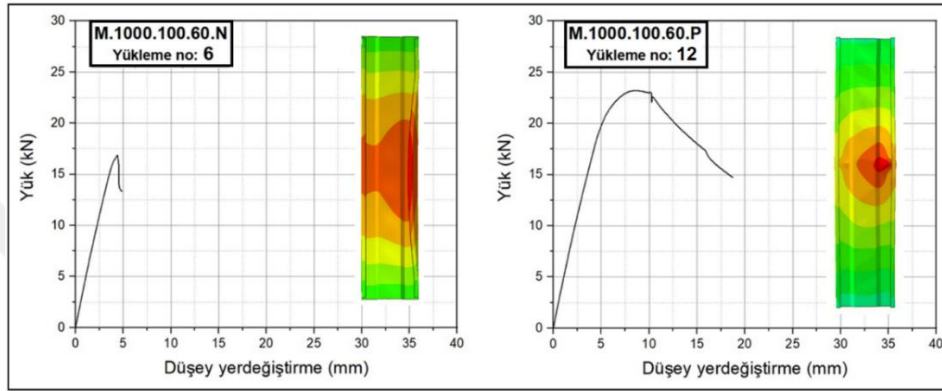
Şekil 126. M.1000.50.90 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

M.1000.100.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 127’de verilmektedir. Yalnızca zayıf eksen eğilmesinin incelendiği ve profilin dudaklarında basınç gerilmesinin oluştuğu M.1000.100.0.N numunesinin flanşlarının dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpılmalı burkulma görölmektedir. Aynı şekilde, yalnızca zayıf eksen eğilmesinin incelendiği ve profilin dudaklarında çekme gerilmesinin oluştuğu M.1000.100.0.P numunesinin zayıf eksen etrafında oluşan genel burkulma görölmektedir.



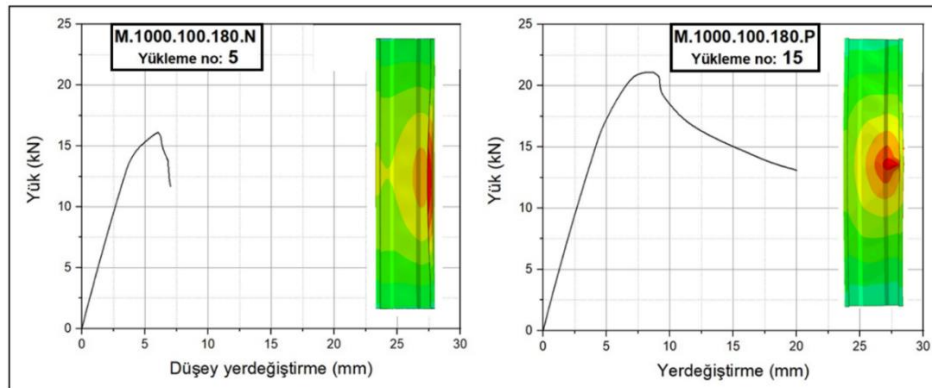
Şekil 127. M.1000.100.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

M.1000.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 128’de verilmektedir. şekilde, sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.100.60.N numunesinin flanşının içeri doğru dñmesiyle oluşan çarpılmalı burkulma gñr÷lmektedir. Profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.100.60.P numunesinin basınç altındaki orta bñlgesinde oluşan gñvdenin yerel burkulması gñr÷lmektedir.



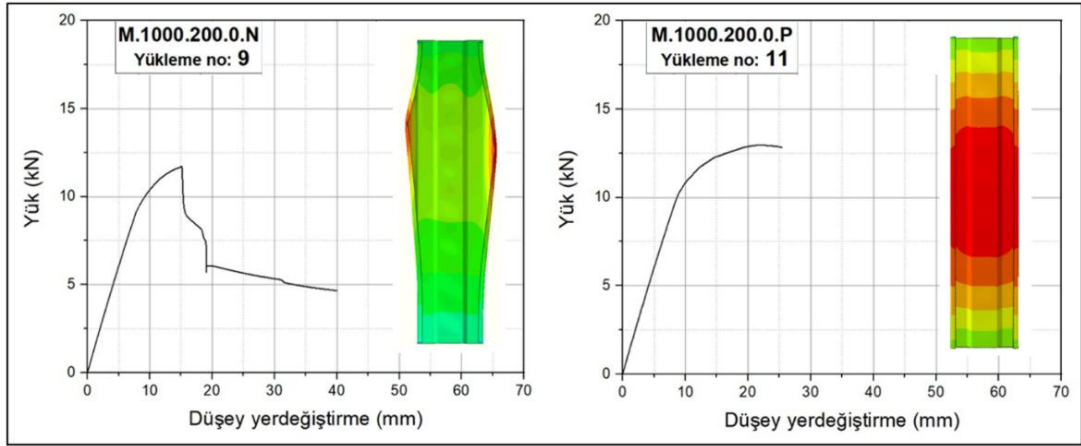
şekil 128. M.1000.100.60 numunelerinin monotonic sonlu eleman analizi sonucu

M.1000.100.180 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 129’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.100.180.N numunesinin flanşının içeri dñmesiyle oluşan çarpılmalı burkulma gñr÷lmektedir. Profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.100.180.P numunesinin orta bñlgesinde, kuvvetli eksen yñn÷ndeki eksantrik y÷k÷n uygulandığı yñnde gñvdede oluşan yerel burkulma gñr÷lmektedir.



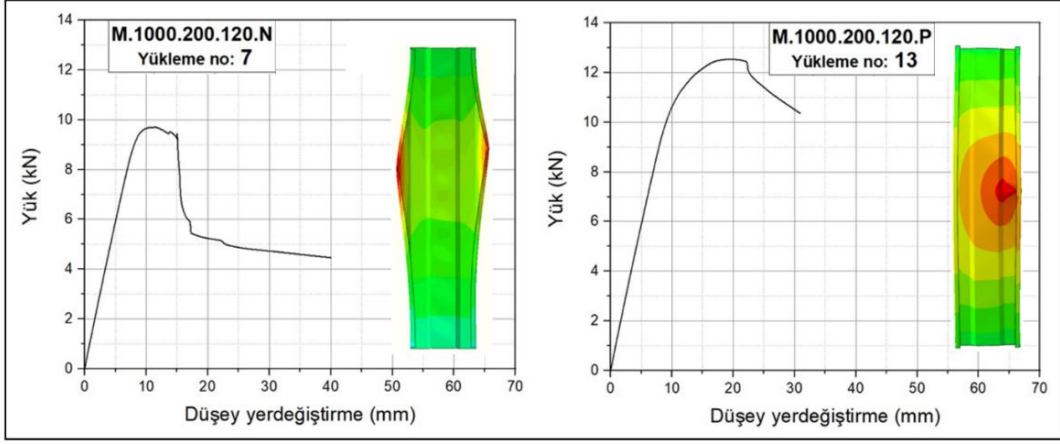
şekil 129. M.1000.100.180 numunelerinin monotonic sonlu eleman analizi sonucu

Eksenel yük ve yalnız zayıf eksen eğilmesi etkisinde yüklenen M.1000.200.0.N ve P numunelerinin analizinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ile şekildeğiştirmiş görünümleri Şekil 130’de verilmektedir. M.1000.200.0.N’de profilin flanşlarında, eksantrik yükleme nedeniyle oluşan basınç gerilmesi altında flanşların dışa dönmesiyle çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. Profil dudaklarının çekme gerilmesine maruz kaldığı M.1000.200.0.P’de ise gövdede oluşan basınç gerilme dağılımı nedeniyle genel burkulma oluşmuştur.



Şekil 130. M.1000.200.0 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

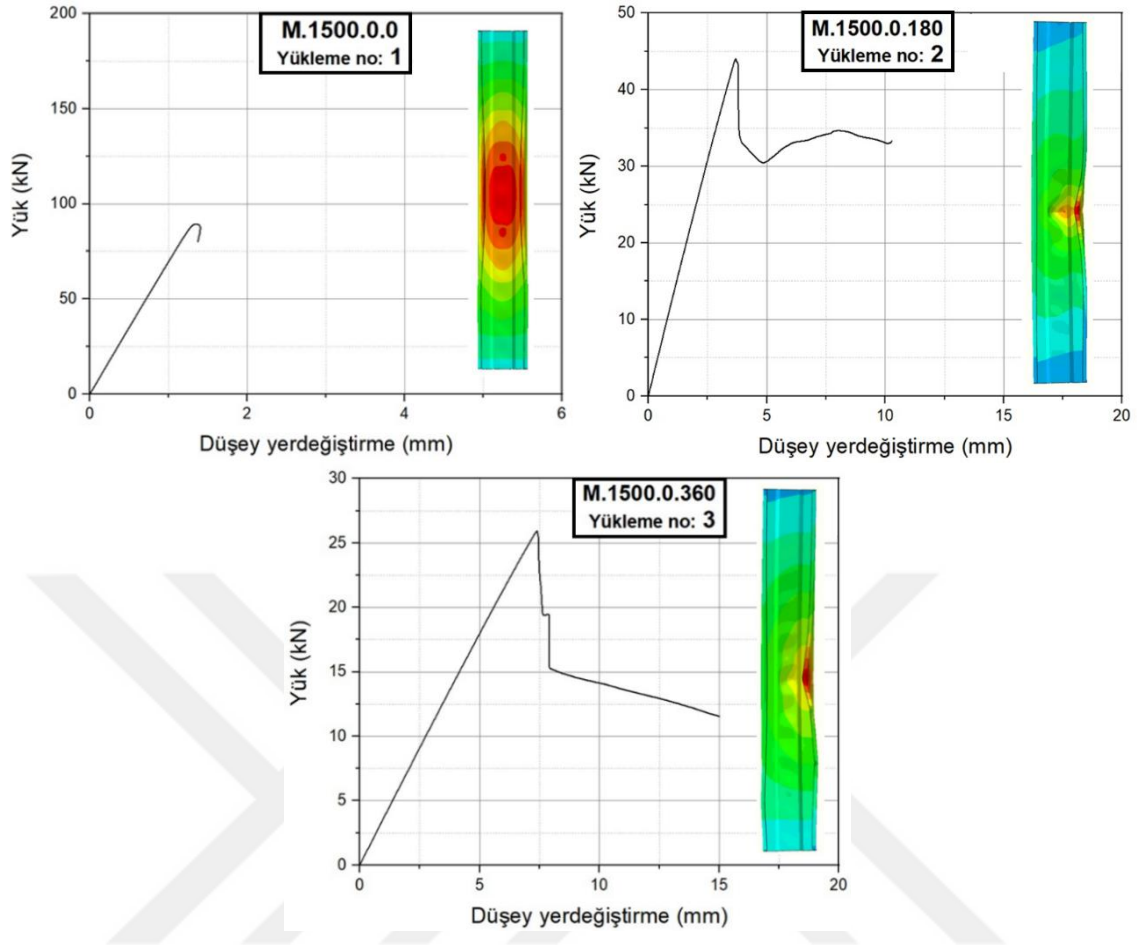
M.1000.200.120 N ve P numunelerine ait deney sonrası görüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 131’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1000.200.120.N numunesinin flanşlarının dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpılmalı burkulma görülmektedir. Aynı şekilde, sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1000.200.120.P numunesinin orta bölgesinde, kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 131. M.1000.200.120 numunelerinin monotonik sonlu eleman analizi sonucu

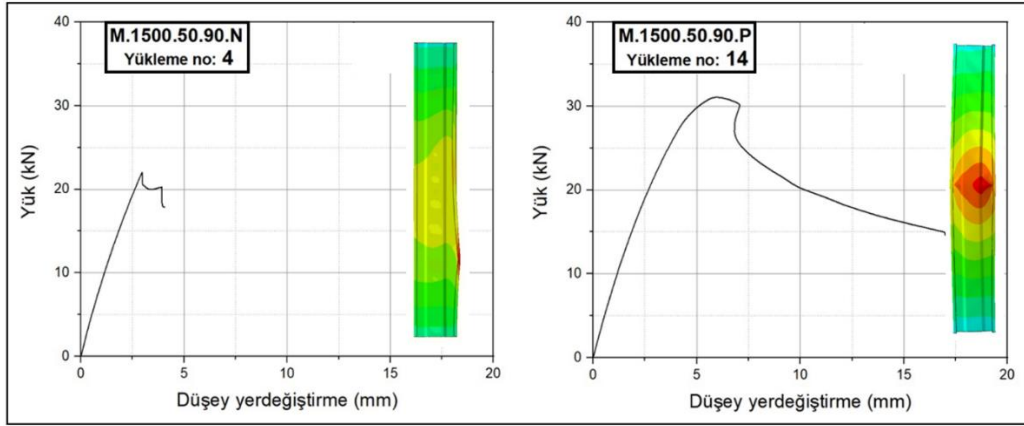
3.4.3 L=1500 mm’lik Numunelerin Monotonik Analiz Sonuçları

Genel burkulmanın gözlemlenebilmesi için seçilen 1500 mm boyundaki hafif çelik sigma profiller üzerinde gerçekleştirilen toplam 15 adet monotonik yükleme analizinin burkulma görünüşleri ve yük-yerdeğiştirme eğrileri bu başlık altında verilmiştir. M.1500.0.0, M.1500.0.180 ve M.1500.0.360 numunelerinin analiz sonuçlarına ait burkulma şekli ve monotonik yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 132’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi M.1500.0.0 numunesinin flanşlarının içe dönmesiyle çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir ve burkulmanın oluşumuyla birlikte yük taşıma kapasitesinin hızlı bir şekilde düştüğü gözlemlenmiştir. Kuvvetli eksen doğrultusunda 180 mm eksantrik yüklü, eksenel yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1500.0.180 numunesinin flanşında yerel burkulma oluşmuştur. Kuvvetli eksen doğrultusunda 360 mm eksantrik yüklü, eksenel yük ve kuvvetli eksen eğilmesinin incelendiği M.1500.0.360 burkulma numunesinin orta bölgesinde flanşta yerel burkulma meydana gelmiştir.



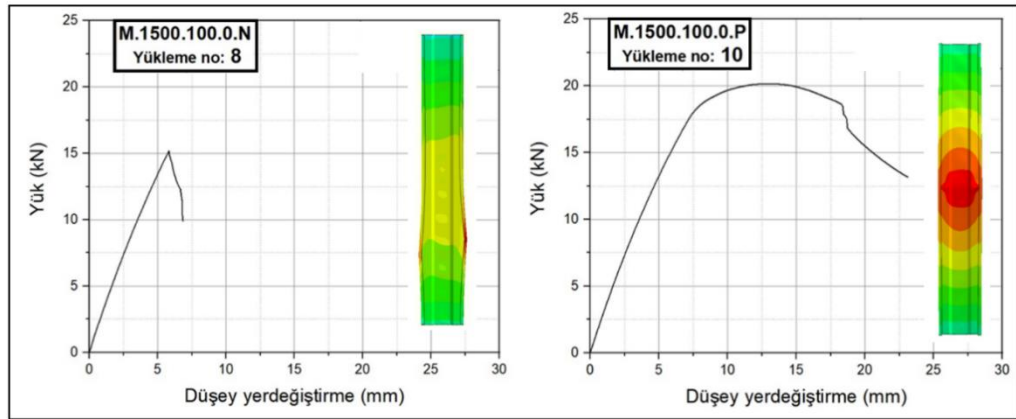
Şekil 132. M.1500.0.0, M.1500.0.180 ve M.1500.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizi sonuçları

M.1500.50.90 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 133'te verilmektedir. Profil dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.50.90.N numunesinin alt mesnete yakın bölgesinde flanşın dışa dönmesi şeklinde ortaya çıkan burkulma görülmektedir. Aynı şekilde, profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.50.90.P numunesinin flanşlarının dışarı doğru dönmesiyle oluşan çarpılmalı burkulma ve numunenin gövdesinde oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 133. M.1500.50.90 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

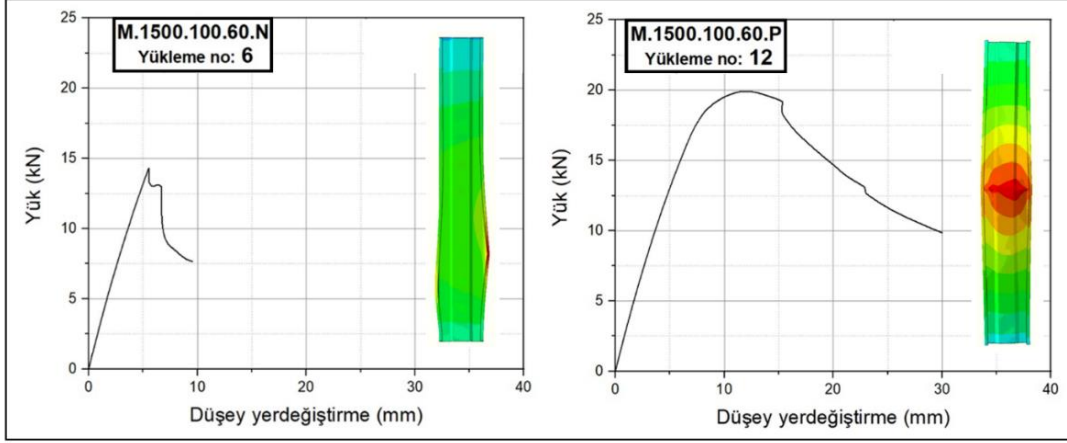
M.1500.100.0 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 134’te verilmektedir. Yalnız zayıf eksen eğilmesinin incelendiği ve profilin dudaklarında basınç gerilmesinin olduğu M.1500.100.0.N numunesinin alt mesnete yakın bölgesinde profilin flanşlarının dışarı doğru dönmesi şeklinde oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Profil dudaklarında çekme gerilmesinin olduğu M.1500.100.0.P’nin analizinde profilin gövdesinde, genel burkulma sonrasında oluşan yerel burkulma görülmektedir.



Şekil 134. M.1500.100.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

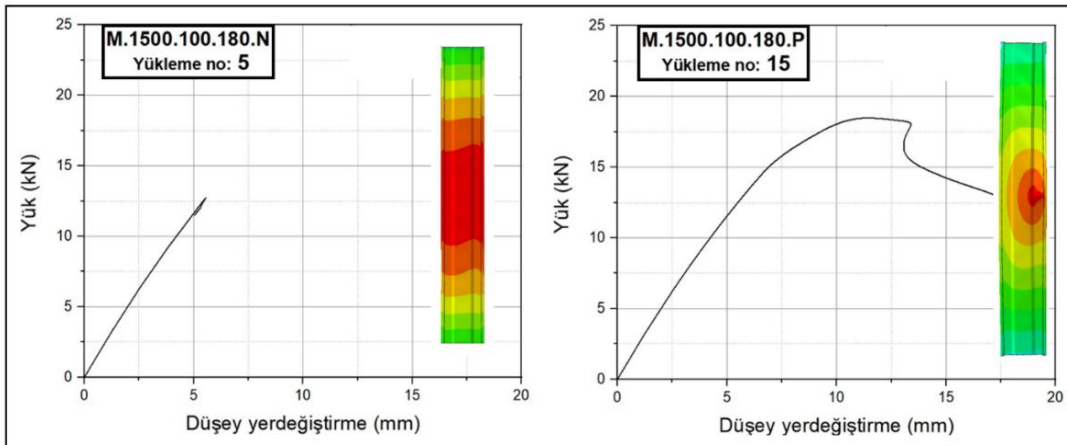
M.1500.100.60 N ve P numunelerine ait deney sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 135’te verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.100.60.N alt ucuna yakın bölgede profilin flanşlarının dışarı doğru

dönmesiyle oluşan çarpımalı burkulma görülmektedir. Aynı şekilde, sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.100.60.P orta bölgesinde oluşan genel burkulma ve ardından gövdede oluşan yerel burkulma görülmektedir



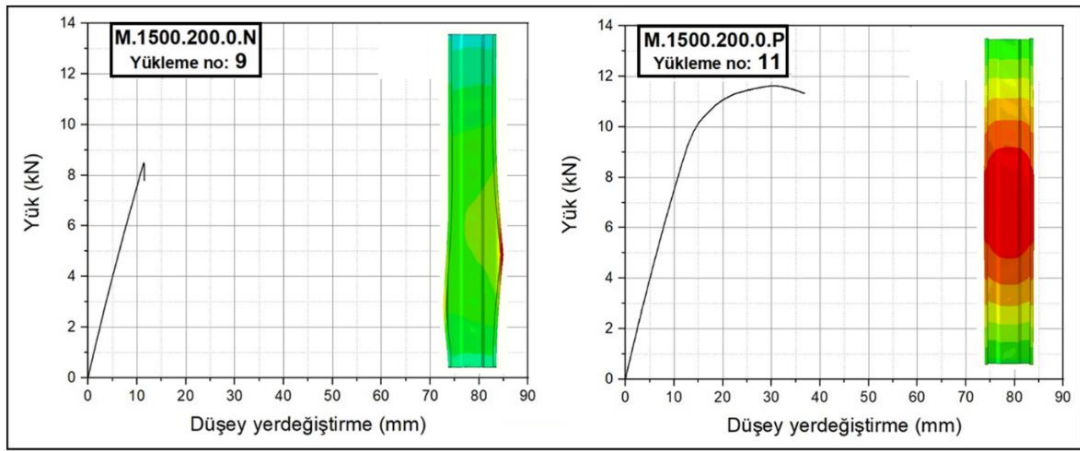
Şekil 135. M.1500.100.60 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

M.1500.100.180.N ve P numunelerinin analizinden elde edilen yük-yerdeğiştirme davranışı ve burkulma durumu Şekil 136’da verilmektedir. Profil dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu M.1500.100.180.N analizinde profilin gövdesinde yerel burkulma oluşmuştur. Profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu M.1500.100.180.P’nin orta bölgesinde kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede yerel burkulma oluşmuştur.



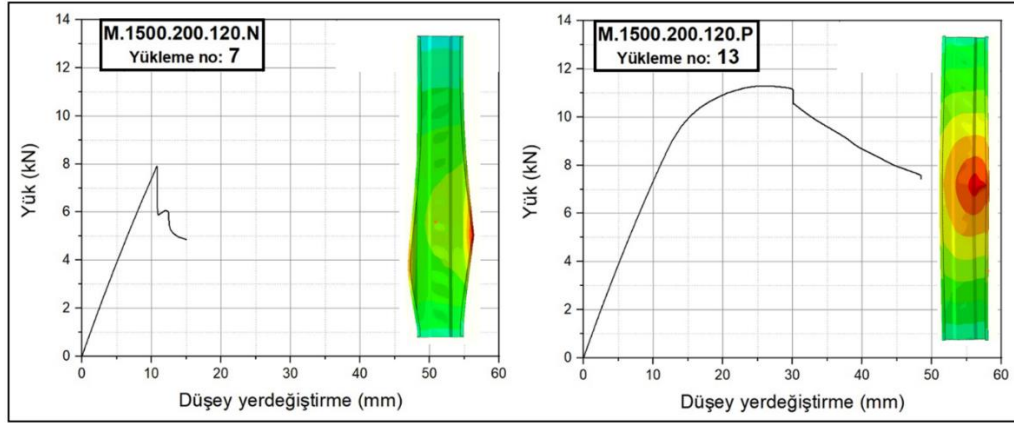
Şekil 136. M.1500.100.180 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

M.1500.200.0.N ve P numunelerinin analizinden elde edilen yük-yerdeğiştirme davranışı ve burkulma durumu şekil 137’de verilmektedir. Yalnızca zayıf eksen eğilmesi etkisinde yüklenen M.1500.200.0.N numunesinin flanşında alt mesnete daha yakın bir bölgede, eksantrik yükleme nedeniyle oluşan basınç gerilmesi altında çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. Aynı şekilde, profil dudaklarının çekme gerilmesine maruz kaldığı eksenel yük ve zayıf eksen eğilmesi altındaki burkulma davranışı gözlemlenen M-1500-200-0-P numunesinin gövdesinde oluşan basınç gerilmesi dağılımı nedeniyle genel burkulma oluştuğı şekilde görölmektedir.



şekil 137. M.1500.200.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

M.1500.200.120.N ve P numunelerinin analizinden elde edilen yük-yerdeğiştirme davranışı ve burkulma durumu şekil 138’de verilmektedir. Sigma profilin dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğı M.1500.200.120.N numunesinin flanşında alt mesnete daha yakın bir bölgede oluşan çarpılmalı burkulma görölmektedir. Aynı şekilde, sigma profilin dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğı M.1500.200.120.P numunesinin zayıf eksen etrafında oluşan genel burkulmayla birlikte numunenin orta bölgesinde, kuvvetli eksen yönündeki eksantrik yükün uygulandığı yönde gövdede oluşan yerel burkulma da görölmektedir.



Şekil 138. M.1500.200.120 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

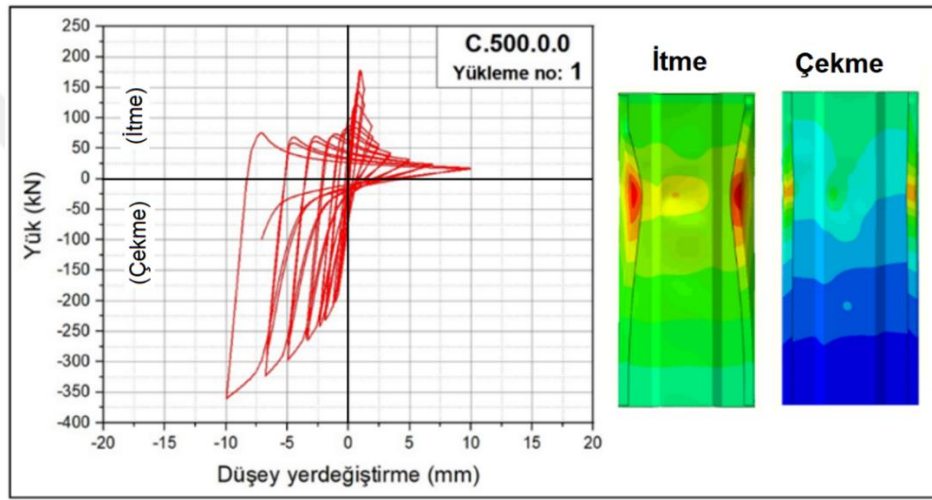
3.5. Tersinir-Tekrarlı Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

Yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarını ayrı ayrı gösterecek şekilde seçilmiş olan sigma numunelerin eksenel ve eksantrik yük altındaki enerji sönümleme, rijitlik kaybı ve süneklik davranışlarını incelemek amacıyla $L= 500$ mm, 1000 mm ve 1500 mm boylarındaki 45 adet sigma profil modeli üzerinde tersinir-tekrarlı yükleme altında sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlere ait en büyük itme ve en büyük çekme yerdeğiştirmeleri altında oluşan burkulma şekilleri ve tersinir tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrileri sırasıyla bu başlık altında verilmektedir. Şekillerdeki ilk burkulma itme, ikinci burkulma ise çekme altında oluşmuştur.

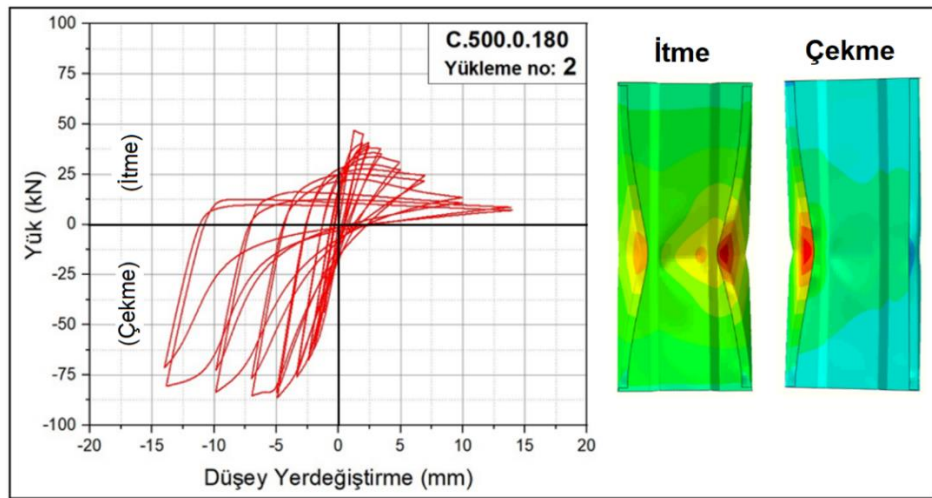
3.5.1. $L=500$ mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları

Yerel burkulmanın gözlemleneceği $L=500$ mm boyundaki 15 adet sigma profil numuneleri üzerinde gerçekleştirilen tersinir-tekrarlı analizler sonrasında en büyük çekme ve en büyük itme yerdeğiştirmeleri altında oluşan burkulma şekilleri ve tersinir tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrileri aşağıda verilmektedir. C.500.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı Şekil 139'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi burkulmalar flanşlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlı bir şekilde azalmıştır, buna karşın çekme bölgesindeki yük taşıma kapasitesi artmıştır.

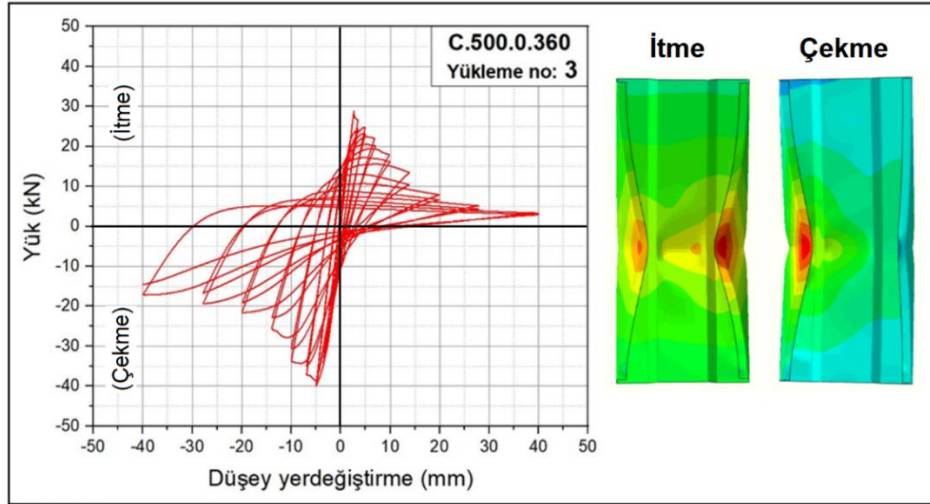
Süneklik ve rijitlik de çekme bölgesine göre oldukça fazla azalmıştır. C.500.0.180 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 140'da verilmektedir. Basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlıca azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma numunenin flanşlarında meydana gelmiştir. C.500.0.360 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 141'de verilmektedir. Bu numunenin de basınç ve çekme bölgesinin rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma C.500.0.180 numunesine benzer şekilde numunenin flanşlarında meydana gelmiştir.



Şekil 139. C.500.0.0 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu

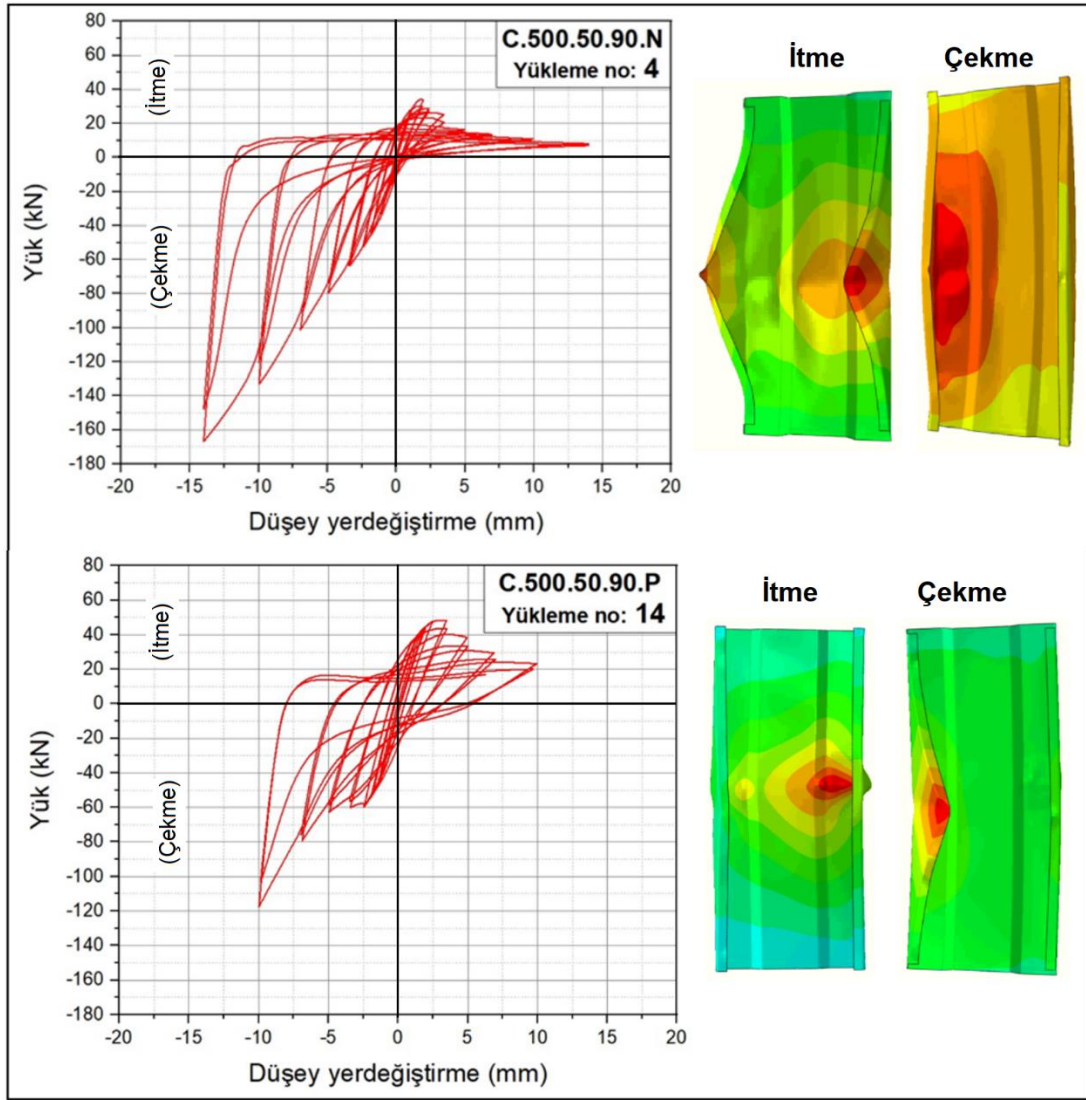


Şekil 140. C.500.0.180 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu



Şekil 141. C.500.0.360 numunesinin sonlu eleman analizi sonucu

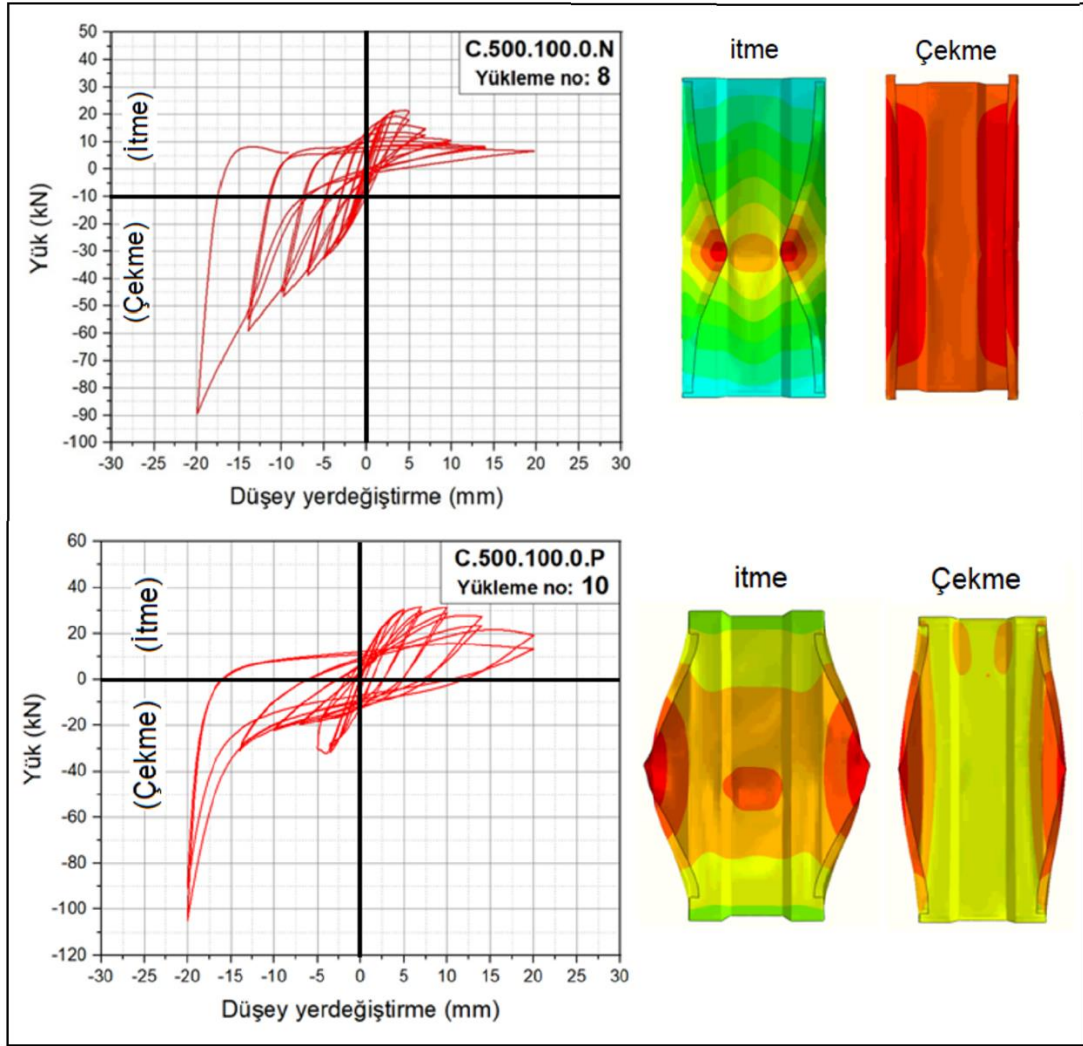
C.500.50.90 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 142’de verilmektedir. C.500.50.90.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmış ancak çekme bölgesinde kapasite artışı görülmüştür. Burkulma numunenin ortasında, yükleme yönündeki flanşta meydana gelmiştir. Benzer olarak, C.500.50.90.P numunesinde de basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır, çekme bölgesinde ise kapasite artışı olmuştur. Burkulmalar ise itmede gövdede, çekmede flanşlarda meydana gelmiştir.



Şekil 142. C.500.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.500.100.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 143’de verilmektedir. C.500.100.0.N basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma itme yüklemesinde flanşlarda çekme yüklemesinde ise gövdede meydana gelmiştir.

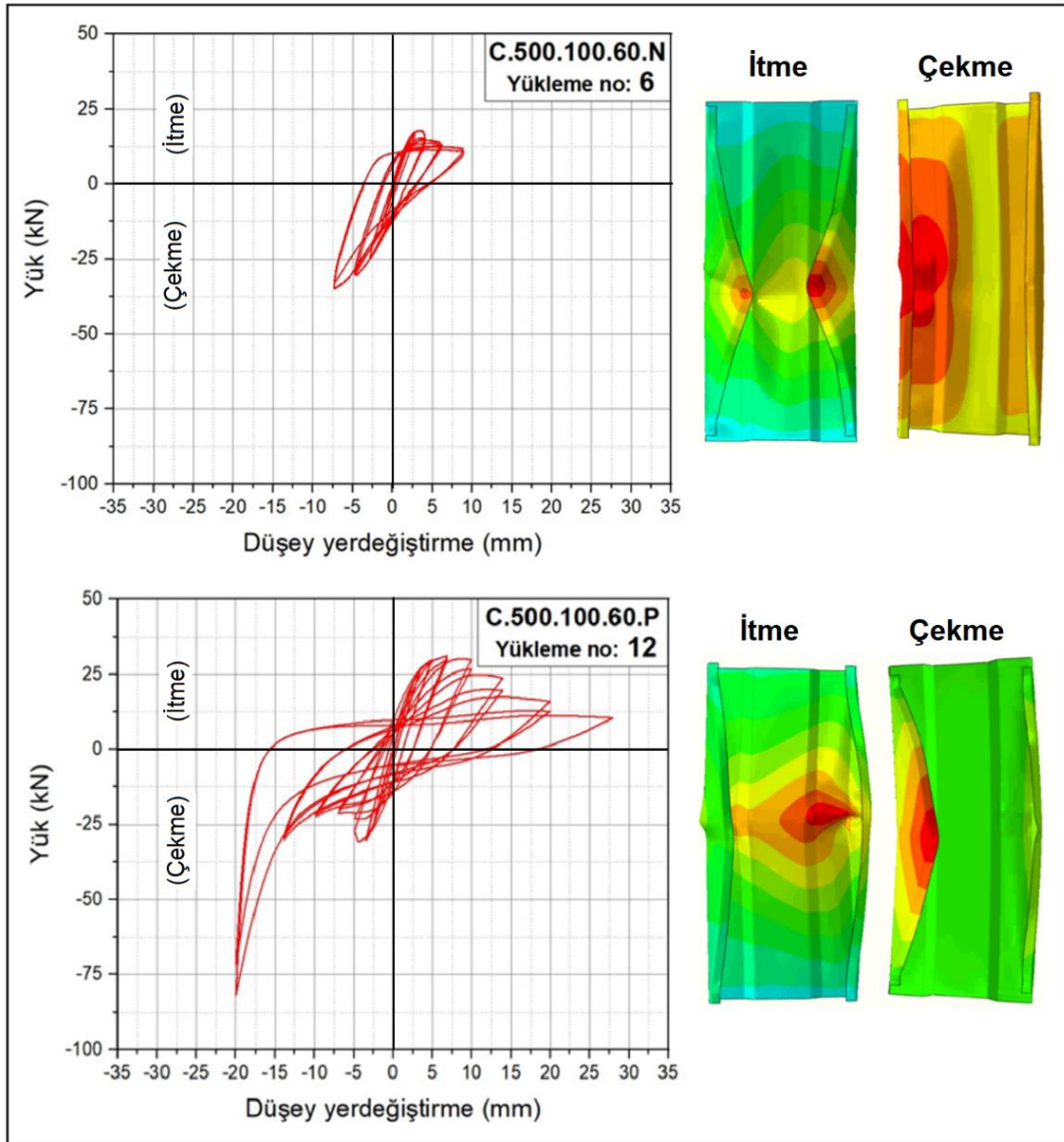
C.500.100.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesine nazaran daha sünek bir davranış görülmüştür. Ayrıca burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta meydana gelmiştir



Şekil 143. C.500.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.500.100.60 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 144'te verilmektedir. C.500.100.60.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşta meydana gelmiştir. Ayrıca, çekme yüklemesi sırasında gövde de yerel burkulma oluşmuştur.

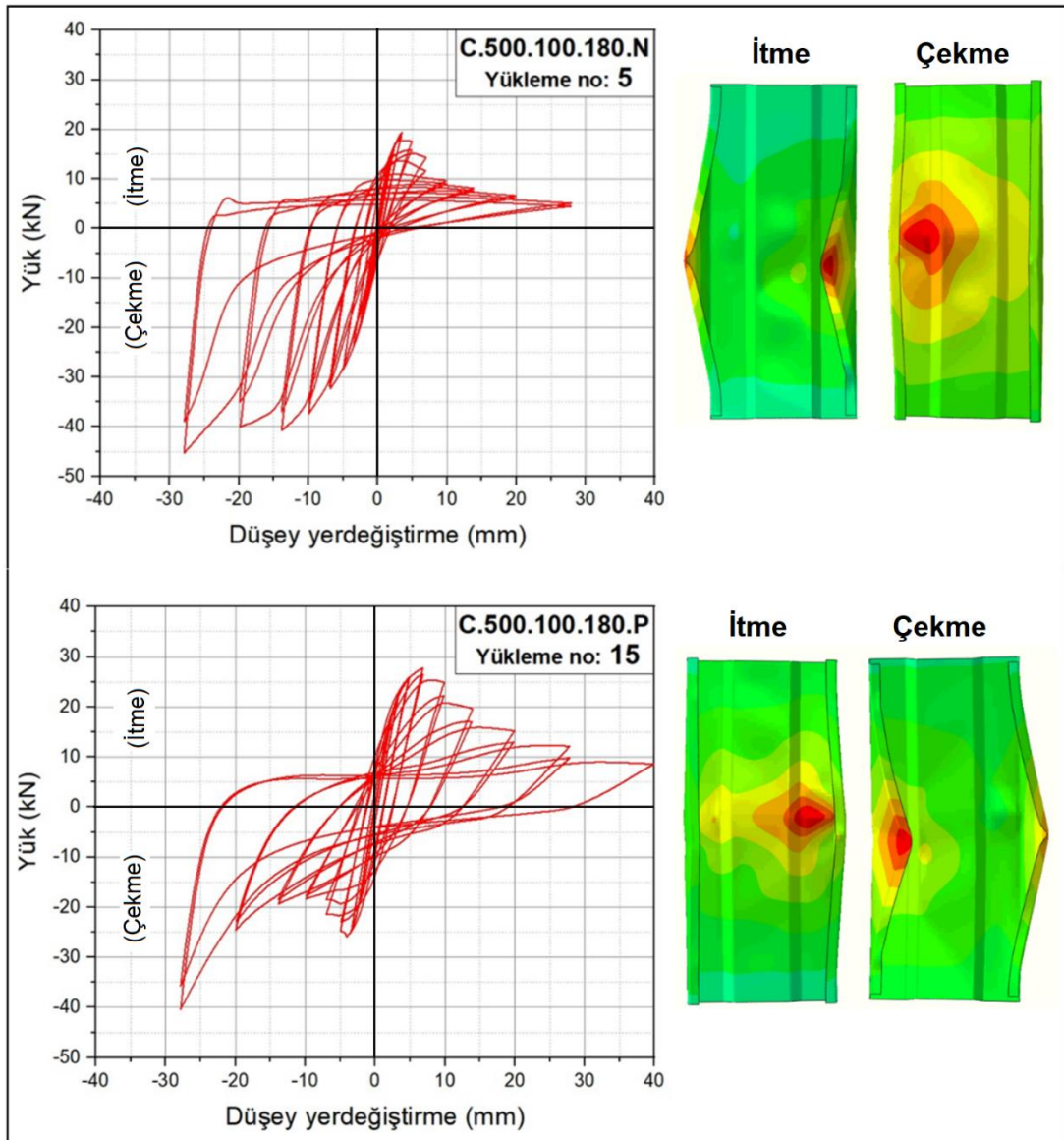
C.500.100.60.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Ayrıca burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta meydana gelmiştir. Burkulma, itme yüklemesinde gövdede çekme yüklemesinde ise flanşlarda etkili olmuştur.



Şekil 144. C.500.100.60 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.500.100.180 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 145'te verilmektedir. C.500.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma itme yüklemesinde numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşa, çekme yüklemesinde ise gövdede meydana gelmiştir.

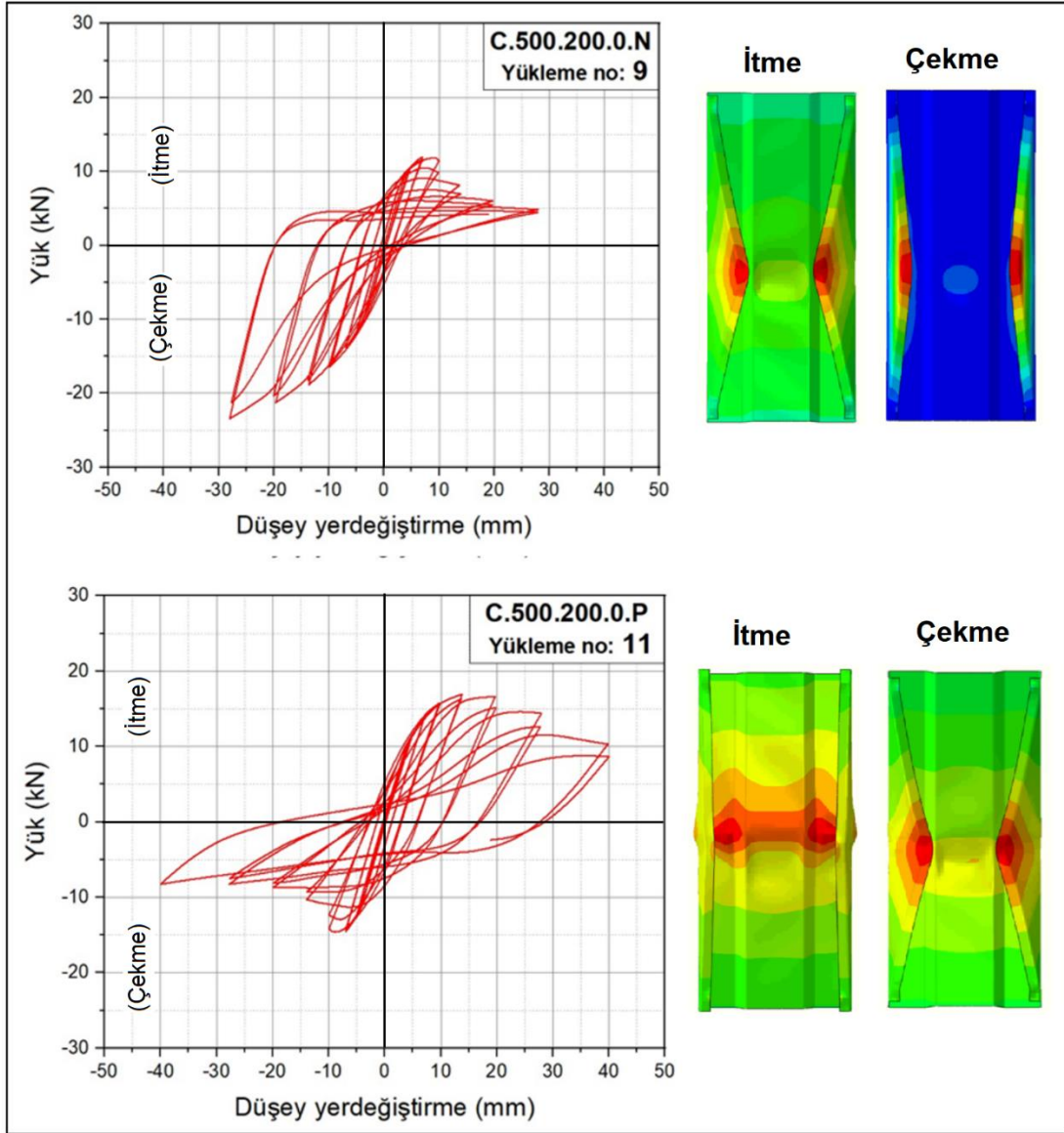
C.500.100.180.P basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma itme yüklemesinde gövdede çekme yüklemesinde ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



Şekil 145. C.500.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.500.200.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 146’da verilmektedir. C.500.200.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma itme ve çekme yüklemelerinin her ikisinde de numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta simetrik olarak meydana gelmiştir.

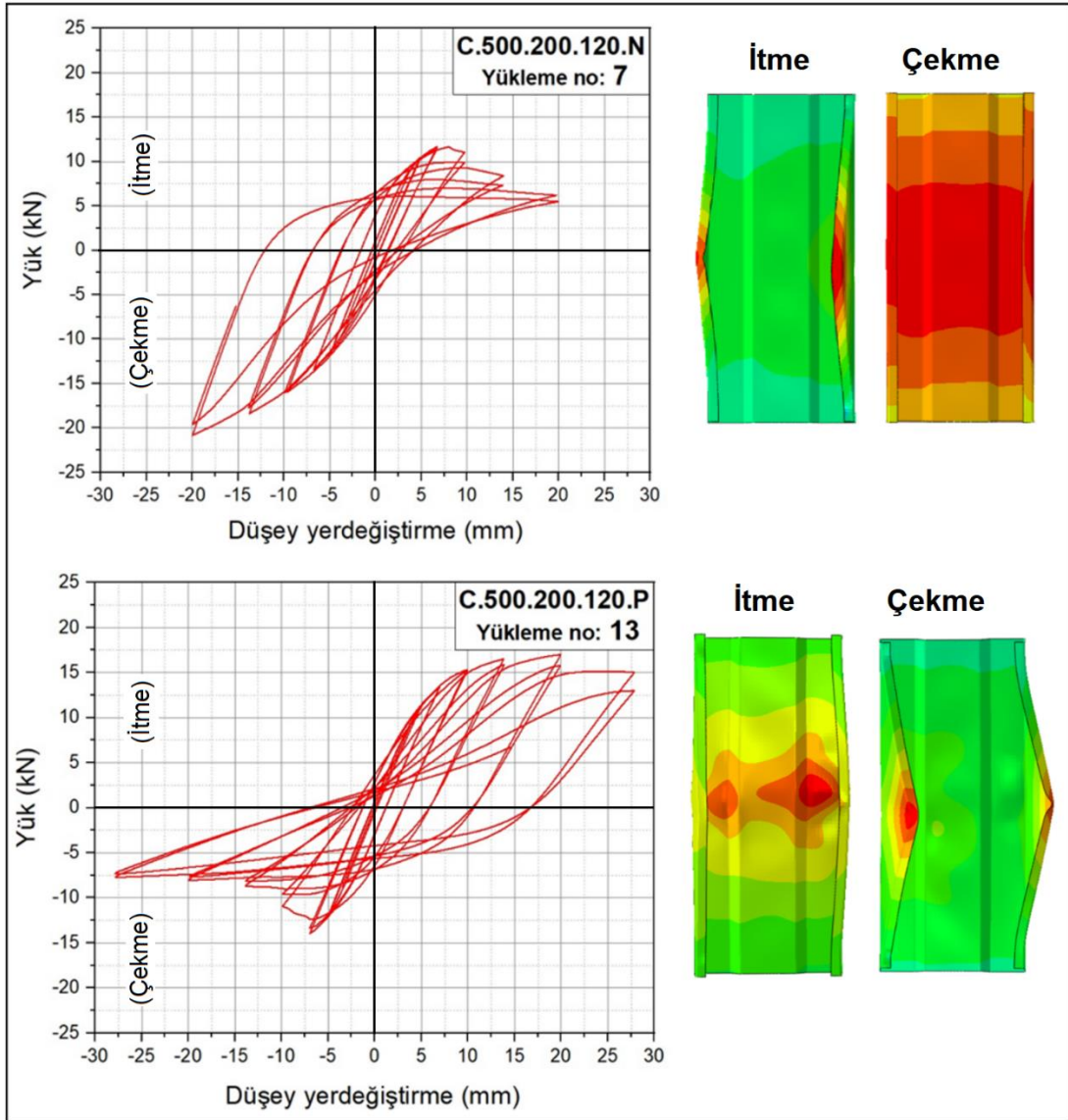
C.500.200.0.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Ayrıca burkulma itme yüklemesinde gövde de çekme yüklemesinde ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



Şekil 146. C.500.200.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.500.200.120 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 147’de verilmektedir. C.500.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma itme yüklemesinde numunenin flanşlarında meydana gelmiştir.

C.500.200.120.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma itme yüklemesinde gövdede çekme yüklemesinde ise flanşlarda etkili meydana gelmiştir.



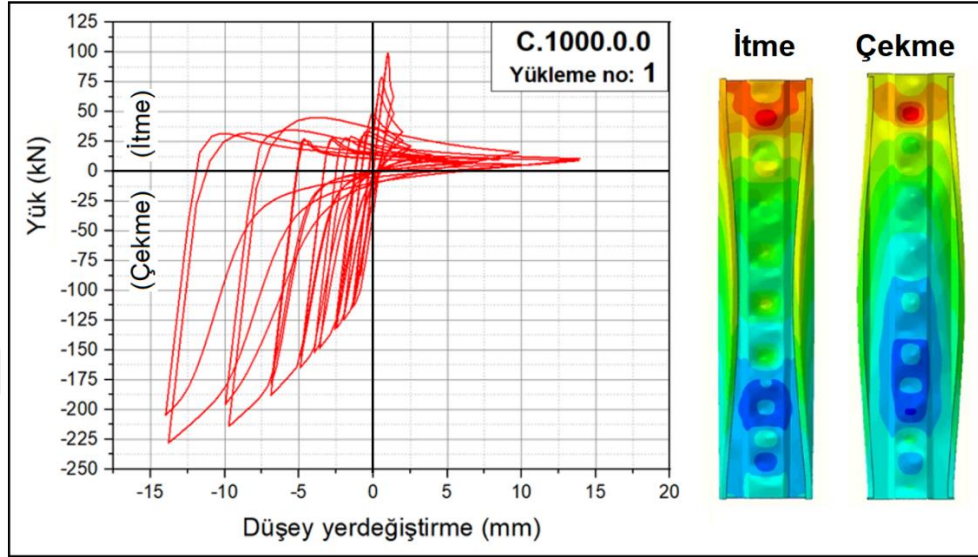
Şekil 147. C.500.200.120 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

3.5.2. L=1000 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları

Çarpılmalı burkulmanın gözlemleneceği L=1000 mm boyundaki 15 adet sigma profil numunesi üzerinde gerçekleştirilen tersinir-tekrarlı analizler sonrasında en büyük çekme ve en büyük itme yerdeğiştirmeleri altında oluşan burkulma şekilleri ve tersinir tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrileri aşağıda verilmektedir.

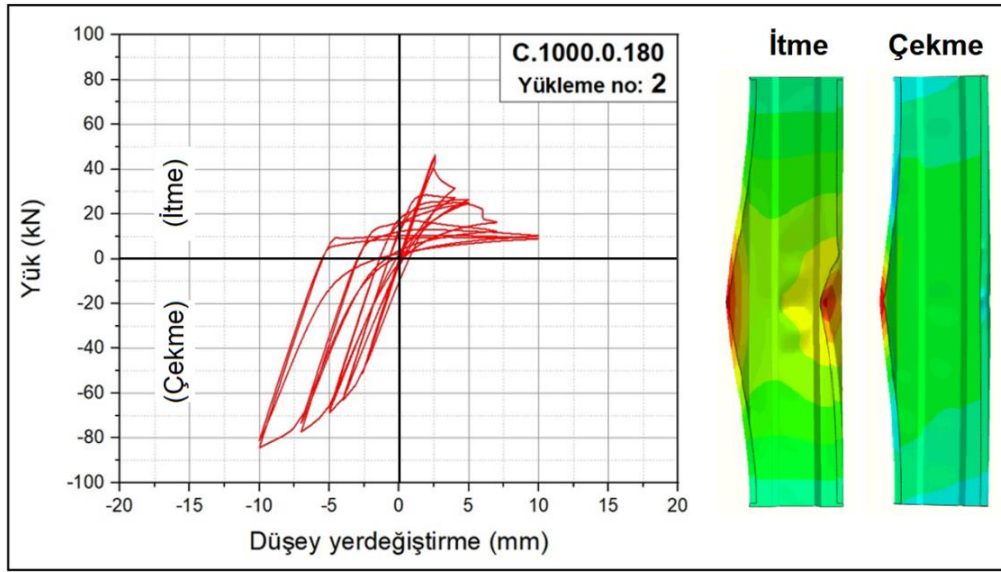
C.1000.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı Şekil 148'de verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi burkulmalar, itme ve çekme yüklemelerinin her

ikisinde de flanşlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlı bir şekilde azalmıştır, buna karşın çekme bölgesindeki yük taşıma kapasitesi artmıştır. Süneklik ve rijitlik de çekme bölgesine göre oldukça fazla azalmıştır.



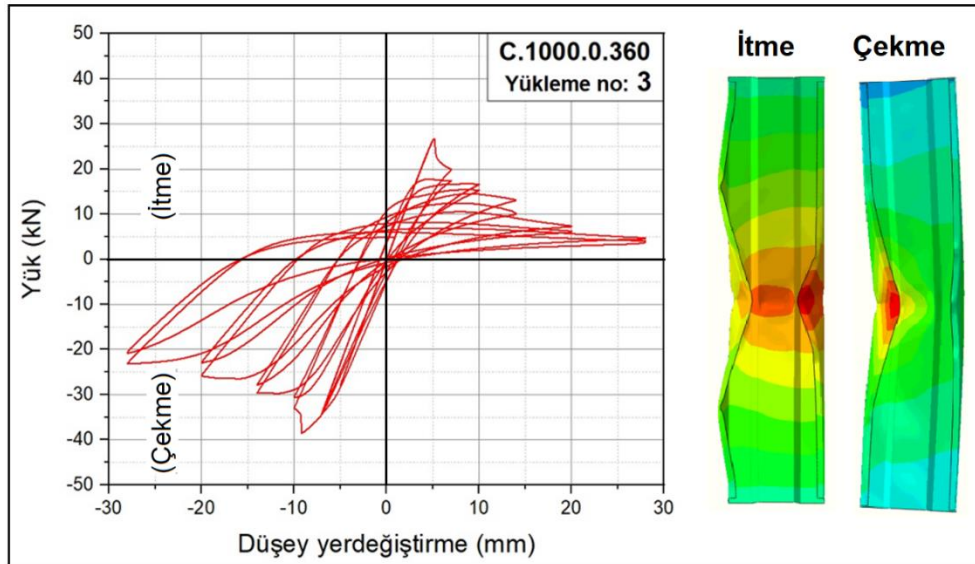
Şekil 148. C.1000.0.0 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.0.180 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 149’da verilmektedir. Basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlıca azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma itme ve çekme yüklemelerinin her ikisinde de numunenin flanşlarında meydana gelmiştir.



Şekil 149. C.1000.0.180 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

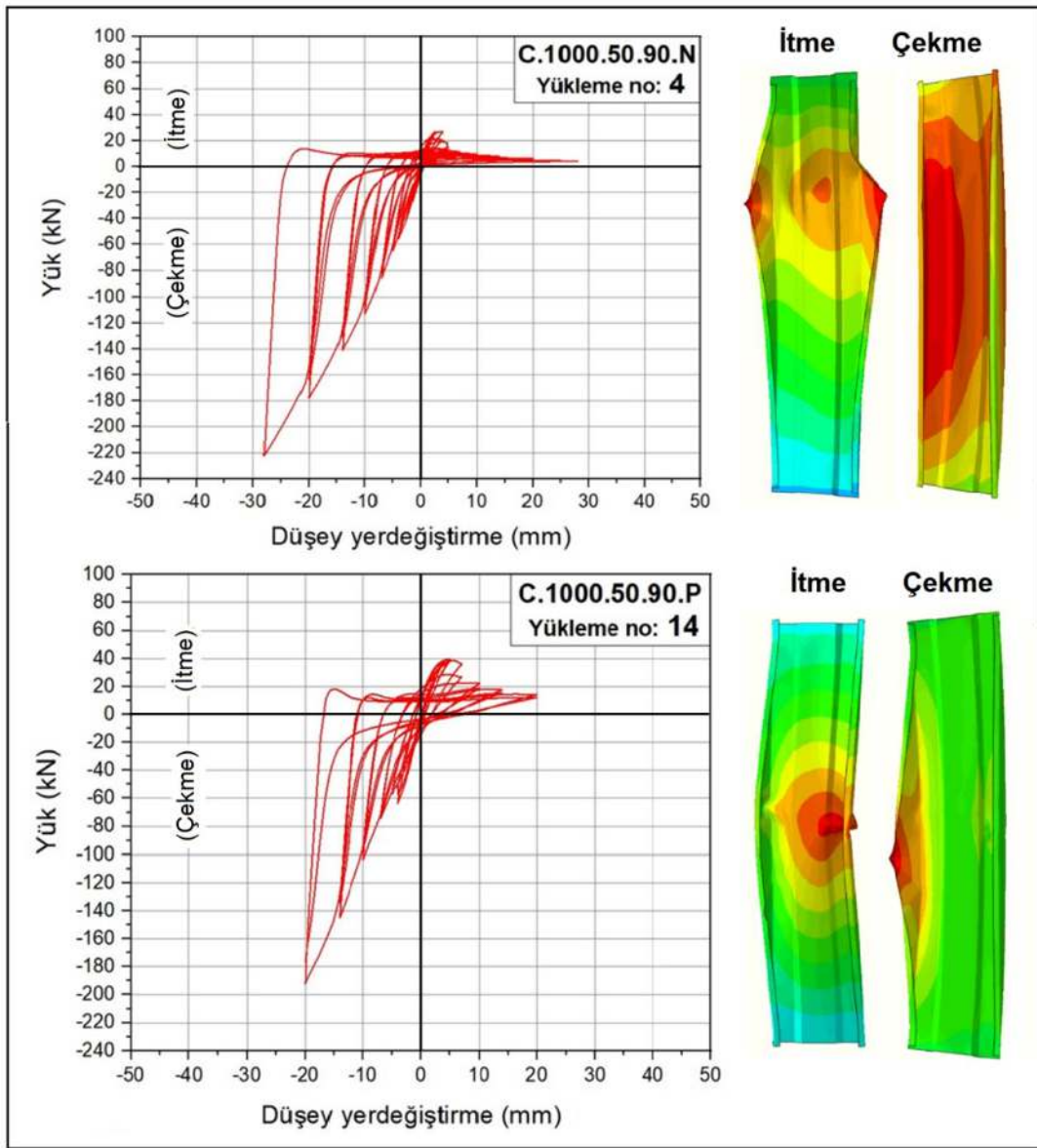
C.1000.0.360 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeğe ait yük-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 150’de verilmektedir. Bu numunenin de basınç ve çekme bölgesinin rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma C.500.0.180 numunesine benzer şekilde itme ve çekme yüklemelerinde numunenin flanşlarında meydana gelmiştir.



Şekil 150. C.1000.0.360 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.50.90 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 151’de verilmektedir. C.1000.50.90.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmış ancak çekme bölgesinde kapasite artışı görölmüştür. Burkulmalar itme yüklemesinde flanşların dışarı çekme yüklemesinde ise içeri dönmesiyle yükleme yönündeki flanşlar meydana gelmiştir.

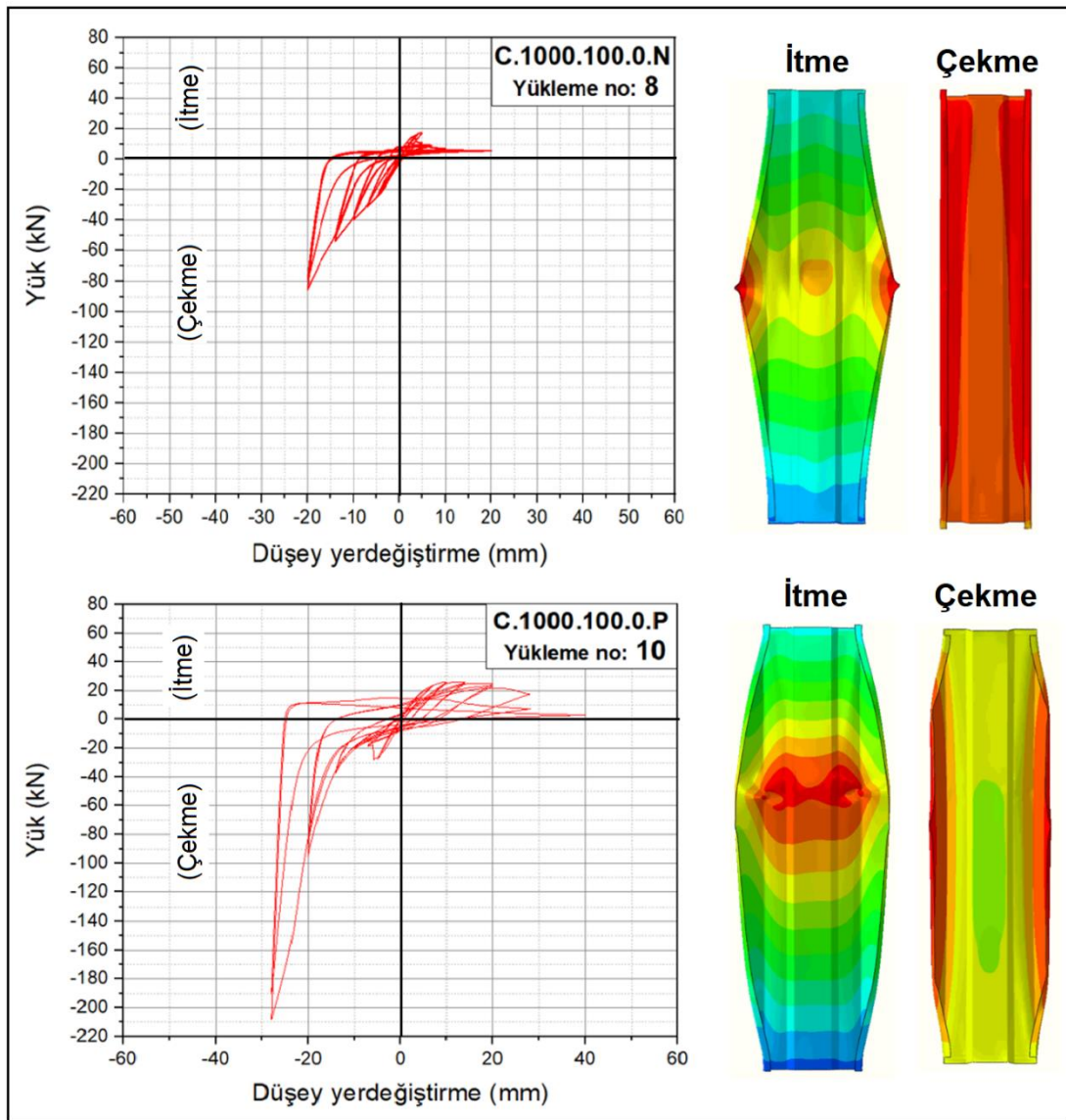
Benzer olarak, C.1000.50.90.P numunesinde de basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır, çekme bölgesinde ise kapasite artışı olmuştur. Burkulmalar ise itmede gövdede çekmede ise flanşta meydana gelmiştir.



şekil 151. C.1000.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.100.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 152’de verilmektedir. C.1000.100.0.N basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma itme yüklemesinde flanşlarda çekme yüklemesinde ise gövdede meydana gelmiştir.

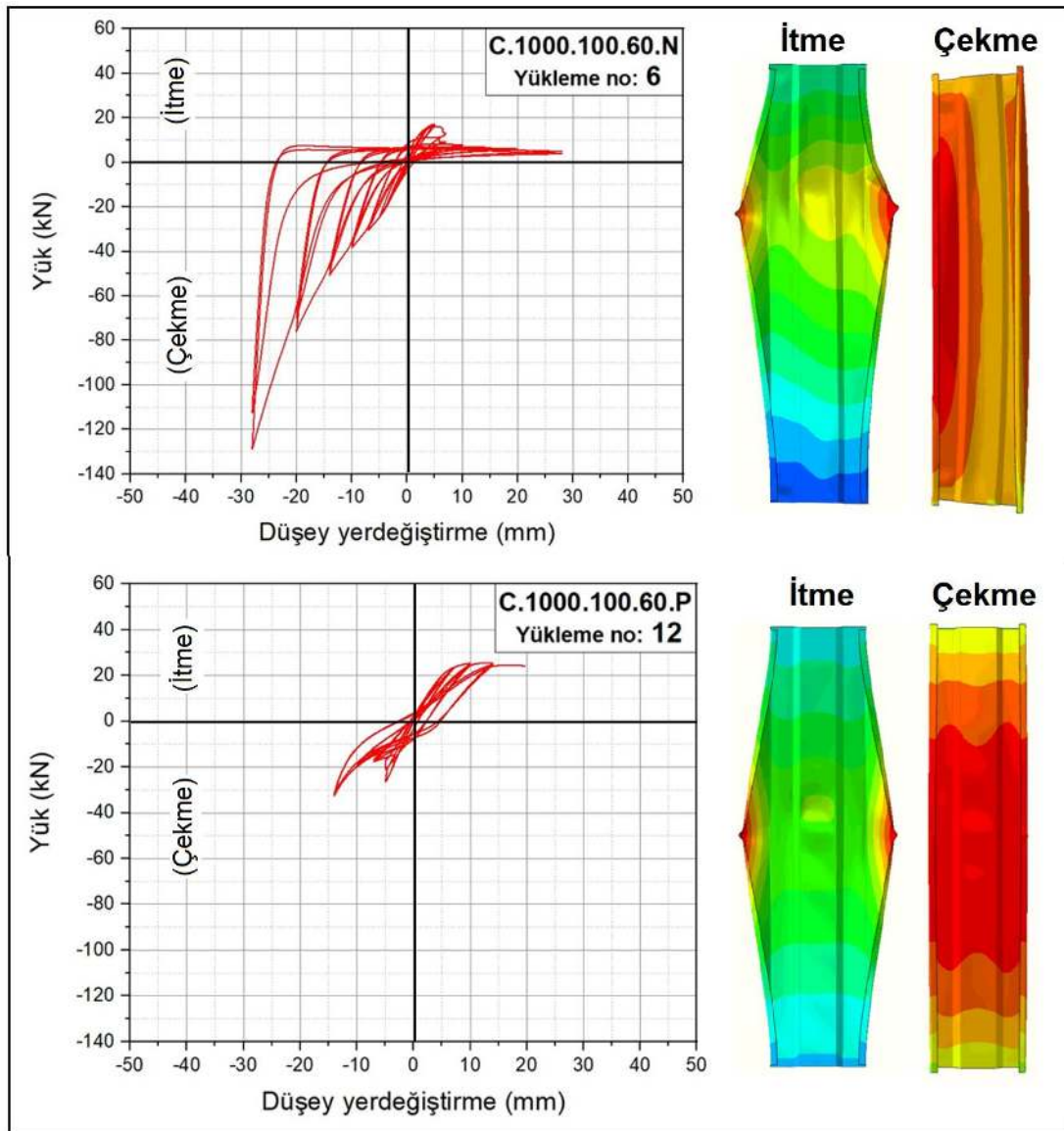
C.1000.100.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde kapasite artışı görülmüştür. Ayrıca burkulma itme yüklemesinde gövdede ve flanşların dışa dönmesi şeklinde olurken çekme yüklemesinde ise yalnız flanşlarda meydana gelmiştir.



Şekil 152. C.1000.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.100.60 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 153'te verilmektedir. C.1000.100.60.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir ve burkulma itme yüklemede flanşlarda, çekme yüklemede ise gövdede meydana gelmiştir.

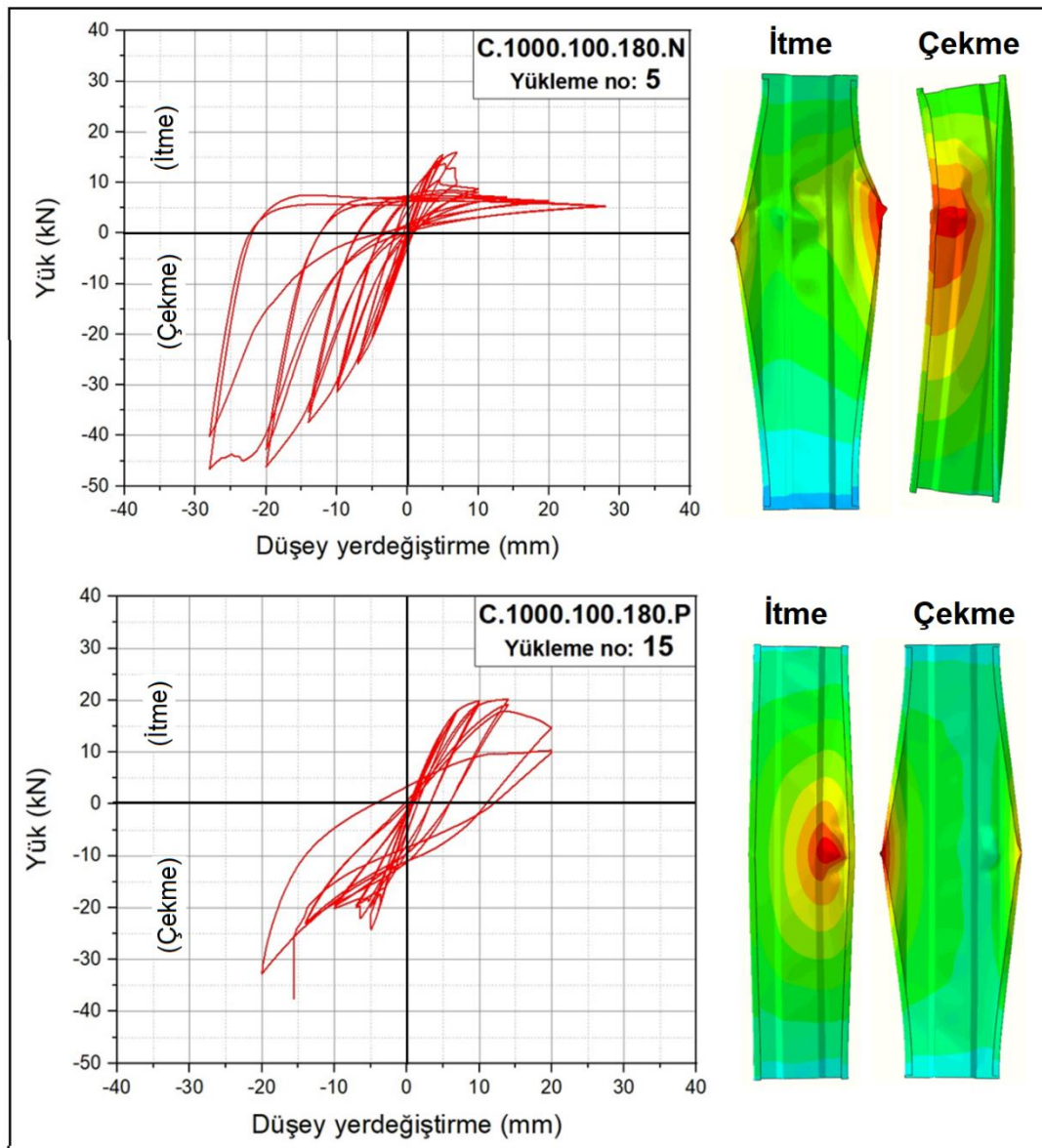
C.1000.100.60.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma, itme yüklemede gövde ve her iki flanşların dışa dönmesi şeklinde, çekme yüklemede ise gövdede etkili olmuştur.



şekil 153. C.1000.100.60 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.100.180 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 154'te verilmektedir. C.1000.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir ve burkulma itme yüklemesinde numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşta, çekme yüklemesinde ise gövdede ve flanşlarda meydana gelmiştir.

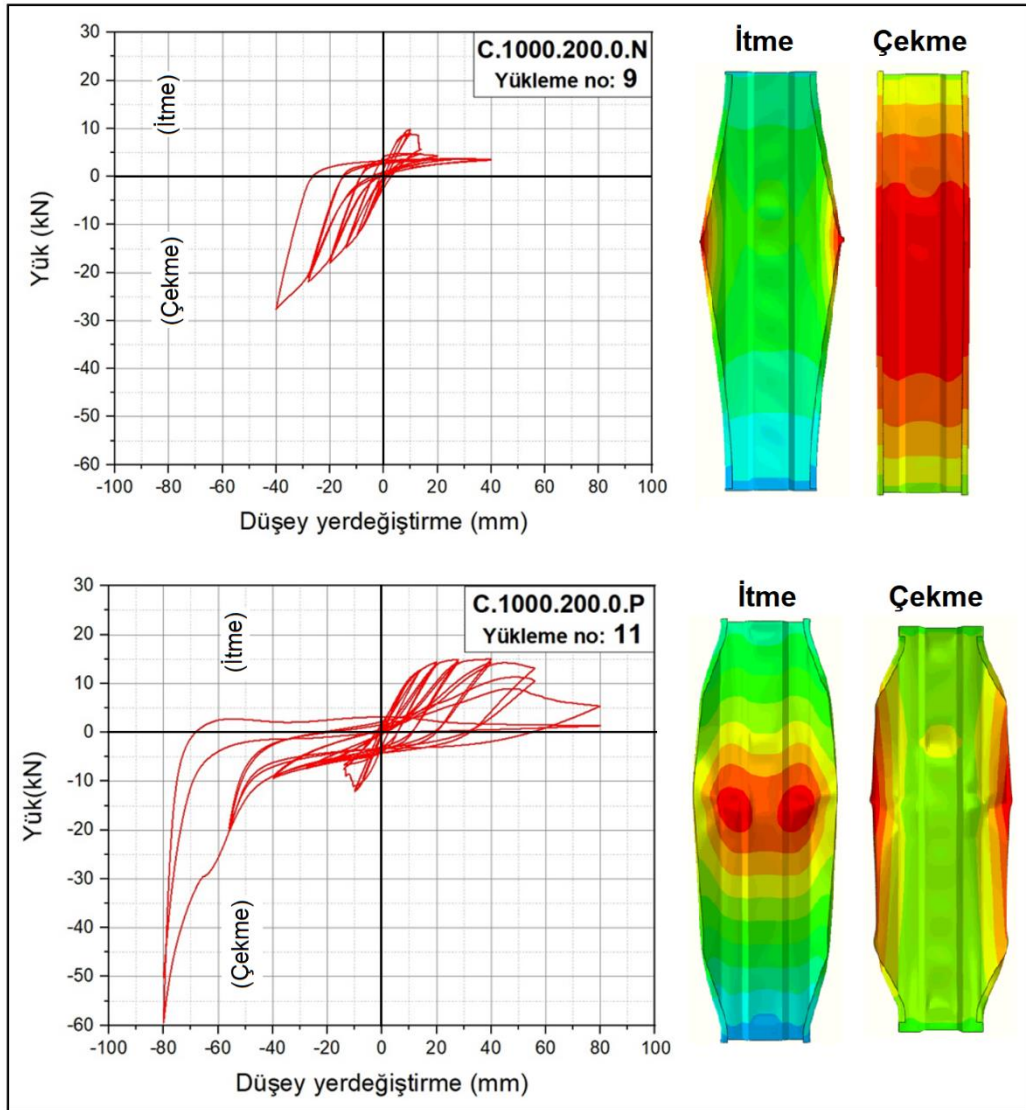
C.1000.100.180.P basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma itme yüklemesinde gövdede, çekme yüklemesinde ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



şekil 154. C.1000.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1000.200.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 155’te verilmektedir. C.1000.200.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir. Burkulma itme yüklemede flanşların dışa dönmesi şeklinde, çekme yüklemede ise numunenin zayıf eksenin etrafında genel burkulma şeklinde meydana gelmiştir.

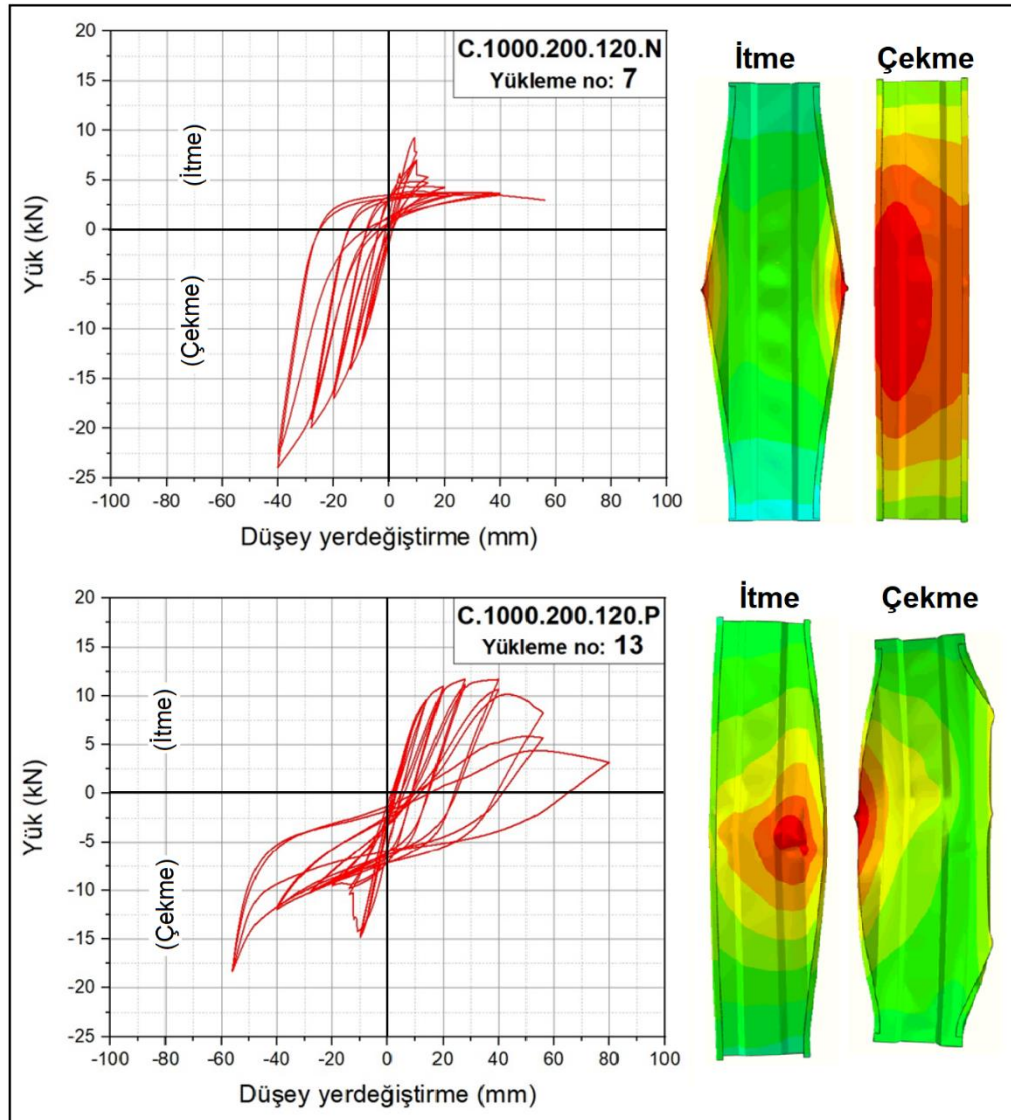
C.1000.200.0.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır, ancak çekme bölgesinde son çevrimlerde kapasite artışı olmuştur. Ayrıca burkulma itme yüklemede gövdede ve flanşların dışa dönmesi şeklinde, çekme yüklemede ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



şekil 155. C.1000.200.0 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

C.1000.200.120 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 156'da verilmektedir. C.1000.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir. Burkulma itme yüklemede numunenin flanşlarında, çekme yüklemede ise nispeten gövdede meydana gelmiştir.

C.1000.200.120.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır, ancak çekme bölgesinde son çevrimlerde kapasite tekrar artmıştır. Burkulma itme yüklemede gövdede ve flanşta, çekme yüklemede ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.

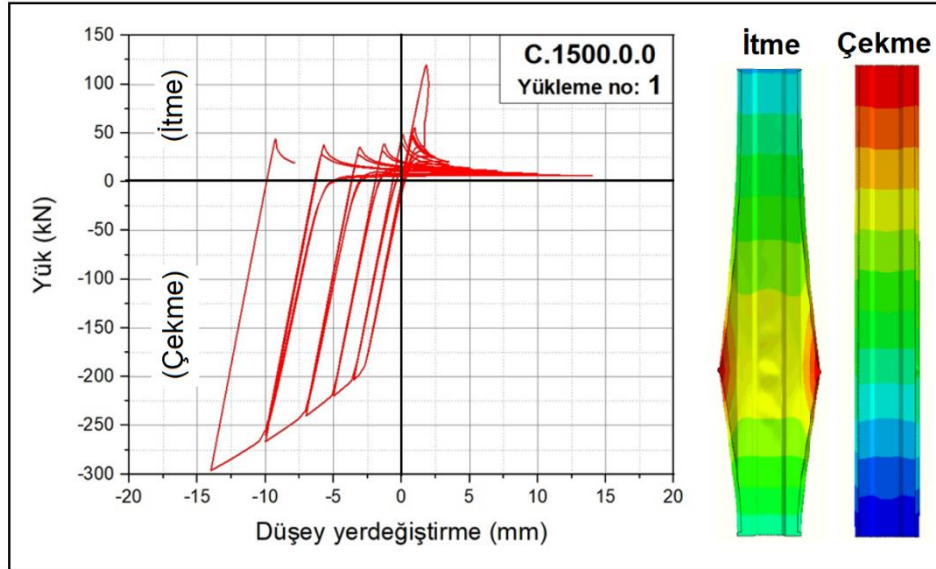


şekil 156. C.1000.200.120 numunelerinin sonlu eleman analizi sonucu

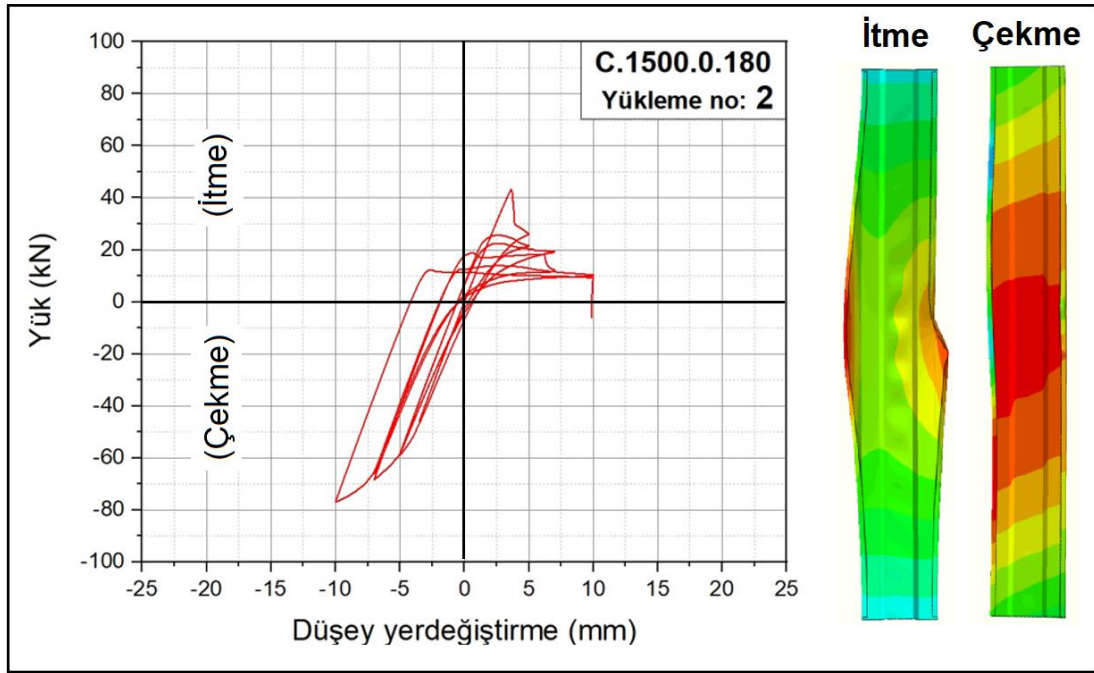
3.5.3. L=1500 mm'lik Numunelerin Tersinir-Tekrarlı Analiz Sonuçları

Genel burkulmanın gözlemleneceği L=1500 mm boyundaki 15 adet sigma profil numunesi üzerinde gerçekleştirilen tersinir-tekrarlı analizler sonrasında en büyük çekme ve en büyük itme yerdeğiştirmeleri altında oluşan burkulma şekilleri ve tersinir tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrileri aşağıda verilmektedir.

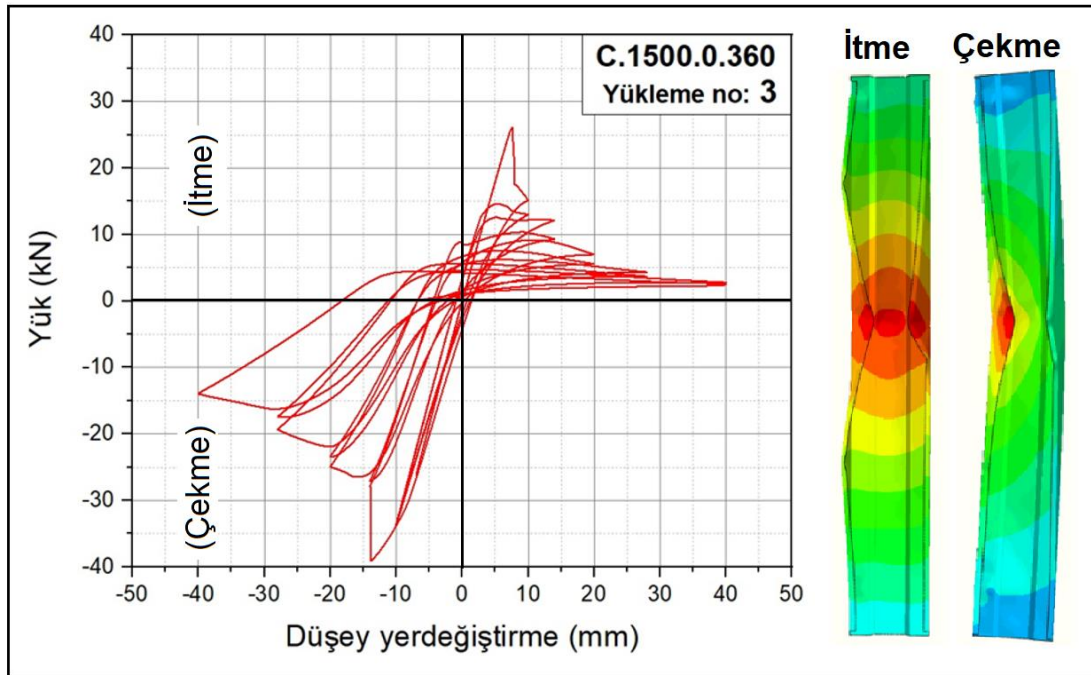
C.1500.0.0 numunesinin burkulma şekli ve yük-yerdeğiştirme davranışı şekil 157'de verilmektedir. şekilde görüldüğü gibi burkulmalar, itme yüklemelerinin flanşlarda, çekme yüklemesinde ise genel burkulma şeklinde meydana gelmiştir. Ayrıca, basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlı bir şekilde azalmıştır, buna karşın çekme bölgesindeki yük taşıma kapasitesi artmıştır. Süneklik ve rijitlik de çekme bölgesine göre oldukça fazla azalmıştır. C.1500.0.180 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi şekil 158'de verilmektedir. Basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle hızlıca azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma itme ve çekme yüklemesinde numunenin flanşlarında meydana gelmiştir. C.1500.0.360 numunesinin burkulma şekli ve tersinir tekrarlı yüklemeye ait yük-yerdeğiştirme eğrisi şekil 159'da verilmektedir. Bu numunenin de basınç ve çekme bölgesinin rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Burkulma C.1500.0.180 numunesine benzer şekilde itme ve çekme yüklemelerinde numunenin flanşlarında meydana gelmiştir.



şekil 157. C.1500.0.0 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

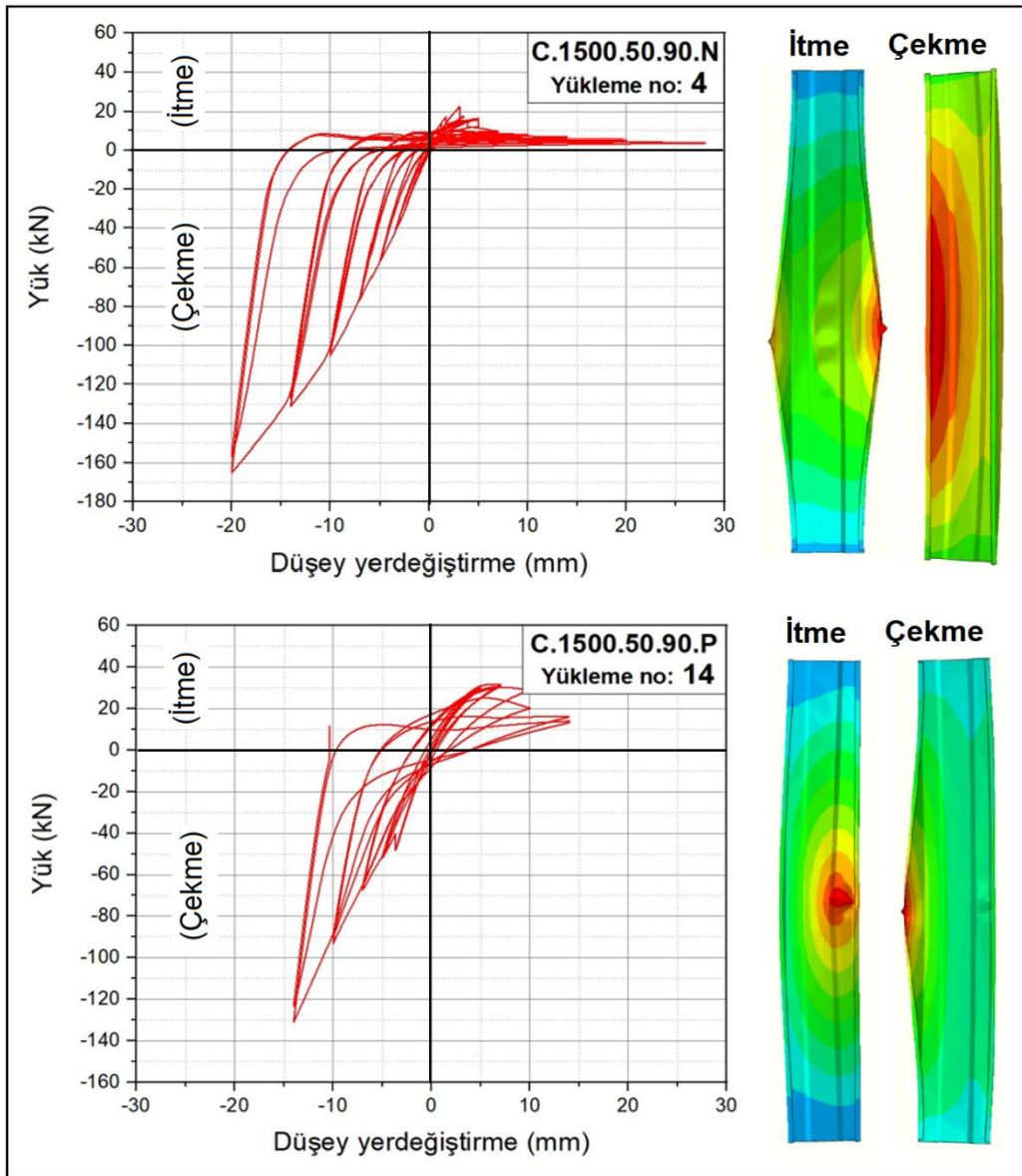


Şekil 158. C.1500.0.180 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları



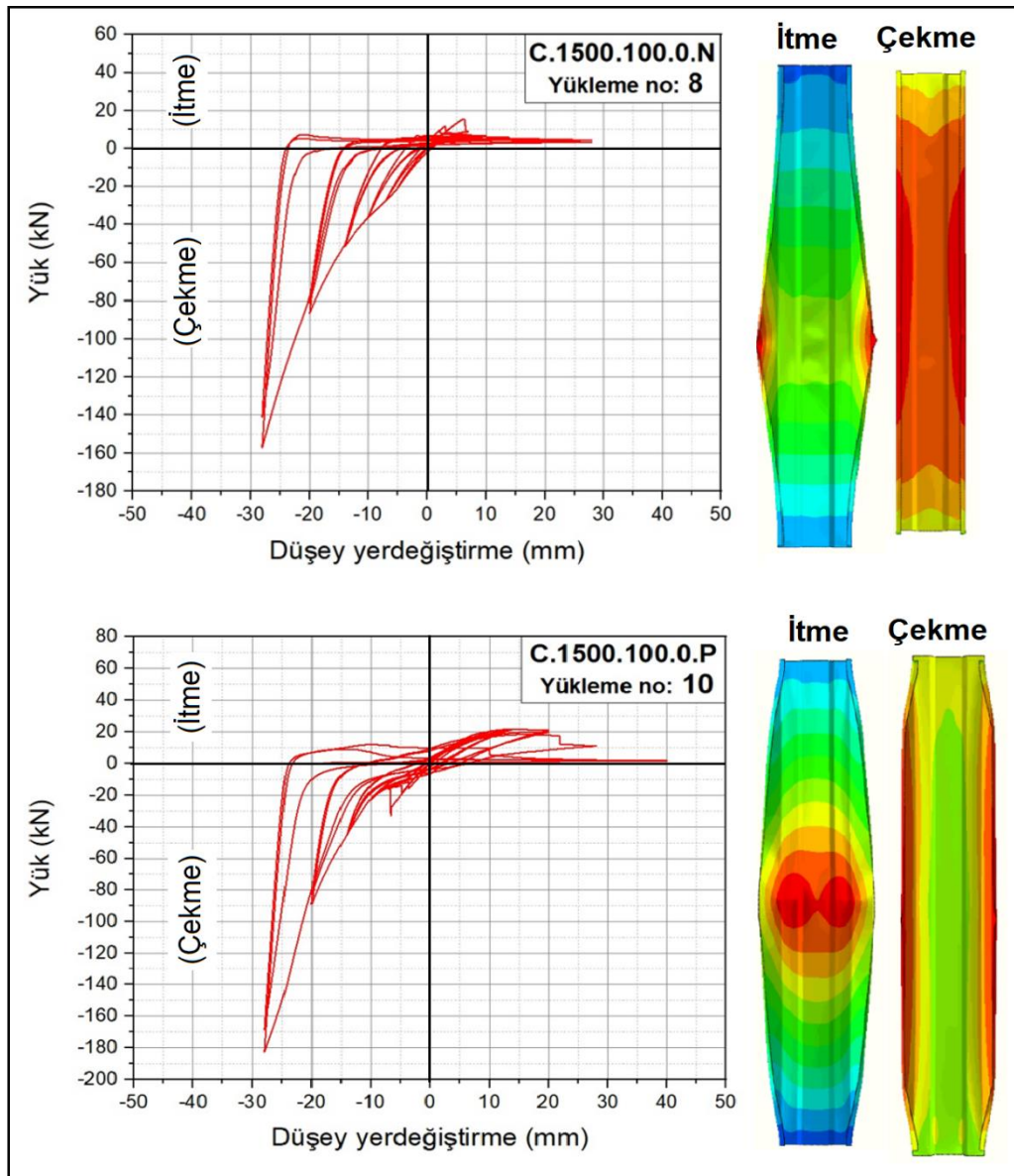
Şekil 159. C.1500.0.360 numunesinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1500.50.90 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 160’da verilmektedir. C.1500.50.90.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmış ancak çekme bölgesinde kapasite artışı görölmüştür. Burkulma itme yüklemede flanşların dışa dönmesi şeklinde, çekme yüklemede ise yükleme noktasının diğer tarafındaki flanşta meydana gelmiştir. C.1500.50.90.P numunesinde de basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır, çekme bölgesinde ise kapasite artışı olmuştur. Burkulmalar ise itmede gövdede çekmede ise flanşta meydana gelmiştir.



şekil 160. C.1500.50.90 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

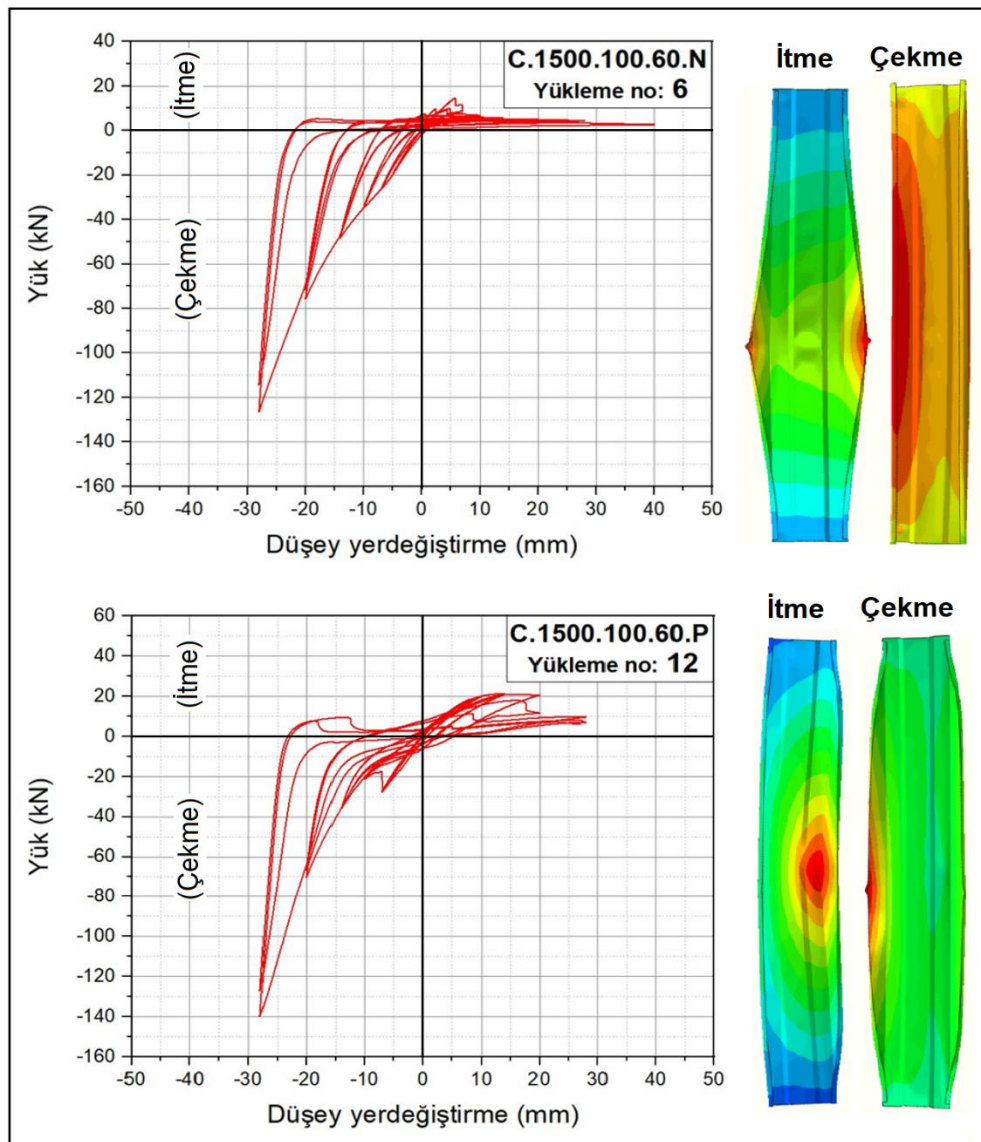
C.1500.100.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 161’de verilmektedir. C.1500.100.0.N basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir ve burkulma itme yüklemesinde flanşlarda çekme yüklemesinde ise genel burkulma şeklinde meydana gelmiştir. C.1500.100.0.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde kapasite artışı olmuştur. Ayrıca burkulma itme yüklemesinde numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta ve gövdede, çekme yüklemesinde ise flanşlarda meydana gelmiştir.



şekil 161. C.1500.100.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

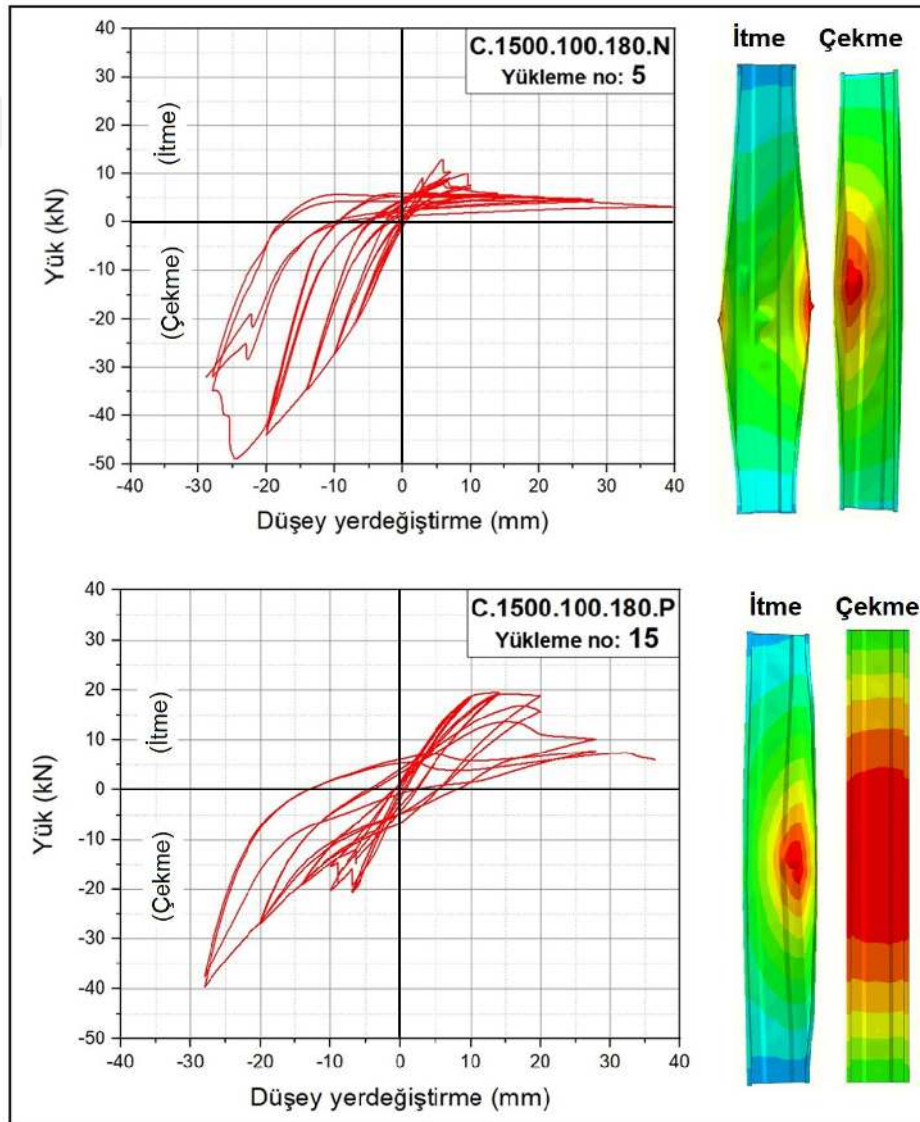
C.1500.100.60 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 162’de verilmektedir. C.1500.100.60.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitliği burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir ve burkulma numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, çekme yüklemesi sırasında flanşta genel burkulma oluşmuştur.

C.1500.100.60.P numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Ancak çekme bölgesinde kapasite artışı olmuştur. Ayrıca burkulma itme yüklemesinde numunenin ortasına yakın bölgesinde gövdede oluşmuştur.



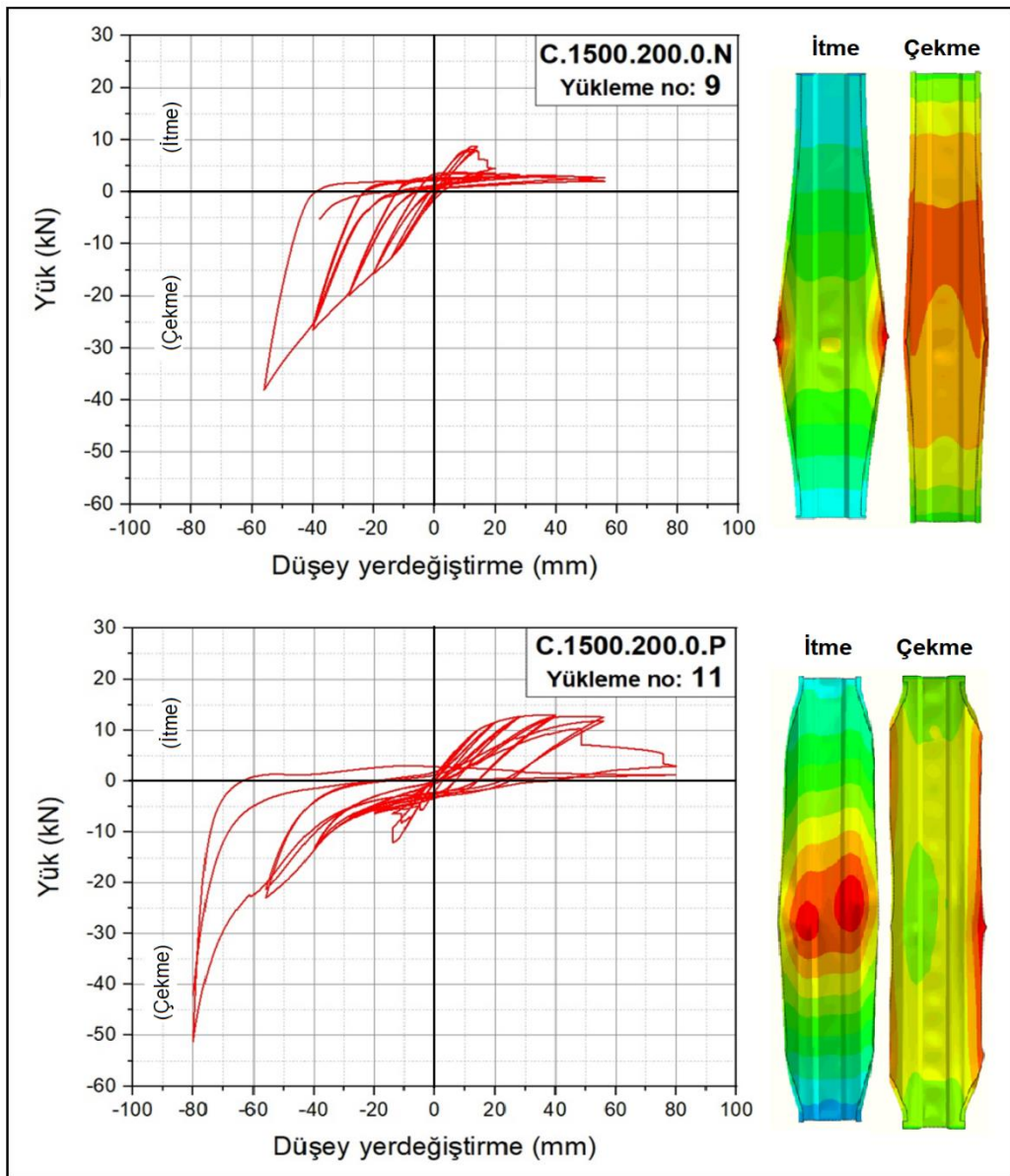
şekil 162. C.1500.100.60 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1500.100.180 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 163'te verilmektedir. C.1500.100.180.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir ve burkulma itme yüklemesinde numunenin ortasına yakın bölgesinde flanşlarda, çekme yüklemesinde ise gövdede meydana gelmiştir. C.1500.100.180.P basınç bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır. Ancak çekme bölgesindeki son çevrimlerde kapasitede artış görülmüştür. Burkulma itme yüklemesinde gövdede, çekme yüklemesinde ise genel burkulma şeklinde meydana gelmiştir.



Şekil 163. C.1500.100.180 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

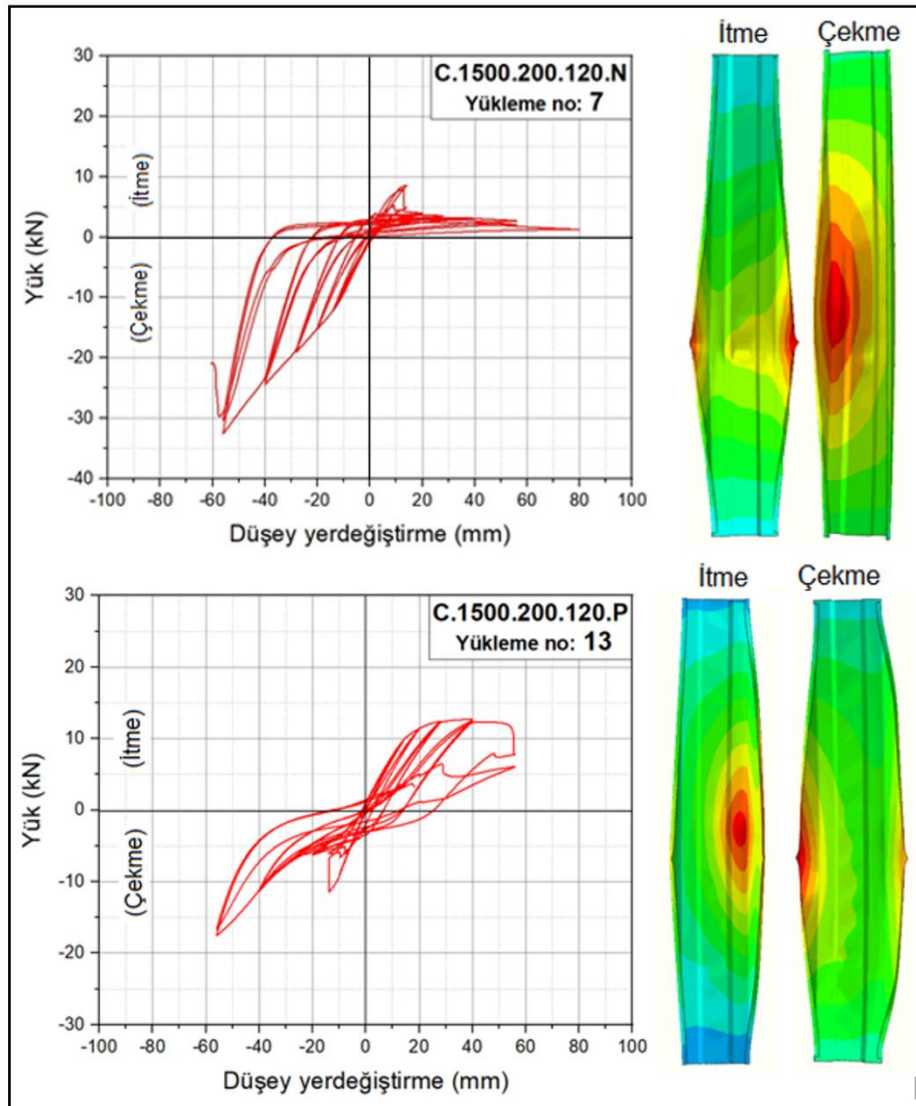
C.1500.200.0 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 164’te verilmektedir. C.1500.200.0.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görülmektedir. Burkulma itme ve çekme yüklemelerinin her ikisinde de numunenin ortasına yakın bölgesinde her iki flanşta simetrik olarak meydana gelmiştir. C.1500.200.0.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır, ancak son çevrimlerde çekme bölgesinde kapasite artışı görülmüştür. Ayrıca burkulma itme yüklemesinde gövde de çekme yüklemesinde ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



Şekil 164. C.1500.200.0 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

C.1500.200.120 N ve P numunelerine ait analiz sonrası görünüşler ve yük-yerdeğiştirme eğrileri şekil 165'te verilmektedir. C.1500.200.120.N numunesinin basınç bölgesindeki rijitlik burkulmalar nedeniyle azalmıştır ancak çekme bölgesinde yük artışı görölmektedir. Burkulma itmede flanşlarda, ekmede ise flanş ve gövdede meydana gelmiştir.

C.1500.200.120.P numunesinin basınç ve çekme bölgesindeki rijitlik ve kapasite burkulmalar nedeniyle azalmıştır, ancak son çevrimlerde çekme bölgesinde kapasite artışı görölmüştür. Ayrıca burkulma itme yüklemede gövde de çekme yüklemede ise flanşlarda daha etkili meydana gelmiştir.



şekil 165. C.1500.200.120 numunelerinin tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi sonuçları

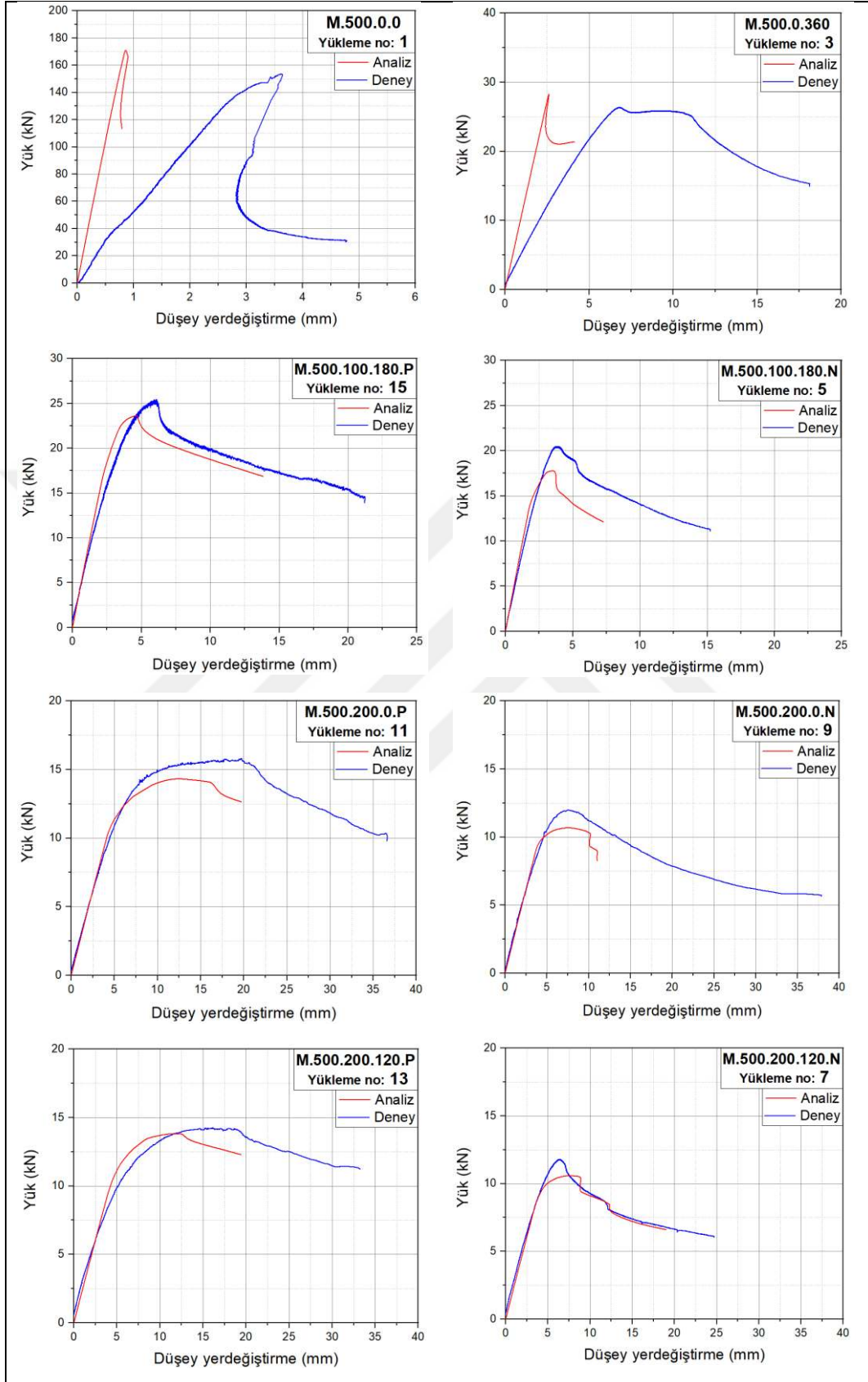
3.6. Monotonik Yüklene Numunelerin Davranışlarının Karşılaştırılması

Monotonik yükleme numuneleri arasında M.0.0 eksenel yükleme numunesine ilave olarak, en büyük eksantrisiteye sahip M.0.360, M.200.120, M.100.180 ve M.200.0 P ve N numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deney ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boyları için sırasıyla Şekli 166 ile Şekil 168 arasında karşılaştırma yapmak amacıyla aynı eksen takımında verilmiştir.

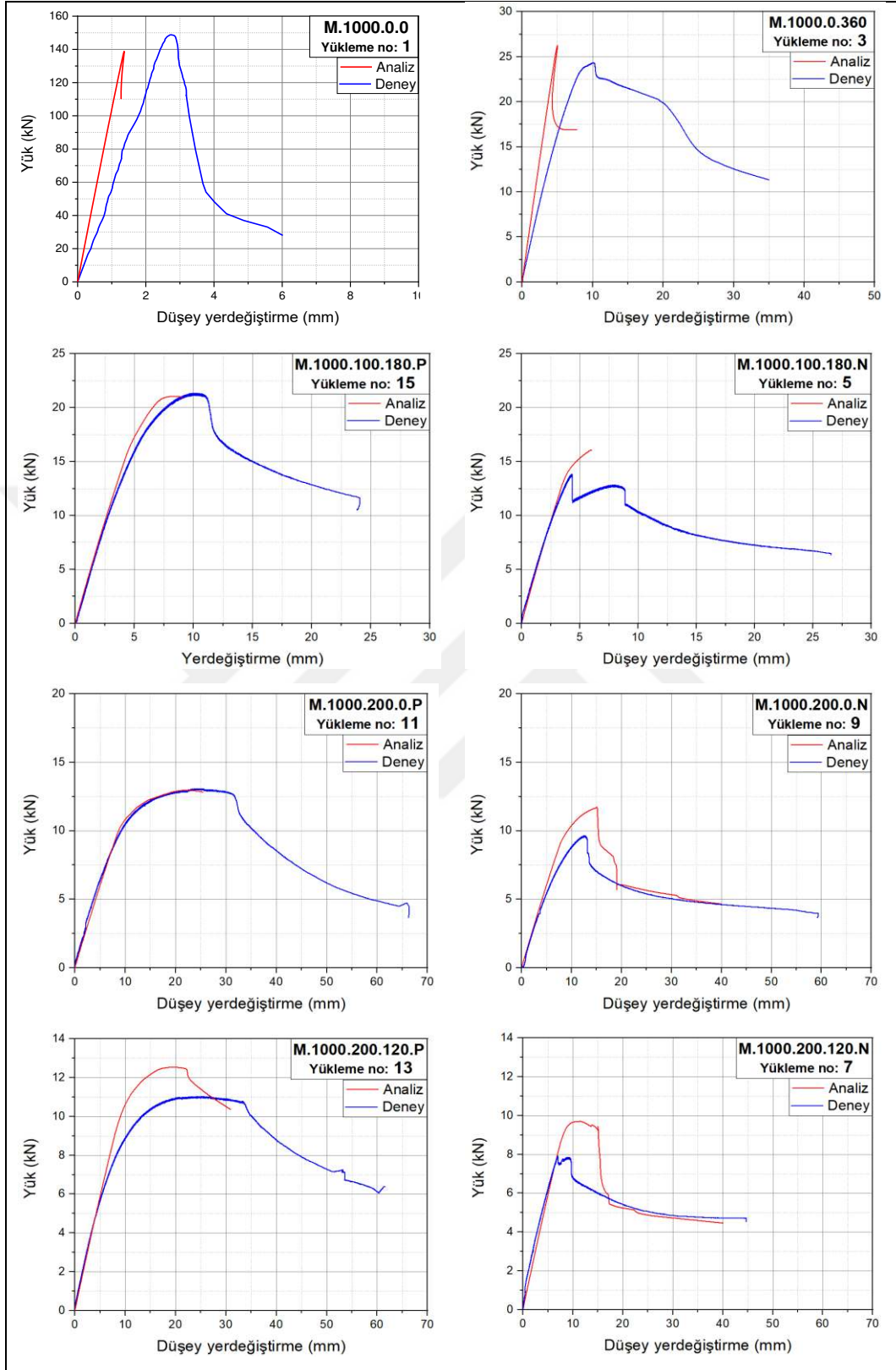
Aşağıdaki şekillerden görüldüğü gibi, M.500.0.0 ve M.500.0.360 numunelerinin sonlu eleman analizlerinden ve deneylerden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerinin rijitlikleri arasında önemli fark meydana gelmiştir. Ancak diğer numunelerde analiz ve deney elemanlarının rijitlikleri aynı olmuştur.

Diğer numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında ise, 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boyundaki numunelerin analiz ve deney sonuçları arasında rijitlik ve yük taşıma kapasitesi açısından oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

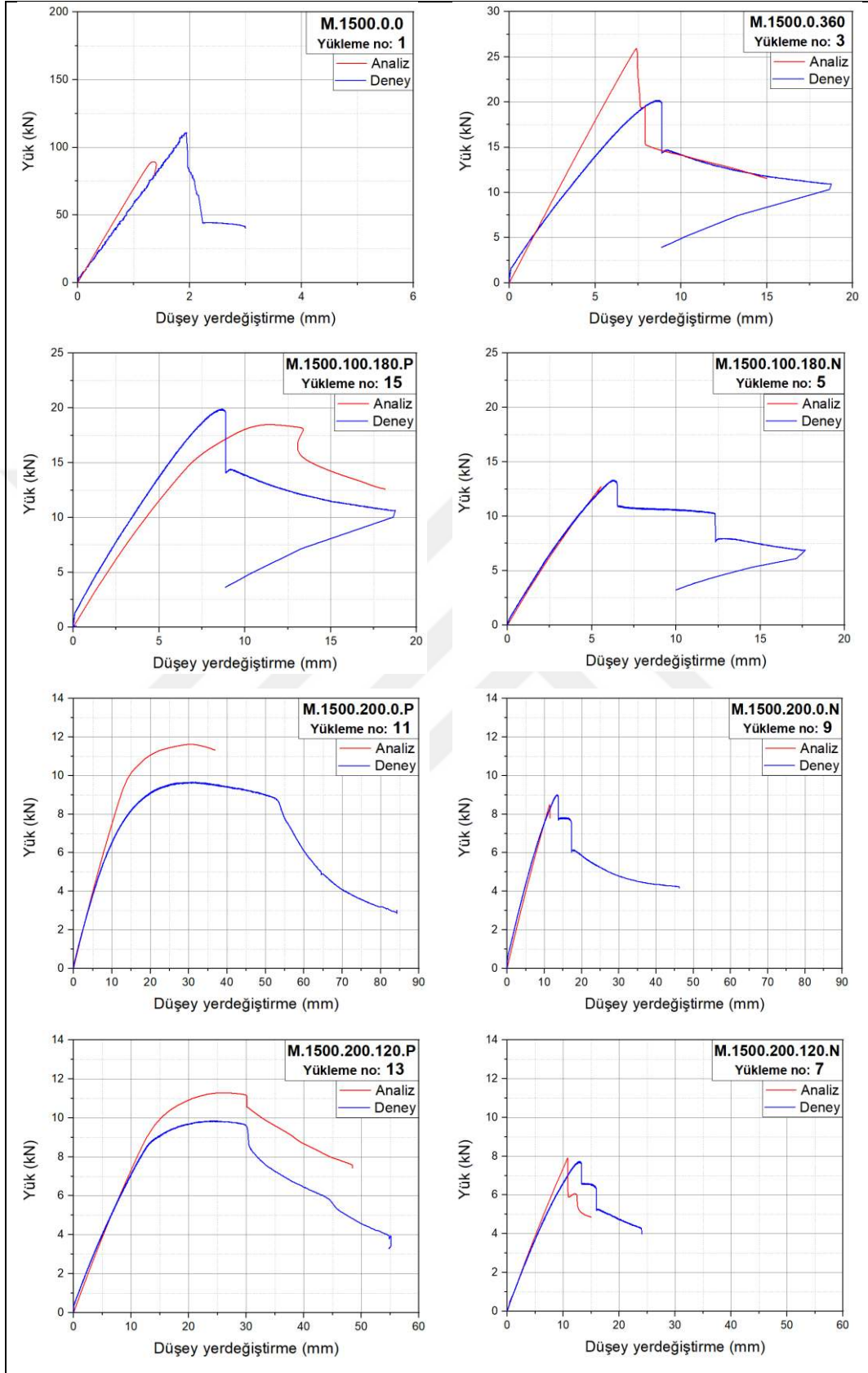
Gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde oluşan rijitlik; deney düzeneğinin rijitliği ve numunenin rijitliğinin toplamı şeklindedir. Numune boyunun veya eksantrisitenin artmasıyla deney düzeneğinin rijitliğinin toplam rijitliğe katkısı da azalmaktadır. Düşük rijitliğe sahip numunelerde deney düzeneğinde ya da mesnetlerde oluşan istem daha düşüktür. Bu nedenle, eksenel yükleme altında gerçekleştirilen deney ve analiz sonuçları arasında önemli rijitlik farkları oluşmuştur.



Şekil 166. L=500 mm'lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 167. L=1000 mm’lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 168. L=1500 mm'lik numunelerinin analiz ve deney eğrilerinin karşılaştırılması

Aşağıdaki Tablo 9’da monotonik yükleme altındaki deney ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük taşıma kapasiteleri ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerinin altında kalan alan olarak hesaplanan tüketilen enerji miktarları ile bu miktarlar arasındaki oranlar verilmiştir.

Tablo 9. Monotonik yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından elde edilen yük kapasiteleri ve tüketilen enerji değerleri

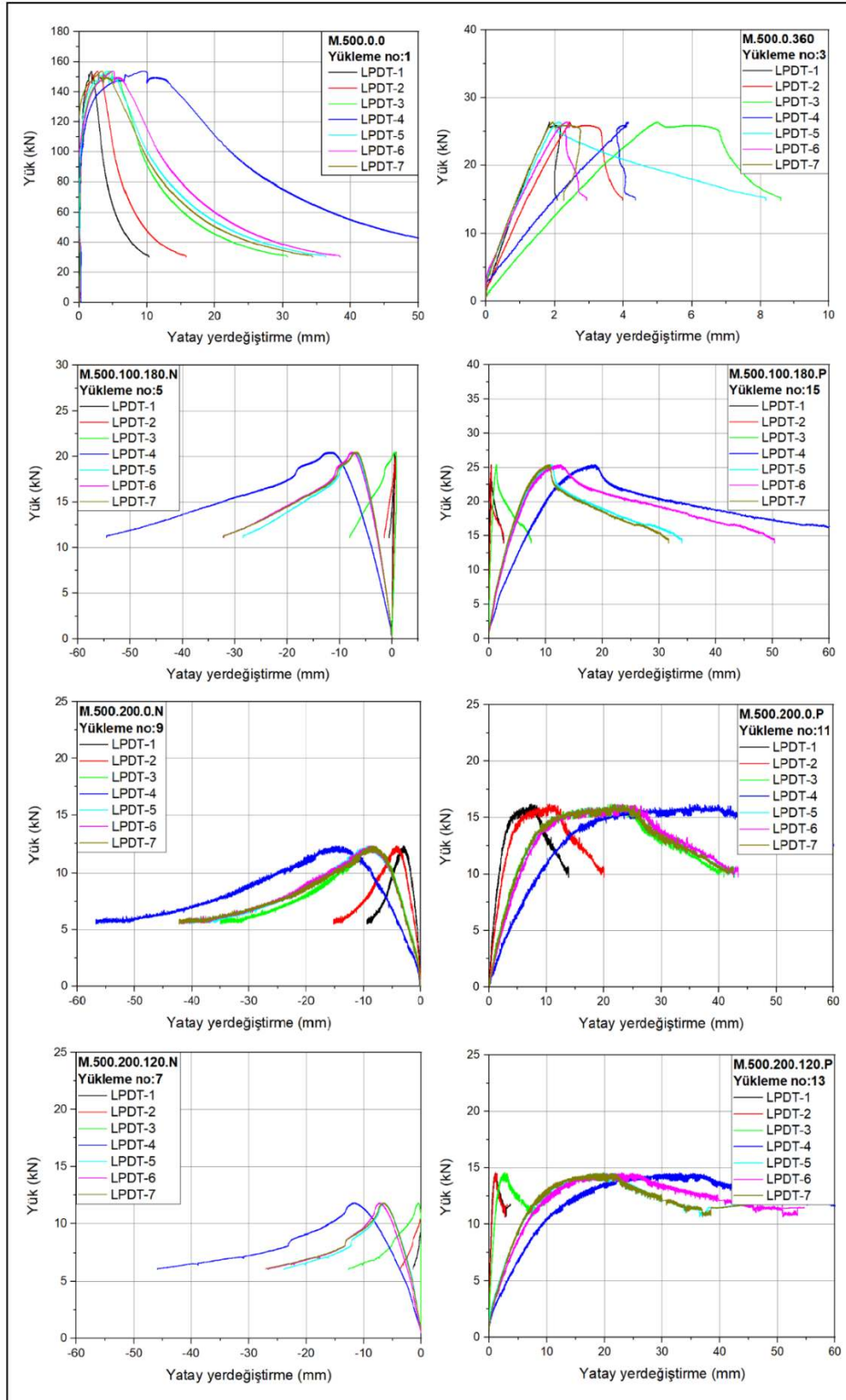
Boy	Yükleme	Kapasite (kN)			Tüketilen enerji (kNmm)		
		Deney	Analiz	Analiz/Deney	Deney	Analiz	Analiz/Deney
L=500 mm	M.0.0	153.60	171.07	1.11	295.00	69.70	0.24
	M.0.360	26.37	28.25	1.07	234.75	32.12	0.14
	M.100.180.N	20.46	17.78	0.87	82.35	53.82	0.65
	M.100.180.P	25.43	23.61	0.93	136.85	132.77	0.97
	M.200.0.N	11.97	10.68	0.89	116.00	90.16	0.78
	M.200.0.P	15.82	14.32	0.91	311.80	233.50	0.75
	M.200.120.N	11.80	10.58	0.90	67.31	84.25	1.25
	M.200.120.P	14.27	13.82	0.97	315.46	224.70	0.71
	Ortalama			0.96	Ortalama		0.69
L=1000 mm	M.0.0	148.00	137.00	0.93	141.00	95.20	0.68
	M.0.360	24.33	26.26	1.08	353.90	53.32	0.15
	M.100.180.N	13.84	16.07	1.16	93.45	60.50	0.65
	M.100.180.P	21.34	21.05	0.99	179.80	165.00	0.92
	M.200.0.N	9.63	11.72	1.22	82.75	118.99	1.44
	M.200.0.P	13.07	12.96	0.99	352.37	281.00	0.80
	M.200.120.N	7.92	9.70	1.22	57.86	107.30	1.85
	M.200.120.P	11.03	12.53	1.14	342.60	283.70	0.83
	Ortalama			1.09	Ortalama		0.91
L=1500 mm	M.0.0	110.78	89.41	0.81	113.60	65.55	0.58
	M.0.360	20.18	25.92	1.28	108.60	101.35	0.93
	M.100.180.N	13.32	12.73	0.96	51.40	31.10	0.61
	M.100.180.P	19.89	18.48	0.93	108.00	166.35	1.54
	M.200.0.N	9.00	8.50	0.94	99.90	51.50	0.52
	M.200.0.P	9.83	11.62	1.18	441.00	329.80	0.75
	M.200.120.N	7.74	7.91	1.02	72.50	44.60	0.62
	M.200.120.P	9.85	11.29	1.15	237.30	298.90	1.26
	Ortalama			1.03	Ortalama		0.85

Tablo 9’da verilen deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçlarının ortalamalarına göre, her iki yöntemle elde edilen yük taşıma kapasite birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, tabloda verilen yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde, eksantrisitenin yük taşıma davranışı üzerinde çok büyük etkisinin olduğu görülmektedir. Flanşların basınç altında olduğu N numunelerinin tamamında kapasite, flanşların çekme altında olduğu P numunelerine göre daha düşüktür.

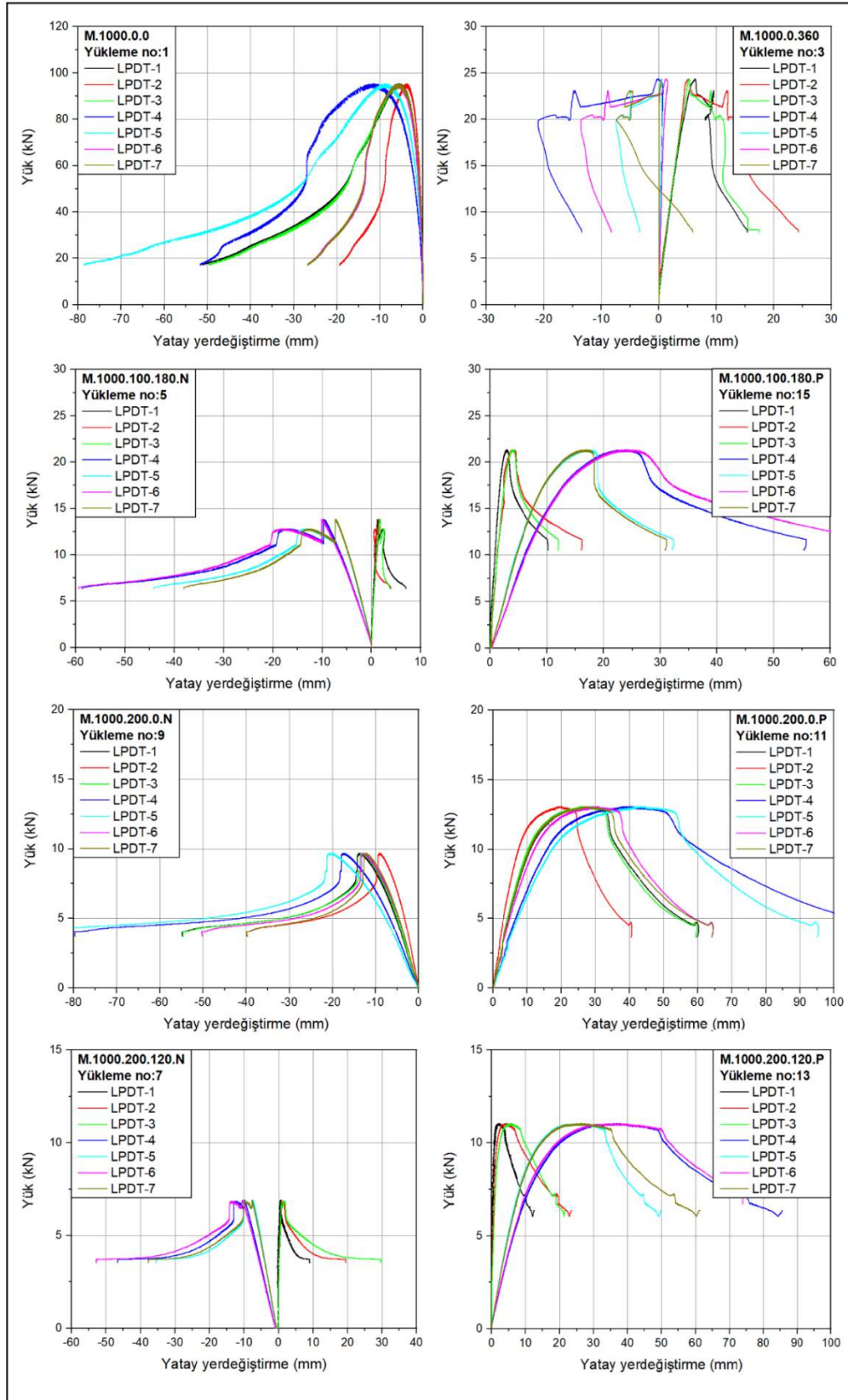
Tablo 10. Monotonik yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından belirlenen süneklik oranları

Boy	Yükleme	Deney			Analiz		
		Δu (mm)	Δy (mm)	Süneklik oranı ($\Delta u / \Delta y$)	Δu (mm)	Δy (mm)	Süneklik oranı ($\Delta u / \Delta y$)
L=500 mm	M.0.0	3.40	2.96	1.150	0.82	0.82	1.00
	M.0.360	12.12	6.46	1.89	2.41	2.55	0.95
	M.100.180.N	5.62	3.19	1.76	4.25	2.45	1.74
	M.100.180.P	7.18	3.60	2.00	7.53	3.81	1.98
	M.200.0.N	12.75	6.12	2.08	10.85	4.82	2.25
	M.200.0.P	24.40	9.38	2.60	19.80	6.99	2.83
	M.200.120.N	8.40	5.39	1.56	10.48	5.03	2.08
	M.200.120.P	26.00	7.79	3.34	19.50	6.48	3.01
L=1000 mm	M.0.0	2.15	1.35	1.59	1.35	1.31	1.03
	M.0.360	18.00	6.91	2.61	4.45	4.84	0.92
	M.100.180.N	5.30	5.56	0.95	6.22	4.91	1.27
	M.100.180.P	11.64	6.43	1.81	9.50	3.32	2.86
	M.200.0.N	13.49	9.79	1.38	15.34	10.37	1.48
	M.200.0.P	32.90	11.88	2.77	26.00	8.64	3.01
	M.200.120.N	10.25	5.89	1.74	15.27	8.42	1.81
	M.200.120.P	37.55	12.98	2.89	29.12	12.96	2.25
L=1500 mm	M.0.0	1.96	1.87	1.05	1.42	1.37	1.03
	M.0.360	8.89	7.2	1.27	7.52	7.22	1.04
	M.100.180.N	6.53	5.34	1.22	12.80	20.71	0.62
	M.100.180.P	8.89	6.92	1.29	13.25	8.50	1.56
	M.200.0.N	17.10	12.00	1.43	11.54	10.96	1.05
	M.200.0.P	53.96	18.20	2.97	40.00	23.24	1.72
	M.200.120.N	13.29	7.85	1.69	10.83	10.38	1.04
	M.200.120.P	30.88	13.58	2.27	35.00	17.05	2.05

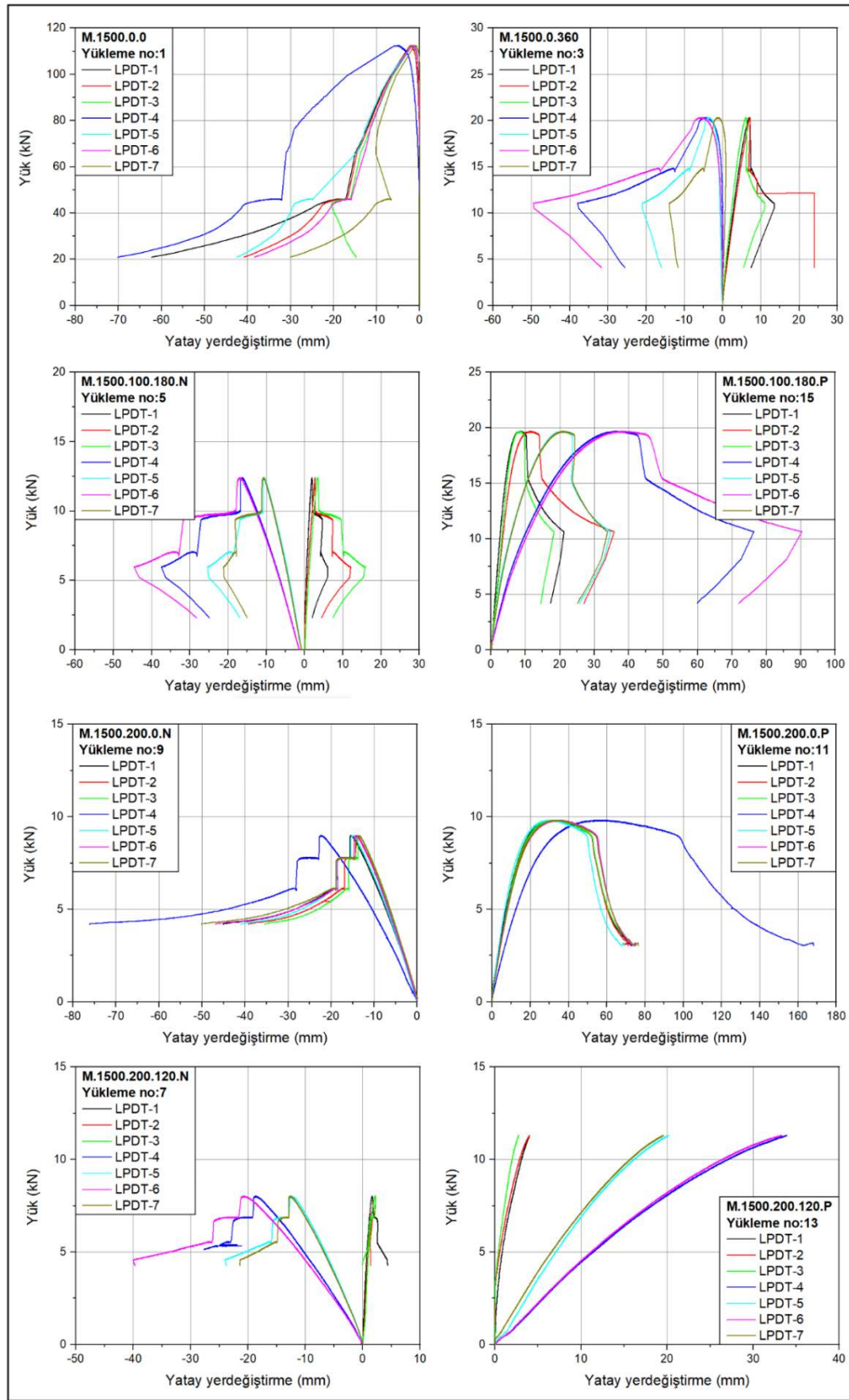
Aşağıdaki Şekil 170 – Şekil 172 arasında, deneysel çalışmadan elde edilen ve numunelerin gövde ve flanşlarına yerleştirilen LPDT-1 ile LPDT-7 arasında numaralandırılmış ölçüm sisteminden okunan yatay yerdeğiştirmenin yük ile değişimi verilmiştir.



Şekil 170. Monotonik yüklenen bazı M500 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 171. Monotonik yüklenen bazı M1000 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

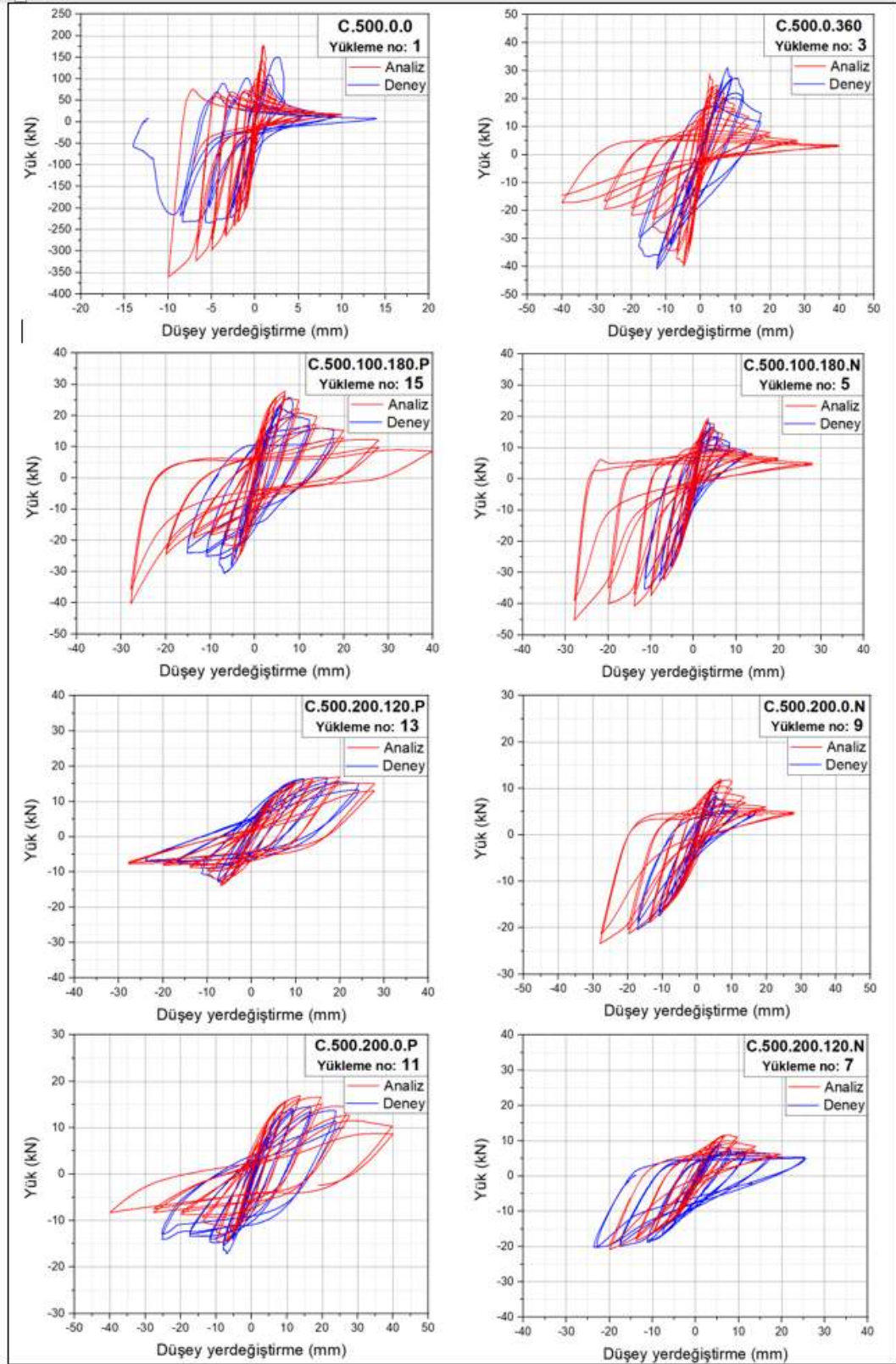


Şekil 172. Monotonik yüklenen bazı M1500 numunelerinin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri

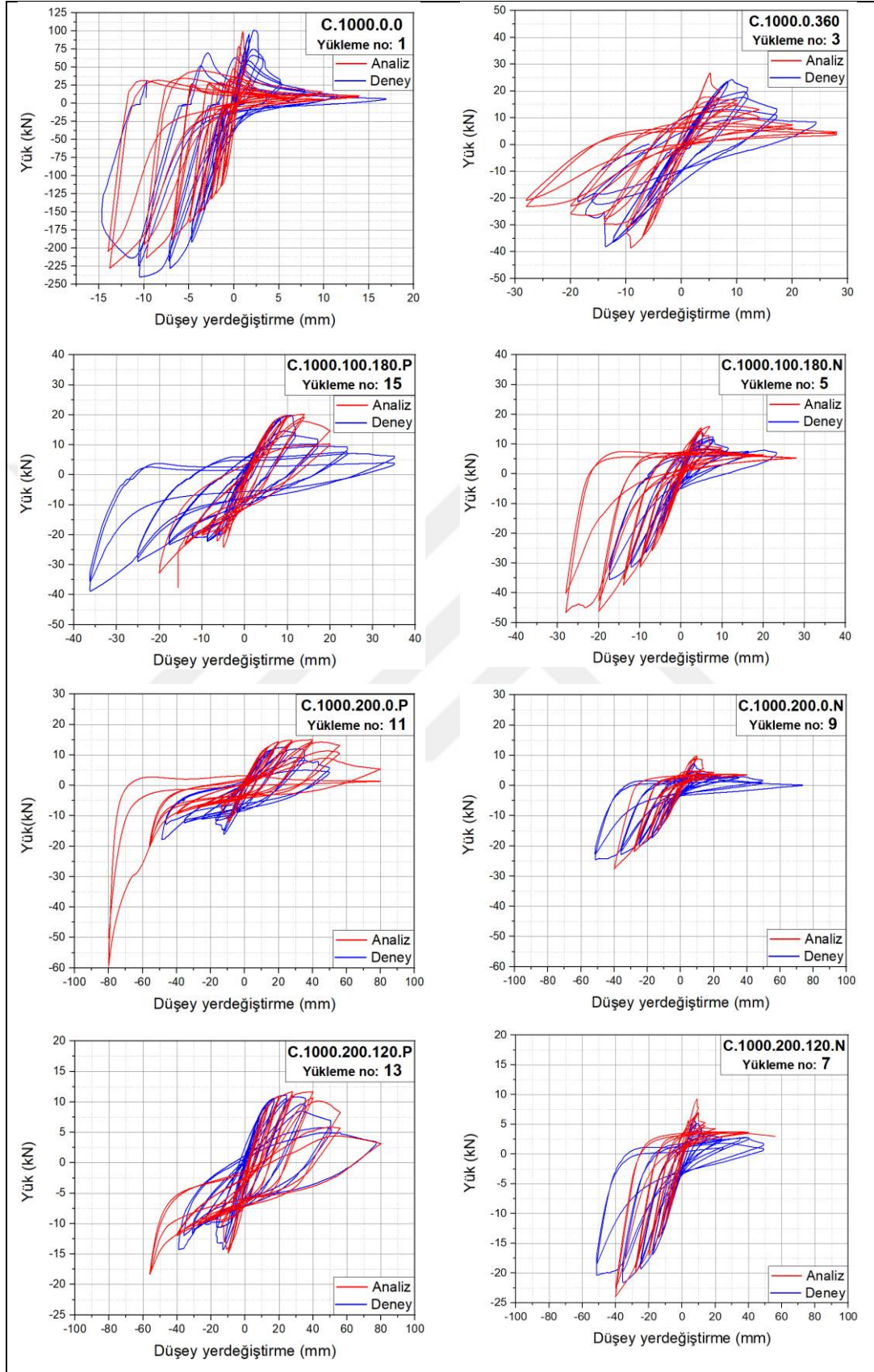
Monotonik yükler altında deneysel olarak incelenen 500 mm'lik M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %13, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %25, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %114 fazla olmuştur. 1000 mm'lik numunelerde, M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %90, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %100, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %66 fazladır. 1500 mm'lik numunelerde, M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %5, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %108, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %34 fazla olduğu görülmüştür. Monotonik yükler altında sayısal olarak incelenen 500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %14, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %26, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %44 fazladır. 1000 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %125, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %103, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %24 fazla olmuştur. 1500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %152, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %64, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %97 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. 500 mm boyundaki sigma profillerin monotonik yükler altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi sonucunda en yüksek enerji tüketiminin C.200.120.P numunesinde olduğu görülmüştür. 1000 mm boyundaki numunelerin incelenmesi sonucunda en yüksek enerji tüketiminin deneysel çalışmada C.200.0.P numunesinde, sayısal çalışmada ise C.200.120.P olduğu görülmüştür. 1500 mm boyundaki numunelerde ise en yüksek enerji tüketimi C.200.0.P numunesinde olduğu görülmüştür.

3.7. Tersinir-Tekrarlı Yüklenen Numunelerin Karşılaştırılması

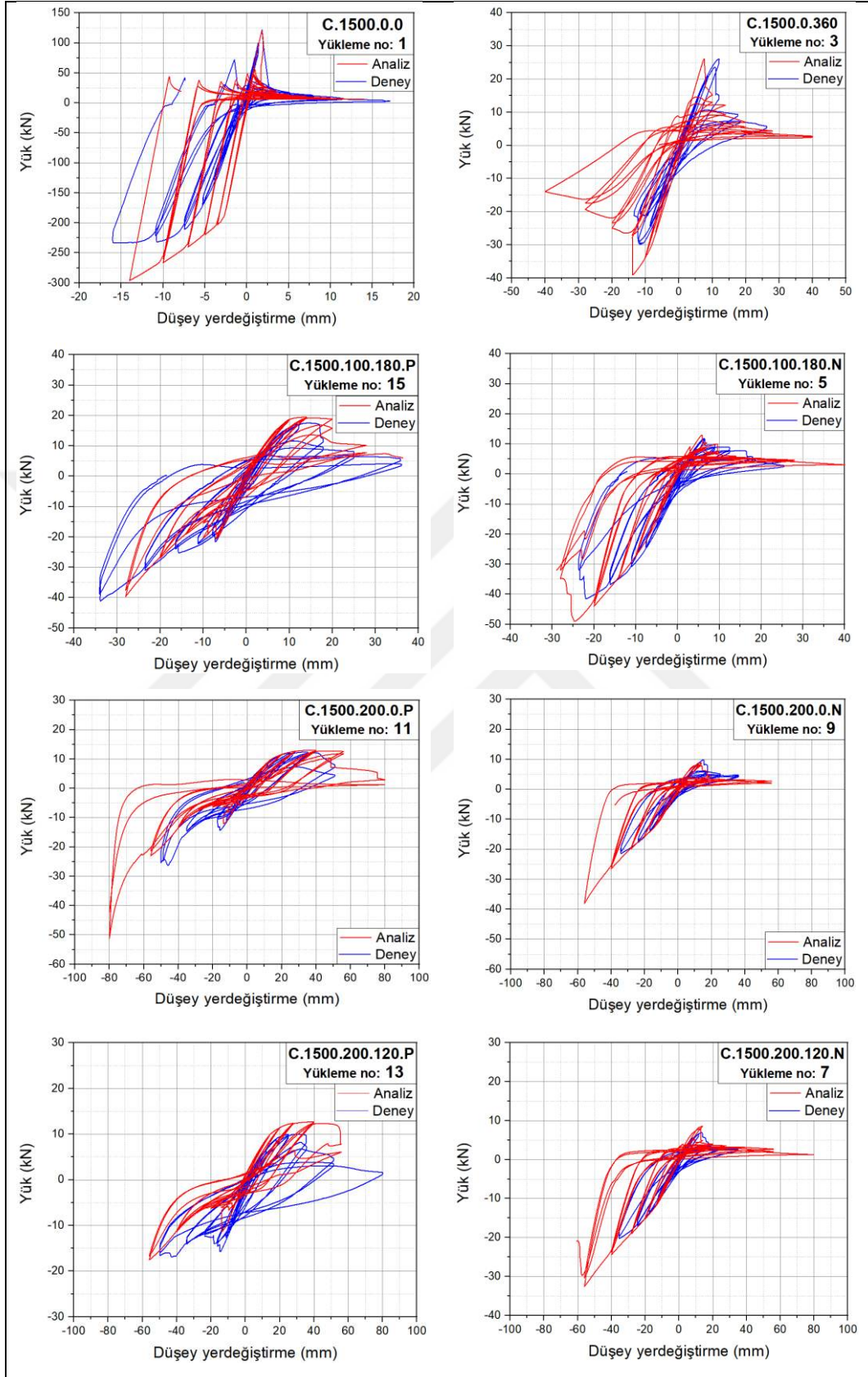
Boyları 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm olan numuneler arasından seçilen C.0.0, C.0.360, C.200.120, C.100.180 ve C.200.0 numunelerinin deney ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri aynı eksen takımı üzerinde aşağıdaki Şekil 173 - 175'te sırasıyla verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçlarından elde edilen yük-yerdeğiştirme davranışları birbiriyle oldukça uyumludur.



Şekil 173. C500 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 174. C1000 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 175. C1500 numunelerinin sonlu eleman ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Tersinir-tekrarlı deneysel çalışmadan ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen eğrilerin itme ve çekme bölgelerindeki yük taşıma kapasiteleri ve bunlar arasındaki oranlar Tablo 11’de verilmiştir. Bu tabloda verilen deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçlarının ortalamalarına göre, her iki yöntemle elde edilen yük taşıma kapasite birbirine oldukça yakındır. Analizlerden elde edilen çekme kapasitelerinin çoğunlukla deneysel çalışmadan elde edilen kapasitelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca çekme bölgelerindeki yük taşıma kapasitelerinde bu oranın daha da büyüdüğü görülmüştür. Flanşların basınç altında olduğu N numunelerinin tamamında kapasite, flanşların çekme altında olduğu P numunelerine göre daha düşüktür.

Tablo 11. Tersinir-tekrarlı yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından elde edilen yük kapasiteleri ve birbirine oranları

Boy	Yüklem	Deney (kN)		Analiz (kN)		Analiz/Deney	
		İtme	Çekme	İtme	Çekme	İtme	Çekme
L=500 mm	C.0.0	150.6	234.6	177.64	360.06	1.18	1.53
	C.0.360	31.03	40.79	28.78	40.01	0.93	0.98
	C.100.180.N	18.19	35.33	19.40	45.33	1.07	1.28
	C.100.180.P	25.79	30.41	27.76	40.37	1.08	1.33
	C.200.0.N	9.42	20.36	11.95	23.43	1.27	1.15
	C.200.0.P	14.59	17.11	16.93	14.60	1.16	0.85
	C.200.120.N	9.30	20.24	11.65	20.81	1.25	1.03
	C.200.120.P	16.80	12.75	17.00	13.97	1.01	1.10
	Ortalama					1.12	1.16
L=1000 mm	C.0.0	101.11	240.18	99.23	227.95	0.98	0.95
	C.0.360	24.23	38.07	26.68	38.56	1.10	1.01
	C.100.180.N	14.18	35.53	15.93	46.64	1.12	1.31
	C.100.180.P	20.00	20.00	23.20	34.47	1.16	1.72
	C.200.0.N	7.57	24.59	9.70	27.60	1.28	1.12
	C.200.0.P	12.54	17.76	14.99	20.35	1.20	1.15
	C.200.120.N	6.11	21.63	9.27	23.95	1.52	1.11
	C.200.120.P	11.12	14.26	11.70	18.30	1.05	1.28
	Ortalama					1.18	1.21
L=1500 mm	C.0.0	121.79	233.0	119.6	296.15	0.98	1.27
	C.0.360	26.05	29.85	26.09	39.06	1.00	1.31
	C.100.180.N	11.80	41.51	12.91	49.00	1.09	1.18
	C.100.180.P	17.50	41.10	19.46	39.60	1.11	0.96
	C.200.0.N	9.80	21.45	8.74	22.65	0.89	1.06
	C.200.0.P	10.38	25.70	13.00	22.68	1.25	0.88
	C.200.120.N	6.91	20.25	8.53	22.85	1.23	1.13
	C.200.120.P	10.00	16.89	12.70	17.50	1.27	1.04
	Ortalama					1.10	1.10

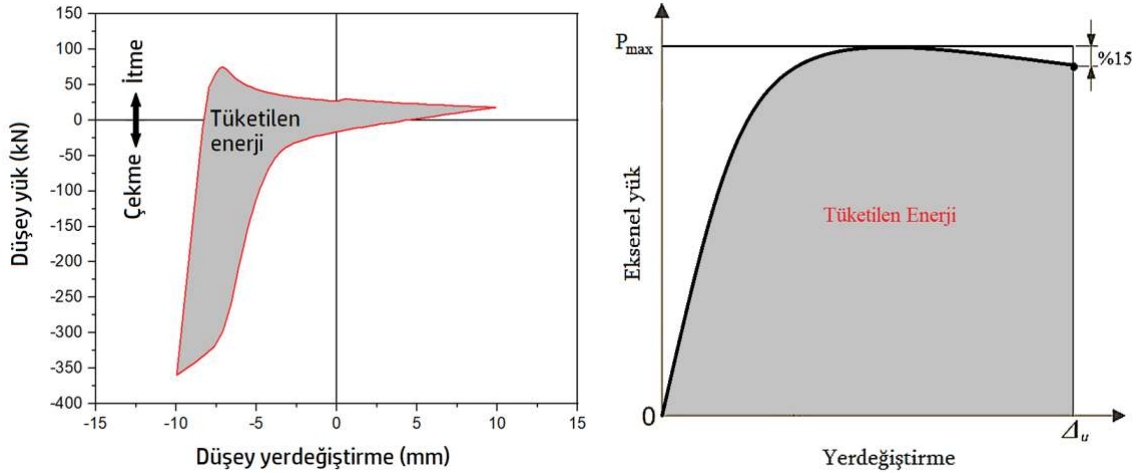
Tersinir-tekrarlı yüklem numuneleri arasından C.0.0 aksenal yüklem numunesi ve en büyük eksantrisiteye sahip olan C.0.360, C.100.180.N, C.100.180.P, C.200.0.N,

C.200.0.P, C.200.120.N ve C.200.120.P numunelerinin yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerinin basınç bölgelerini kapsayan zarf eğrileri kullanılarak, daha önce bahsedilen ve Park (1989)'da verilen yöntemle göre hesaplanmış süneklik oranları, maksimum yerdeğiştirme ve akma yerdeğiştirmesi miktarları da aşağıdaki Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. Tersinir-tekrarlı yüklemeli deney ve analiz sonuçlarından belirlenen süneklik oranları

Boy	Yükleme	Deney			Analiz			Analiz/Deney
		Δu (mm)	Δy (mm)	Süneklik oranı	Δu	Δy	Süneklik oranı	
				$(\Delta u / \Delta y)$	(mm)	(mm)	$(\Delta u / \Delta y)$	
L=500 mm	C.0.0	3.10	2.17	1.43	1.24	0.90	1.38	0.97
	C.0.360	11.05	8.16	1.35	5.18	3.06	1.69	1.25
	C.100.180.N	5.44	3.49	1.56	4.90	1.94	2.52	1.62
	C.100.180.P	10.30	6.16	1.67	10.90	4.51	2.42	1.45
	C.200.0.N	7.01	3.95	1.77	11.55	5.92	1.95	1.10
	C.200.0.P	24.70	9.78	2.53	28.05	10.10	2.78	1.10
	C.200.120.N	8.36	5.69	1.47	11.64	5.78	2.02	1.37
	C.200.120.P	24.50	9.20	2.66	28.00	10.07	2.78	1.04
	Ortalama			1.81			2.19	1.24
L=1000 mm	C.0.0	2.85	1.75	1.63	1.15	1.00	1.16	0.71
	C.0.360	12.41	8.11	1.53	5.50	5.08	1.08	0.71
	C.100.180.N	8.20	4.50	1.82	8.05	4.71	1.71	0.94
	C.100.180.P	11.50	7.44	1.55	14.59	10.59	1.38	0.89
	C.200.0.N	9.50	7.59	1.25	13.65	8.68	1.57	1.26
	C.200.0.P	37.60	14.88	2.53	57.12	17.55	3.25	1.29
	C.200.120.N	9.98	7.27	1.37	10.26	8.34	1.23	0.90
	C.200.120.P	40.30	14.44	2.79	47.48	18.41	2.58	0.92
	Ortalama			1.81			1.75	0.95
L=1500 mm	C.0.0	2.00	1.65	1.21	2.01	1.79	1.12	0.92
	C.0.360	12.00	10.34	1.16	7.84	7.45	1.05	0.91
	C.100.180.N	6.55	5.78	1.13	5.98	5.31	1.13	0.99
	C.100.180.P	26.18	17.20	1.52	22.10	9.53	2.32	1.53
	C.200.0.N	15.65	13.08	1.20	14.40	11.18	1.29	1.08
	C.200.0.P	48.30	6.60	7.32	59.70	21.76	2.74	0.37
	C.200.120.N	14.36	9.70	1.48	15.90	11.91	1.34	0.90
	C.200.120.P	39.15	19.56	2.00	55.50	20.93	2.65	1.32
	Ortalama			2.13			1.70	1.01

Aşağıdaki Şekil 176'da tersinir-tekrarlı analizlerden (a) ve monotonik analizlerden (b) elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin bir çevriminde tüketilen enerji miktarı gösterilmiştir. Her bir çevrimde tüketilen enerji miktarı ise değişen yükleme durumlarına ve numune boylarına göre ayrı ayrı hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılmıştır.



a) Tersinir-tekrarlı yükleme eğrisi

b) Monotonik yükleme eğrisi

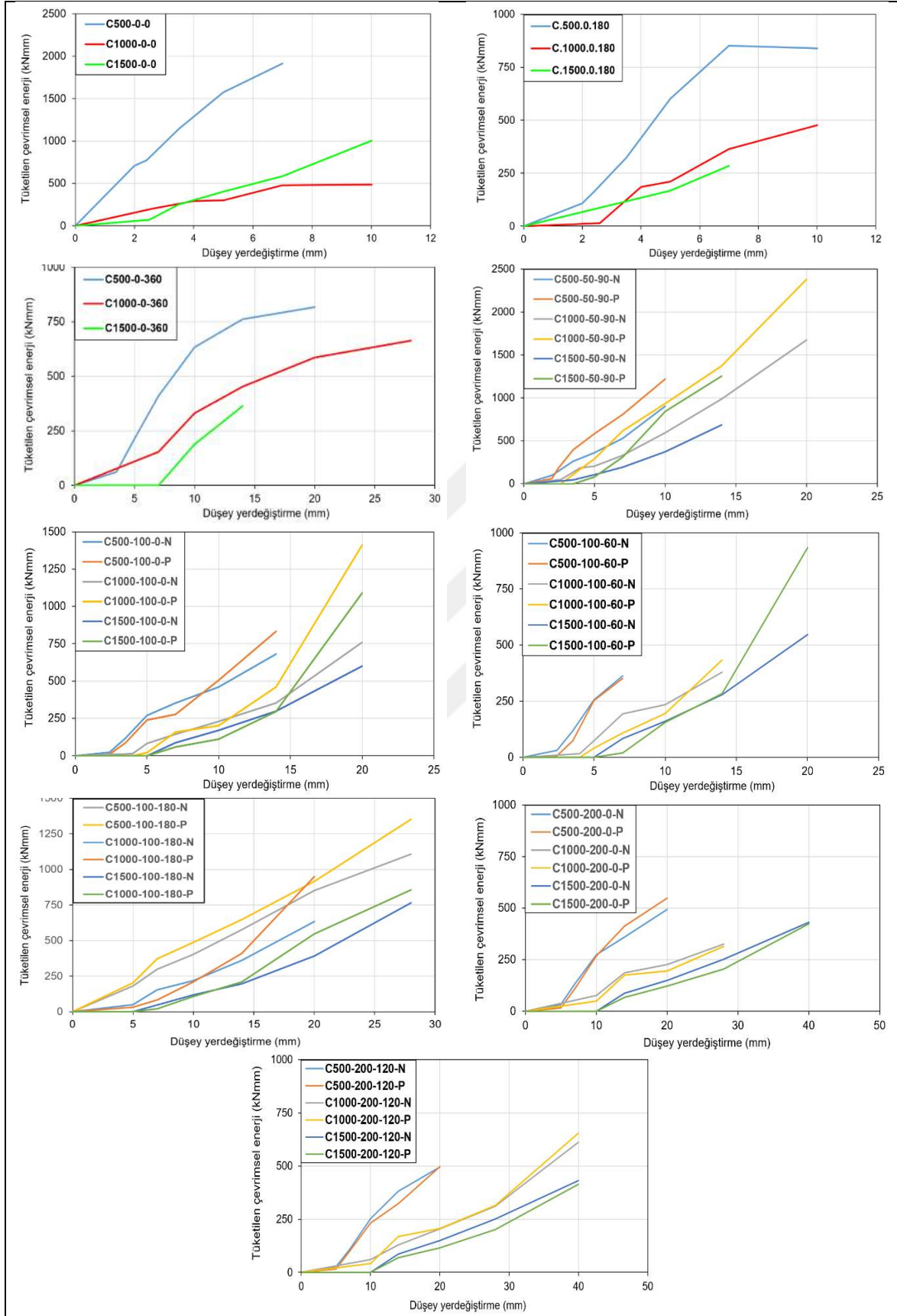
Şekil 176. Bir çevrimde tüketilen enerji miktarının hesaplanması

- Tersinir-tekrarlı yükler altında deneysel olarak incelenen 500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %7, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %42, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %81 daha fazladır. 1000 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %15 az, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %102, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %103 daha fazladır. 1500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %42 az, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden 6 katı, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %35 fazla olmuştur.
- Tersinir-tekrarlı yükler altında sayısal olarak incelenen 500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %4 az, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %42, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %38 fazla olmuştur. 1000 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %19 az, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %107, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %110 daha fazladır. 1500 mm boyundaki M.100.180.P numunesinin sünekliği M.100.180.N numunesinden %106, M.200.0.P numunesinin sünekliği M.200.0.N numunesinden %113, M.200.120.P numunesinin sünekliği M.200.120.N numunesinden %99 fazla olduğu görülmüştür.

- Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, tersinir-tekrarlı yükler altındaki süneklikler ile monotonik yükler altındaki sünekliklerin karşılaştırıldığında, 500 mm boyundaki tersinir-tekrarlı numunelerin süneklikleri ortalama %22 daha az, 1000 mm boyundaki numunelerde ortalama % 2 daha fazla, 1500 mm boyundaki numunelerde ise %21 daha az olduğu hesaplanmıştır.
- Sayısal çalışmaya göre, tersinir-tekrarlı yükler altındaki süneklikler ile monotonik yükler altındaki sünekliklerin karşılaştırıldığında, 500 mm boyundaki tersinir-tekrarlı numunelerin süneklikleri ortalama %22 daha az, 1000 mm boyundaki numunelerde ortalama % 9 daha fazla, 1500 mm boyundaki numunelerde ise %25 daha az olmuştur.
- Tersinir-tekrarlı yükler altındaki numunelerin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi sonucunda en yüksek enerji tüketme miktarının 500 mm boyunda C.200.120.P numunesinde, 1000 mm boyunda C.200.0.P numunesinde ve 1500 mm boyunda ise C.200.0.P numunesinde olduğu görülmüştür.

Aşağıdaki Şekil 177’de 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boyundaki numunelerin analiz sonuçlarından elde edilen toplam enerji tüketme miktarlarının düşey yüklerle değişimi verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi numune boyu arttıkça her bir çevrimde tüketilen enerji miktarı azalmaktadır.

Deprem yüklerine maruz hafif çelik yapıların tasarımı genel olarak, kaplamalı kesme duvarları gibi diyaframlara ya da şerit çaprazlar gibi yatay yük taşıyan alt yapısal sistemlerin kapasitesine dayanmaktadır. Ancak, hafif çelik yapıların performansa dayalı tasarımında kullanılacak modellerin, birleşimlerin, tekil elemanların ve nihai olarak yapının lineer olmayan tersinir-tekrarlı davranışını hesaplayabilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, bu modellerin de deprem yükleri altındaki hafif çelik eleman kesitlerinde burkulma ve kesit deformasyonları nedeniyle meydana gelen enerji sönümleme davranışını barındırması gerekmektedir. Güncel literatürde, hafif çelik yapıların performansa dayalı tasarım kurallarının geliştirilebilmesi için üç aşama takip edilmektedir. Bunlar, yatay yük taşıyan kesme duvarların, tersinir-tekrarlı elemanların, vidalı birleşimlerin ve tüm yapının testleri, karakterizasyonu ve modellenmesidir. Bu çalışmaların kapsamı ve hedefi değerlendirildiğinde, bu tez çalışması kapsamında, sigma profillerin tersinir-tekrarlı yük-yerdeğiştirme ve enerji tüketme davranışlarının elde edilmesi de farklı kesitlerdeki hafif çelik profillerin karakterizasyonu için önemli hale gelmektedir.



Şekil 177. Tersinir-tekrarlı yükleme analizlerine göre C numunelerinin enerji tüketimi

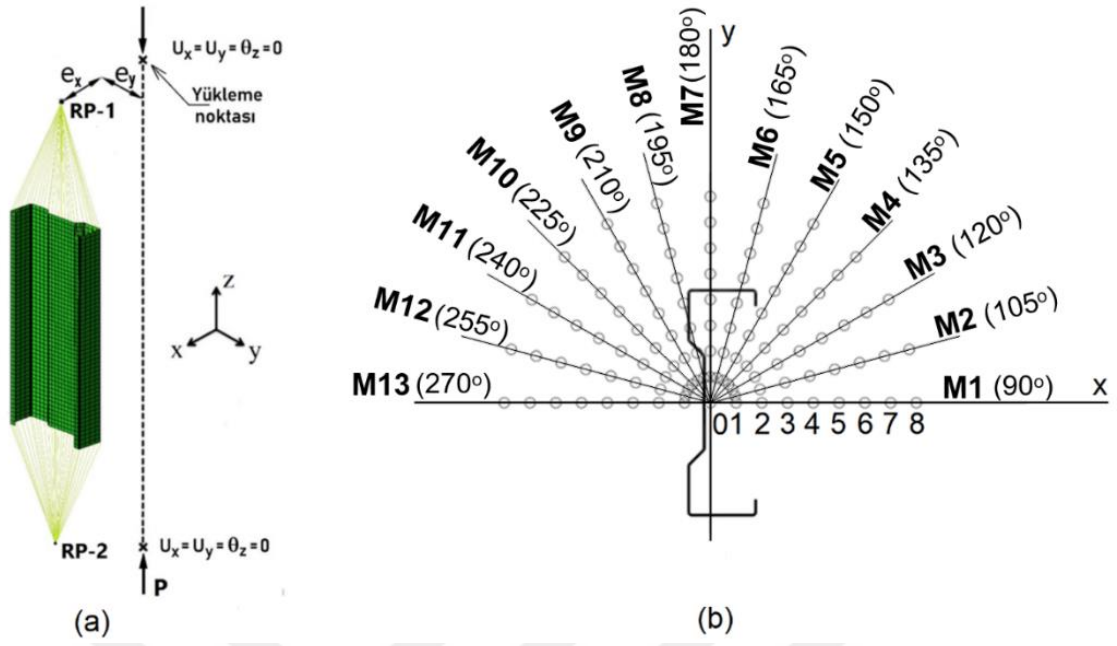
3.8. Parametrik Çalışma

Bu çalışma kapsamında yürütülen parametrik çalışmalar iki grup altında toplanmıştır. Öncelikle, 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boyundaki deney numuneleri kullanılarak yürütülen parametrik çalışmaya ait sonuçlar ardından ise farklı kesit özelliklerine sahip 500 mm ve 2000 mm boyundaki 20 farklı sigma profil üzerinde yürütülen parametrik çalışmaya ait bilgiler sunulmuştur.

3.8.1 Deney Numuneleri Üzerinde Yürütülen Parametrik Çalışma

Eksantrik yüklü hafif çelik sigma profillerin eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmesi etkilerinin birlikte bulunduğu yükleme durumları altındaki davranışını incelemek için gerçekleştirilen deneysel çalışma ve bu deneysel çalışmayı temsil eden sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları önceki bölümlerde verilmiştir. Bu bölümde ise, boyları 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm olan deneysel çalışmada kullanılan aynı enkesit ve boylardaki hafif çelik sigma profil üzerinde, deneysel çalışmadaki 15 adet yükleme noktası yerine bu kez 105 yükleme noktası kullanılarak geniş kapsamlı bir parametrik çalışma verilmektedir. Parametrik çalışma kapsamında kullanılan sonlu eleman modeline ait yükleme koşulları ve yükleme noktaları aşağıdaki Şekil 178’de görülmektedir. Sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri daha önceki bölümlerde anlatılan sonlu eleman modeliyle aynıdır. Sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen yük taşıma kapasiteleri, CUFSM yazılımıyla hesaplanan ve kesiti akmaya ulaştıran eksenel yük (P_y), kuvvetli (M_{xy}) ve zayıf eksen (M_{yy}) eğilmelerine bölünerek normalleştirilmiştir. Daha sonra, normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerlerinin aşağıdaki 11 nolu bağıntıda gösterildiği gibi karekökleri toplanarak üç boyutlu uzayda bir β noktası elde edilmiştir. Her bir analiz sonucunda elde edilen β noktalarının birleştirilmesiyle hafif çelik sigma profilin dayanım uzayı oluşturulmuştur.

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{P}{P_y}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{yy}}\right)^2} \quad (11)$$



Şekil 178. Parametrik çalışmadaki modelin mesnet koşulları (a) ve yükleme noktaları (b)

Tablo 13. Parametrik modellemeye uygulanan yükleme noktaları ve koordinatları

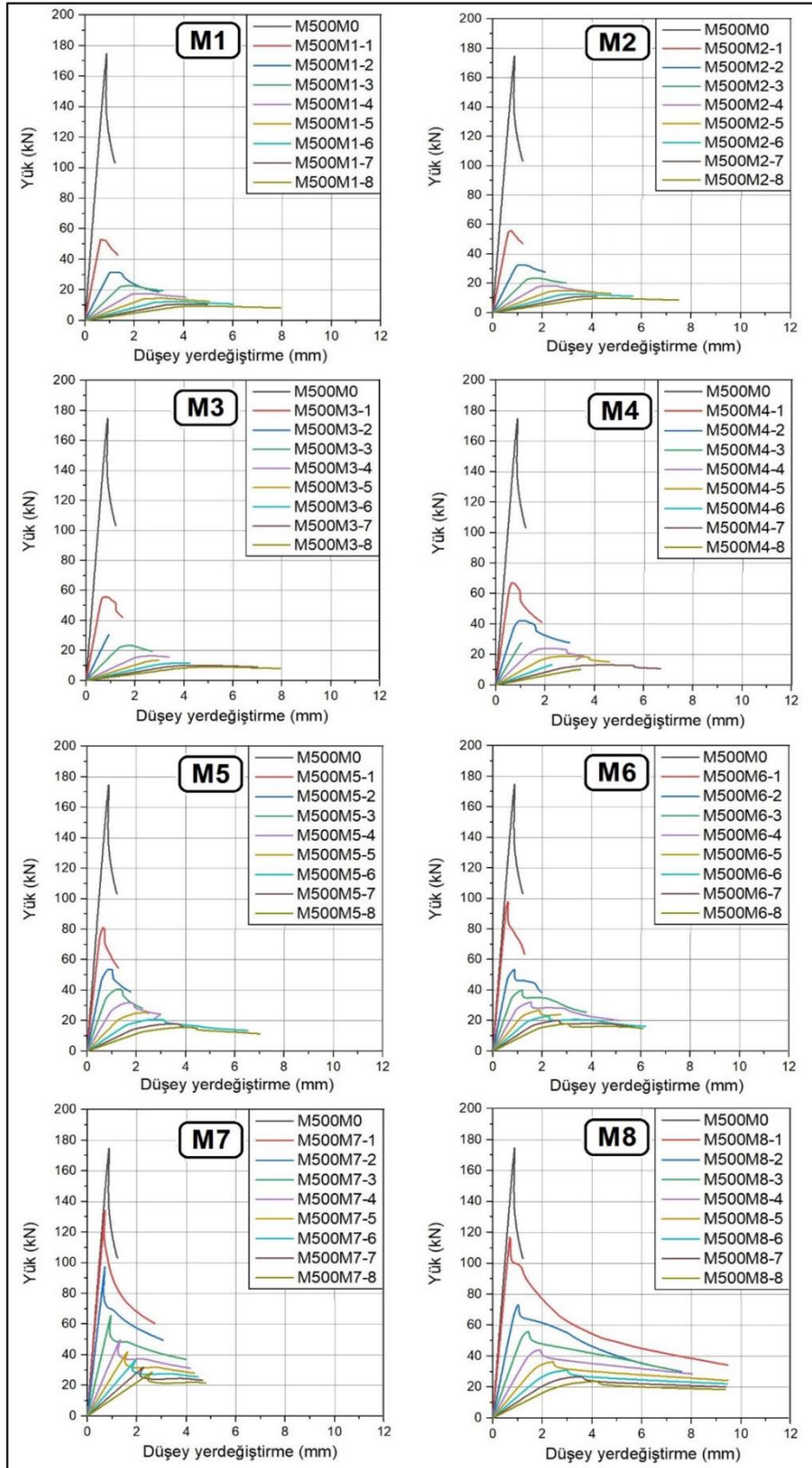
Doğrultu	Açı	Eksantrisite	Koordinat (mm)							
M0	0°		Eksenel yükleme							
M1	90°	e _x	25	50	75	100	125	150	175	200
		e _y	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	105°	e _x	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
		e _y	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
M3	120°	e _x	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
		e _y	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
M4	135°	e _x	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
		e _y	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
M5	150°	e _x	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
		e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
M6	165°	e _x	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
		e _y	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
M7	180°	e _x	0	0	0	0	0	0	0	0
		e _y	25	50	75	100	125	150	175	200
M8	195°	e _x	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
		e _y	-6.47	-12.94	-19.41	-25.88	-32.35	-38.82	-45.29	-51.76
M9	210°	e _x	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
		e _y	-12.50	-25.00	-37.50	-50.00	-62.50	-75.00	-87.50	-100.00
M10	225°	e _x	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
		e _y	-17.68	-35.36	-53.03	-70.71	-88.39	-106.07	-123.74	-141.42
M11	240°	e _x	12.50	25.00	37.50	50.00	62.50	75.00	87.50	100.00
		e _y	-21.65	-43.30	-64.95	-86.60	-108.25	-129.90	-151.55	-173.21
M12	255°	e _x	6.47	12.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
		e _y	-24.15	-48.30	-72.44	-96.59	-120.74	-144.89	-169.04	-193.19
M13	270°	e _x	0	0	0	0	0	0	0	0
		e _y	-25	-50	-75	-100	-125	-150	-175	-200

Yukarıdaki Tablo 13'te parametrik çalışma kapsamında kullanılan ve Şekil 178'de şematik olarak gösterilen yükleme noktalarının sigma profil enkesitinin ağırlık merkezine göre olan eksantrisite (koordinatları) gösterilmektedir.

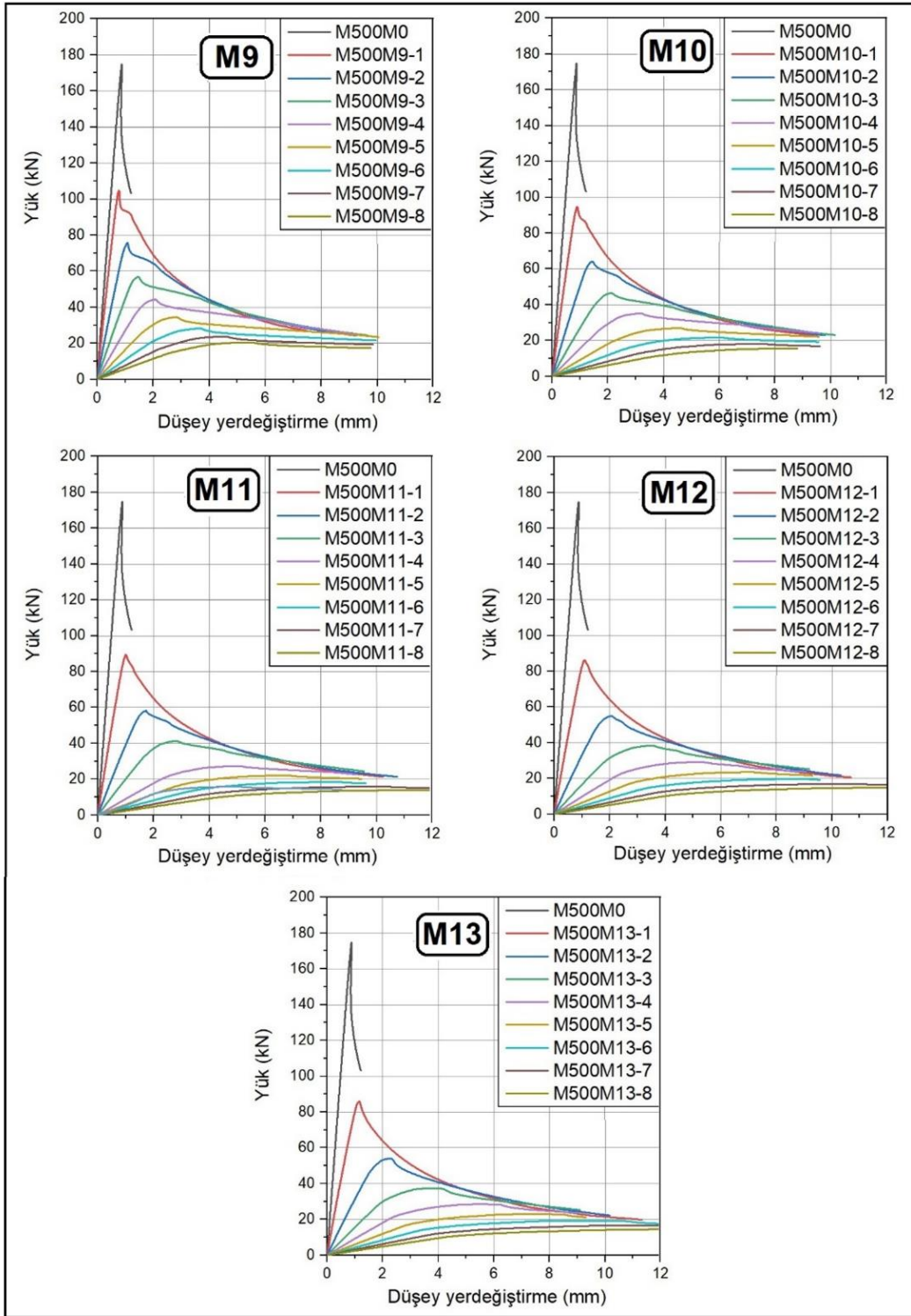
Aşağıda, M500, M1000 ve M1500 modellerinin M0 eksenel yüklemesiyle birlikte M1-M13 doğrultularındaki noktalardan monotonik yüklenerek gerçekleştirilen sonlu eleman analiz sonuçları verilmektedir. Verilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinde M, monotonik yüklemeyi, 500, numune boyunu M1, yükleme doğrultusunu, 0-8 ise ağırlık merkezinden dışa doğru sıralanan yükleme nokta numarasıdır.

3.8.1.1 L=500 mm'lik Elemanlar

Sigma profil modellerinin Tablo 13'te verilen eksantrisitelere göre yapılan monotonik yüklemeler altındaki analizleri sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri eksenel yükleme olan M0 ile birlikte M1-M13 doğrultularındaki tüm yükleme noktaları için Şekil 179'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, eksantrisitenin artmasıyla birlikte tüm profillerde sünekliğin arttığı ve kırışe yakınsayan bir davranışın ortaya çıktığı görülmüştür.

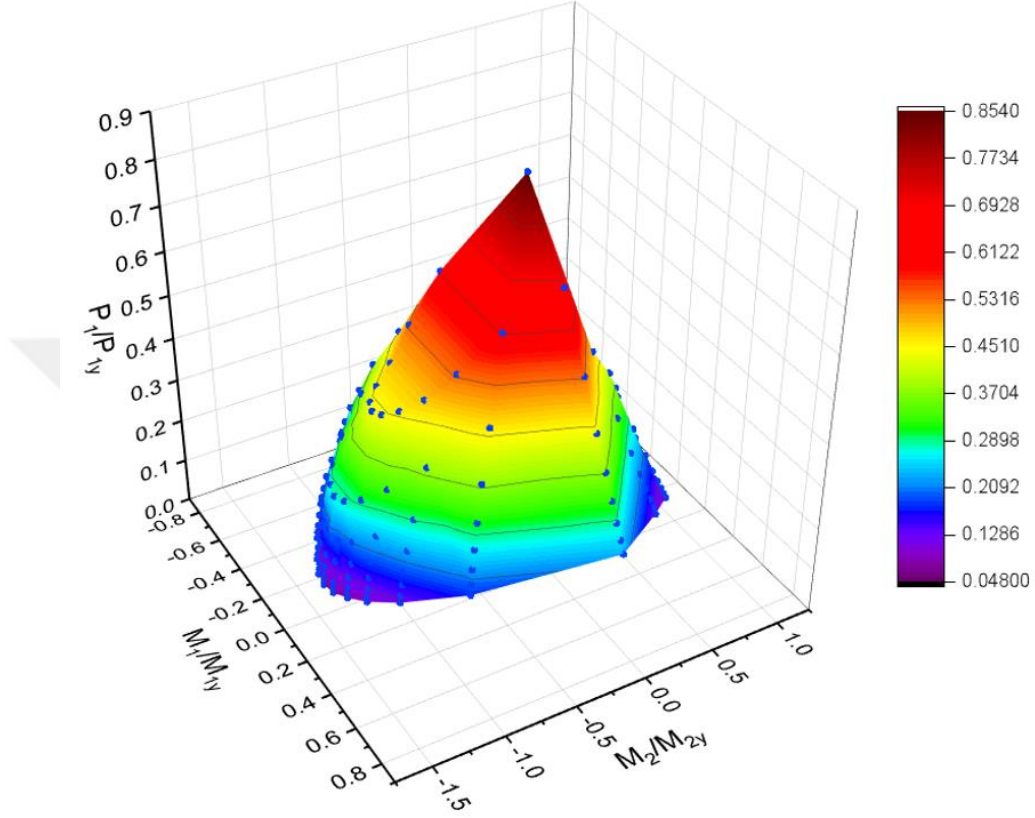


Şekil 179. M500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 179 (Devam). M500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri

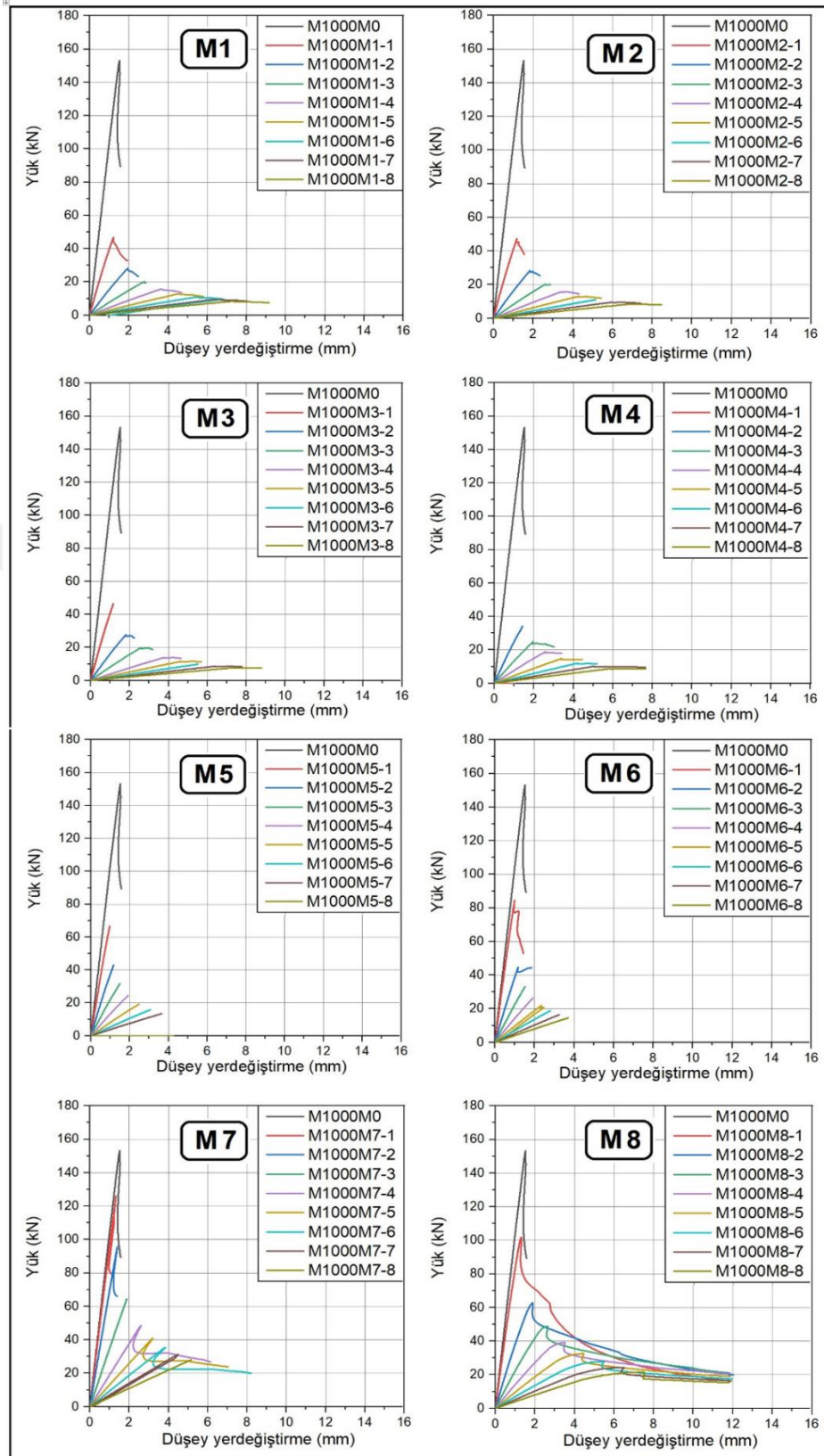
Aşağıdaki Şekil 180’de 500 mm boyundaki numuneler üzerinde gerçekleştirilen her bir sonlu eleman analizi sonucunda bulunan normalleştirilmiş yük taşıma kapasitelerinden elde edilen dayanım uzayı verilmiştir.



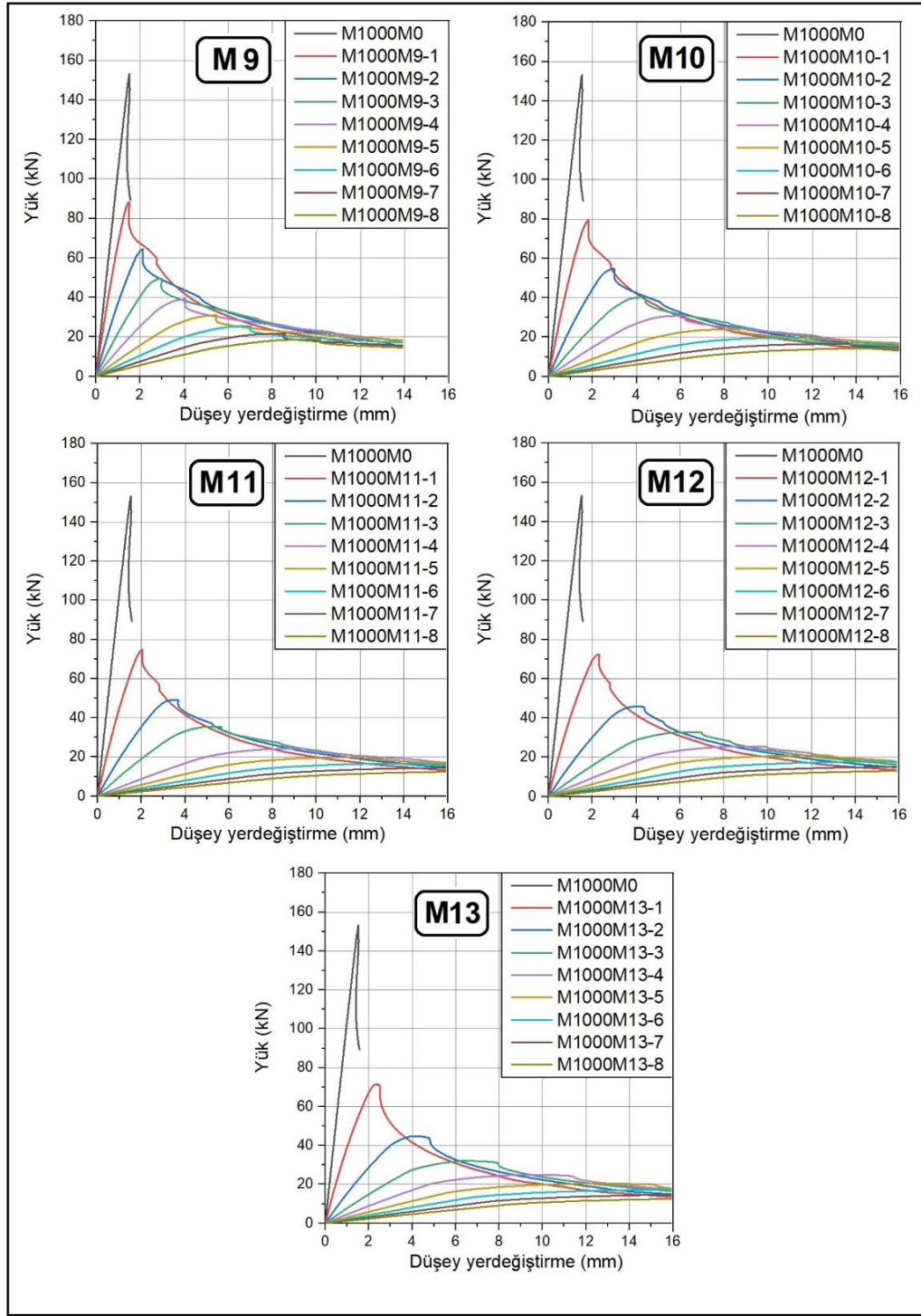
Şekil 180. L=500 modelinin dayanım uzayı

3.8.1.2. L=1000 mm’lik Elemanlar

Boyları 1000 mm olan profil modellerinin eksenel yükleme olan M0 ile birlikte M1-M13 doğrultularındaki tüm yükleme noktaları için monotonik yükleme altındaki analizlerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 181’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eksantrisitenin artmasıyla birlikte tüm sigma profillerde sünekliğin arttığı ve kirişe yakınsayan bir davranışın ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak 1000 mm boyundaki numunelere ait eğriler incelendiğinde 500 mm boyundaki profillerden farklı olarak sünekliğin daha az arttığı görülmüştür.

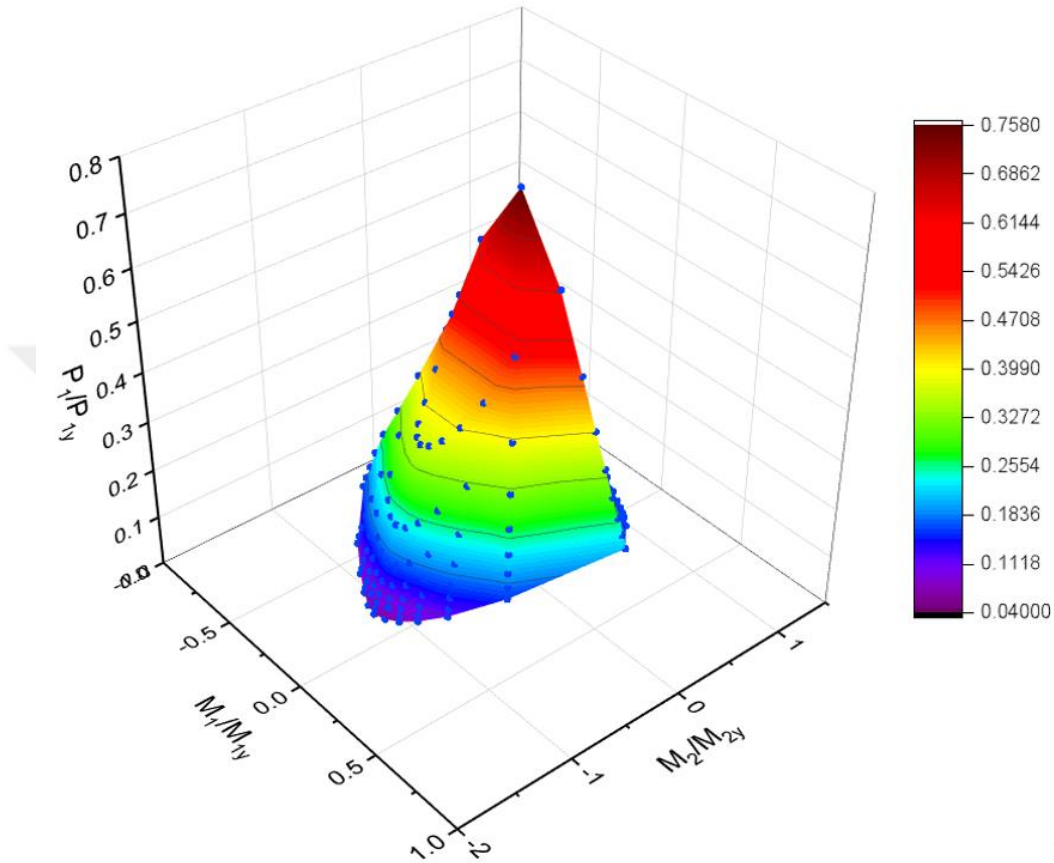


Şekil 181. M1000 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 181 (Devam). M1000 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri

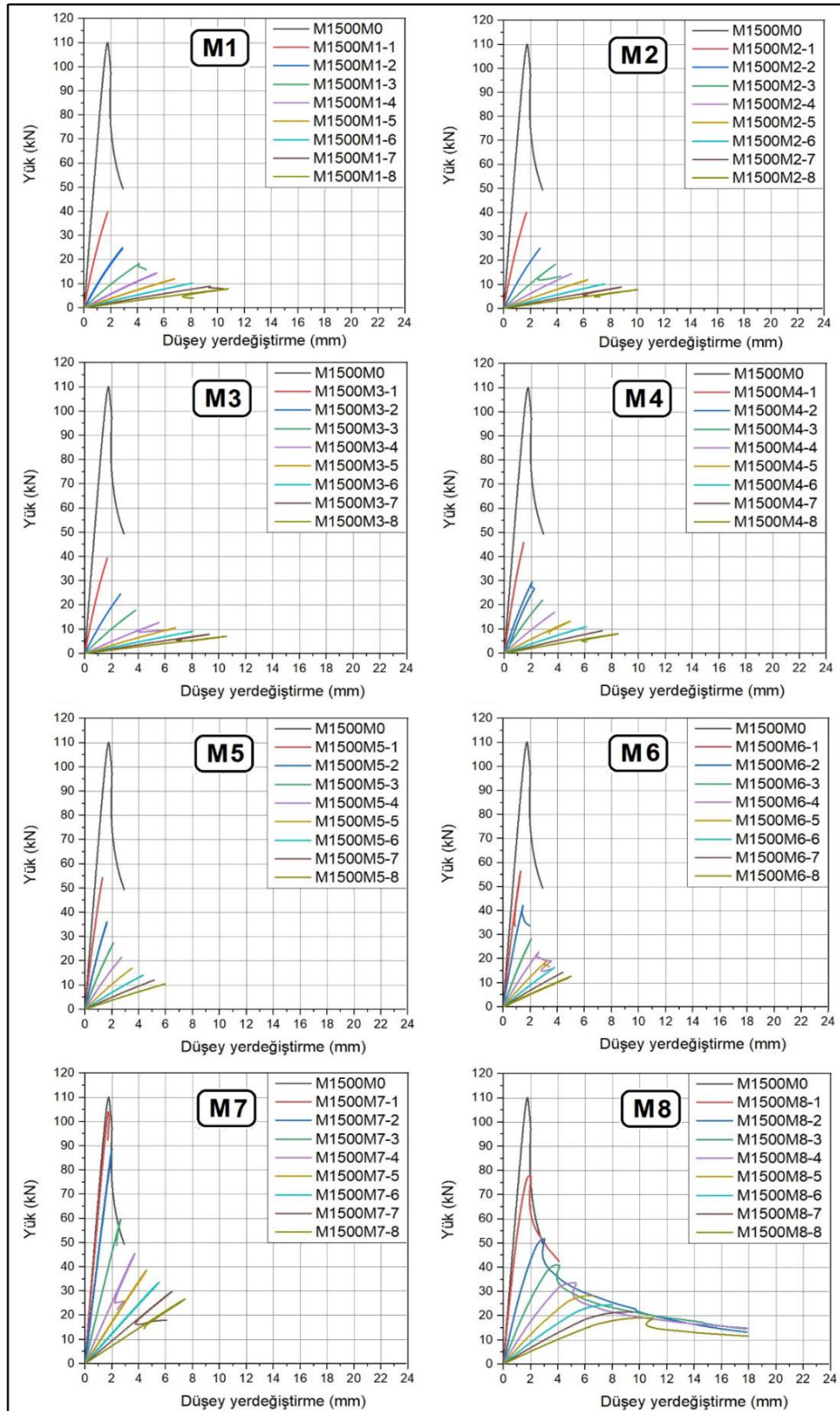
Aşağıdaki Şekil 182’de, 1000 mm boyundaki modeller üzerinde gerçekleştirilen her bir sonlu eleman analizi sonucunda bulunan normalleştirilmiş yük taşıma kapasitelerinden elde edilen dayanım uzayı verilmiştir.



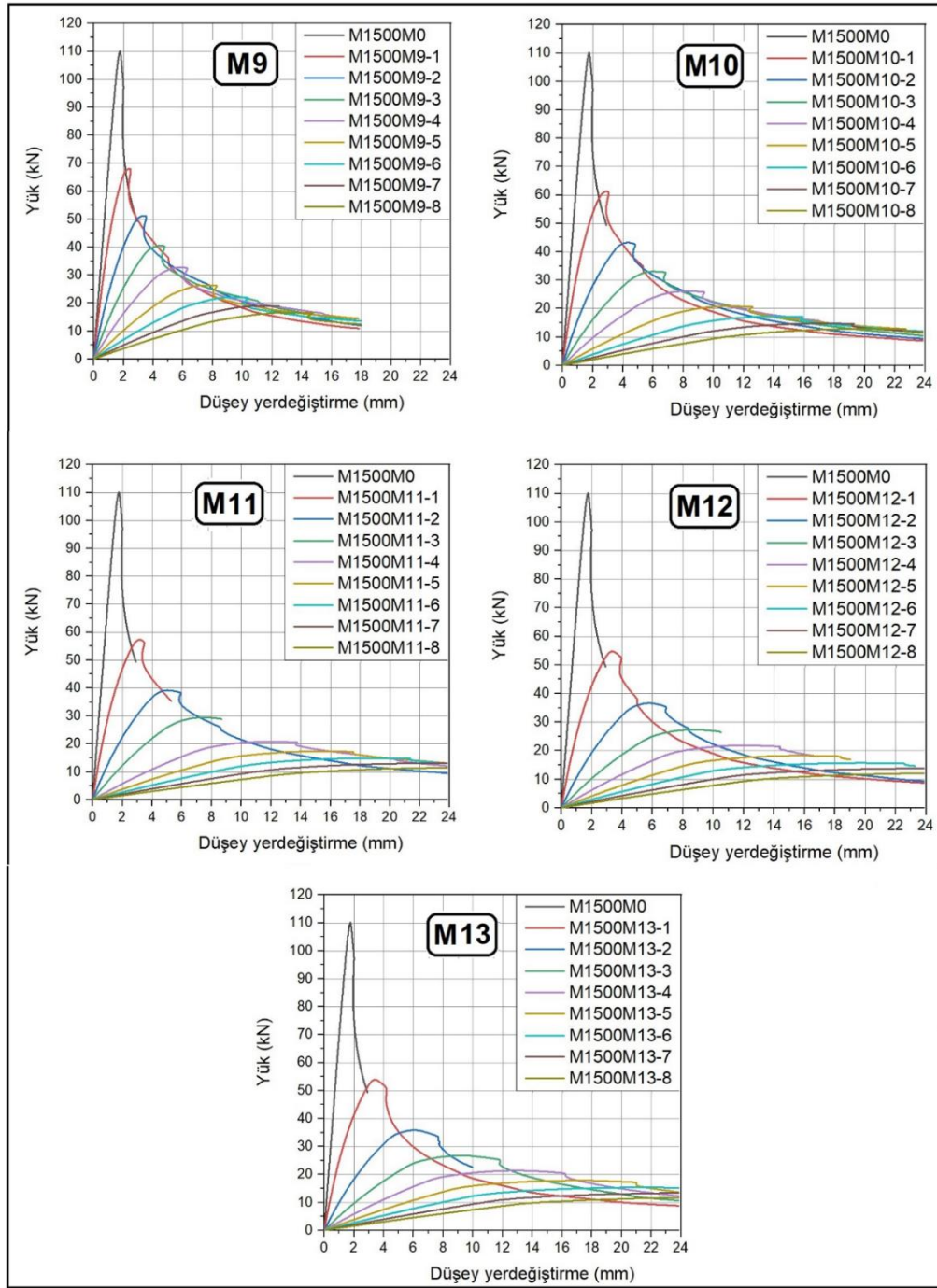
Şekil 182. L=1000 modelinin dayanım uzayı

3.8.1.3. L=1500 mm’lik Elemanlar

Boyları 1500 mm olan profil modellerinin eksenel yükleme olan M0 ile birlikte M1-M13 doğrultularındaki tüm yükleme noktaları için monotonik yükleme altındaki analizlerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 183’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eksantrisitenin artmasıyla birlikte tüm sigma profillerde sünekliğin arttığı ve kirişe yakınsayan bir davranışın ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak 1500 mm boyundaki modellere ait eğriler incelendiğinde 500 mm ve 1000 mm boyundakilerden farklı olarak sünekliğin daha az arttığı görülmüştür.

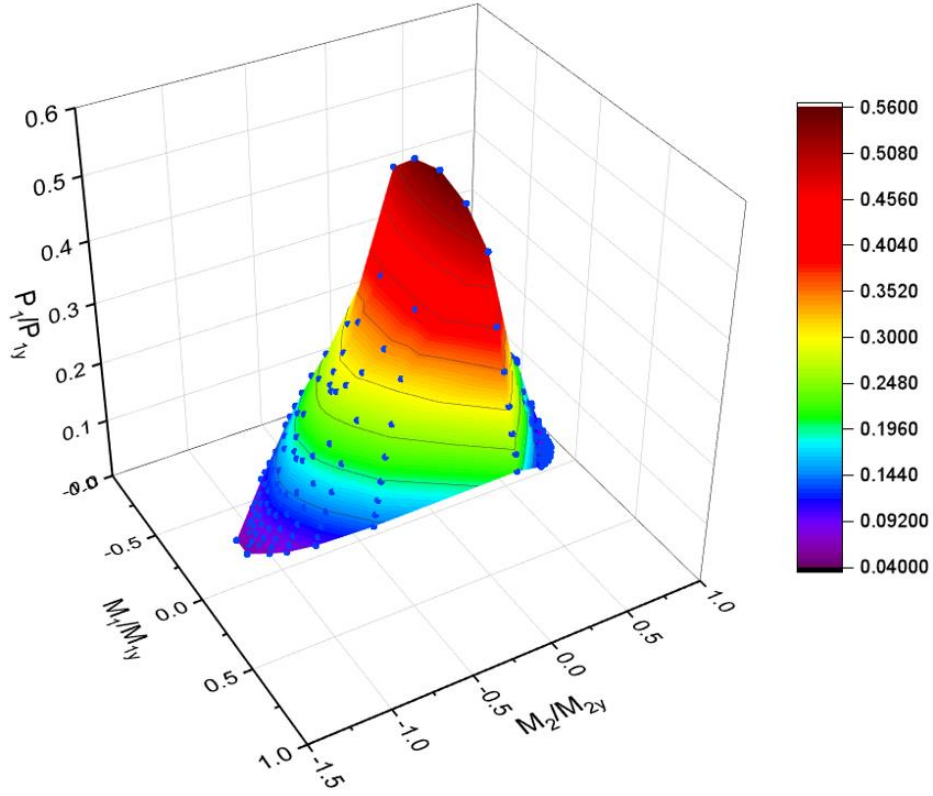


Şekil 183. M1500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 183 (Devam). M1500 modelinin tüm yükleme noktaları için belirlenen yük-yerdeğiştirme eğrileri

Aşağıdaki Şekil 184’te, 1500 mm boyundaki numune modelleri üzerinde gerçekleştirilen her bir sonlu eleman analizi sonucunda bulunan normalleştirilmiş yük taşıma kapasitelerinden elde edilen dayanım uzayı verilmiştir.

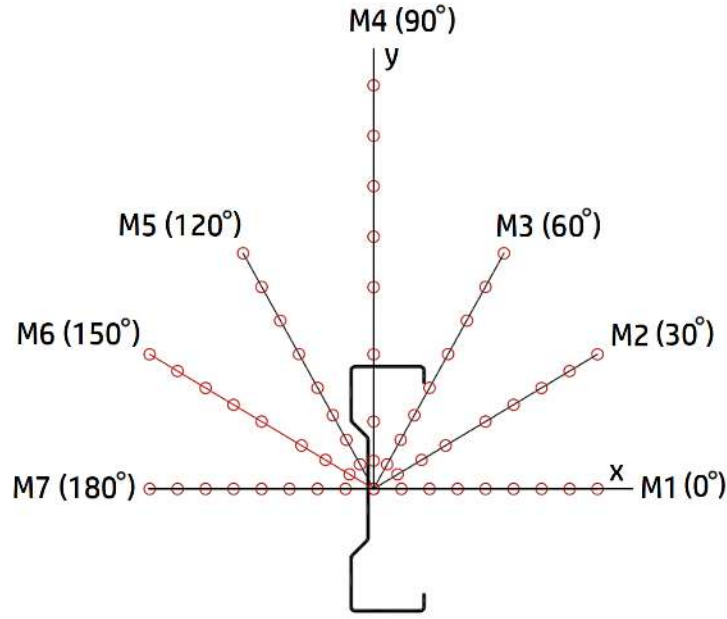


Şekil 184. L=1500 modelinin dayanım uzayı

3.8.2. Farklı Kesitli Sigma Profiller Üzerinde Yürütülen Parametrik Çalışma

Hafif çelik sektöründeki üretici firmaların kataloglarından seçilen hafif çelik sigma profillerin kesit özellikleri Şekil 185’te gösterilmiştir. Eksenel yük altındaki ve iki ucu mafsallı olarak mesnetlenen sigma profillerin kesit ölçüleri, kritik burkulma yükü ve boyları Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’da profiller için yapılan isimlendirmeye göre sırasıyla, “S “sigma profili, XXX-X.X kesitin yüksekliğini (H, mm) ve kalınlığını (t, mm) ifade etmektedir. Hafif çelik sigma profillerin 500 mm ve 2000 mm boyundaki numuneleri üzerinde yerel, çarpılma ve genel burkulma davranışları incelenmiştir. Tüm kesitler genişlikleri 500 mm olan sacdan imal edilmiş olup aynı kalınlıklar için aynı miktarda malzeme kullanılarak üretilmişlerdir.

Kalınlıkları 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm ve 4 mm, boyları ise 500 mm ve 2000 mm olan 20 farklı hafif çelik sigma profil üzerinde sonlu eleman analizleriyle parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüklemler Şekil 186’da görülen için aralarında 30° açı bulunan



Şekil 186. Eksantrik yükleme doğrultuları ve yükleme noktaları

Tablo 15. Eksenel yük ve eğilme momenti uygulanan eksantrisite noktaları

Açı	Yükleme Doğrultusu	Eksantrisite Yönü	Eksantrisite (mm)							
			25	50	75	100	125	150	175	200
0°	M1	e_x	25	50	75	100	125	150	175	200
		e_y	0	0	0	0	0	0	0	0
30°	M2	e_x	21.4	42.8	64.2	99.9	124.9	149.9	174.9	199.9
		e_y	12.9	25.8	38.7	60.1	75.1	90.1	105.1	120.1
60°	M3	e_x	12.1	24.2	36.3	49.9	66.5	83.2	99.8	116.2
		e_y	21.9	43.8	65.7	90.2	120.2	150.2	180.2	210.3
90°	M4	e_x	0	0	0	0	0	0	0	0
		e_y	25	60	120	180	225	270	315	360
120°	M5	e_x	-12.1	-24.2	-36.3	-49.9	-66.5	-83.2	-99.8	-116.2
		e_y	21.9	43.8	65.7	90.2	120.2	150.2	180.2	210.3
150°	M6	e_x	-21.4	-42.8	-64.2	-99.9	-124.9	-149.9	-174.9	-199.9
		e_y	12.9	25.8	38.7	60.1	75.1	90.1	105.1	120.1
180°	M7	e_x	-25	-50	-75	-100	-125	-150	-175	-200
		e_y	0	0	0	0	0	0	0	0

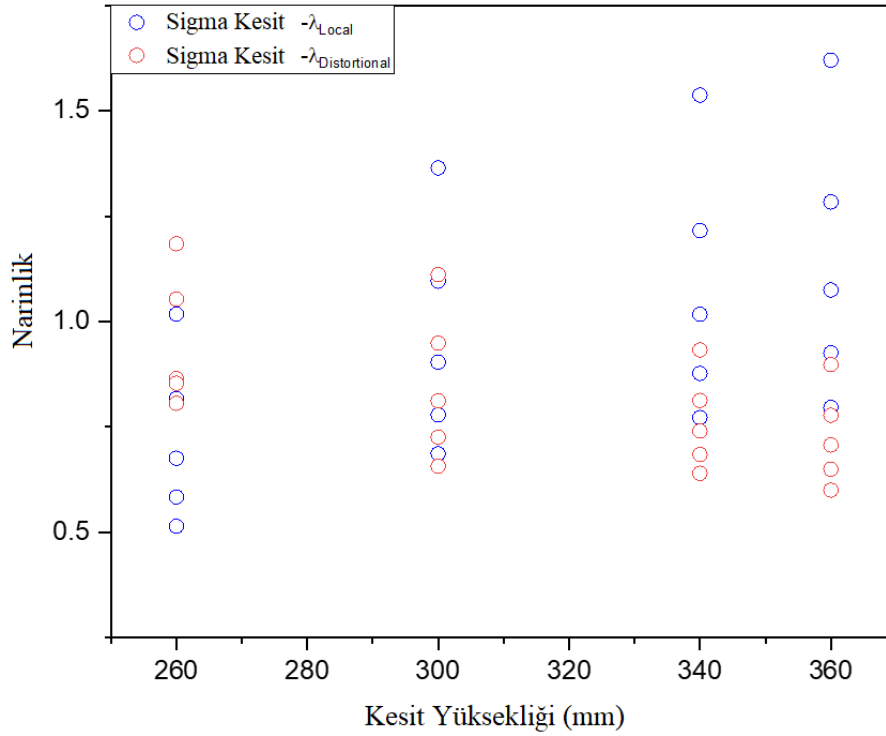
Elemanın her iki ucundaki kesit ağırlık merkezinde oluşturulan referans noktası kullanılarak yukarıdaki Tablo 15'te verilen eksantrisite değerlerine göre bu referans noktasının değiştirilmesiyle numunelere yük uygulanmıştır. Elemanın her iki ucundaki nodların serbestlik dereceleri kiriş tipi MPC (multi point constaraint) kullanılarak referans noktasına bağlanmıştır. Mesnetin bulunduğu uçta tüm yerdeğiştirme ve torsiyon serbestlikleri tutulmuştur, yüklemenin yapıldığı uçta ise benzer olarak ancak yükleme doğrultusunda

yerdeğiştirme serbest bırakılarak diğer serbestlik dereceleri tutulmuştur. Yüklemeler referans noktasından yerdeğiştirme uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 187’te sigma profillerin yerel ve çarpılma burkulması narinliklerinin dağılımı gösterilmiştir. Kolonun genel burkulması için gerekli akma yükü $P_{ne}=P_y$ olarak kabul edilirse, Tablo 10’da verilen profil kesitleri için yerel ve çarpılmalı burkulma narinlik oranları aşağıda verilen bağıntılara göre hesaplanabilmektedir.

$$P_{nG} > P_y, \lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crl}}} \quad (9)$$

$$P_{nG} \leq P_y, \lambda_L = \sqrt{\frac{P_{nG}}{P_{crl}}} \quad (10)$$

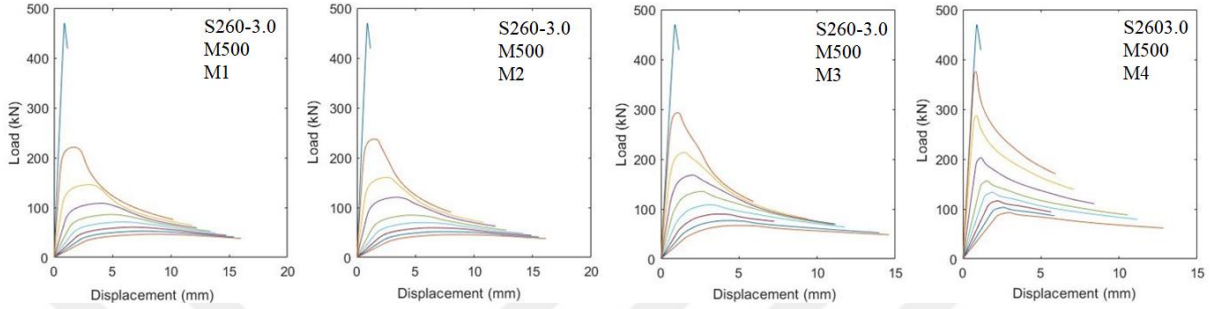


Şekil 187. Seçilen kesitlerin yerel ve çarpılma burkulması narinliklerinin dağılımı

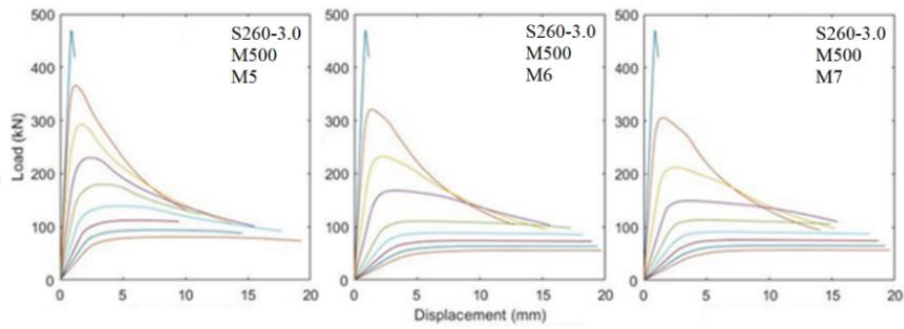
3.8.2.1. L=500 mm’lik Sigma Profillerin Sonuçları

Sigma profillerin yük-yerdeğiştirme davranışını temsil eden eğriler S260-3.0 numunesi üzerinden aşağıdaki Şekil 188 ve Şekil 189’da verilmiştir. Bu davranış,

beklenildiği üzere benzer olarak diğer numunelerde de görüldüğü için tek bir numuneye ait sonuçlar gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere eksantrisite arttıkça süneklik de artarak numune giriş davranışı sergilemiştir. Ayrıca, eksantrisitedeki küçük artışlar bile elemanın yük kapasitesi üzerinde nemli ölçüde etkili olmuştur.



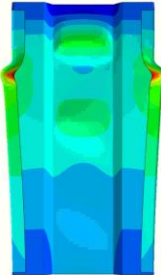
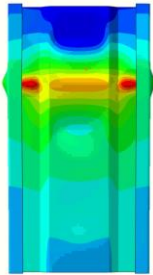
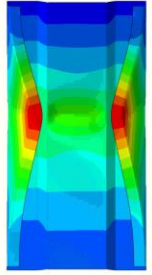
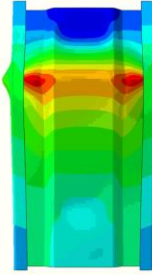
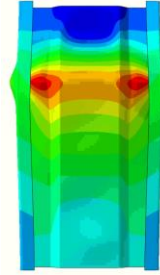
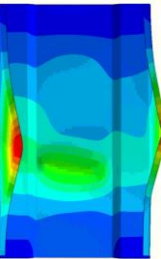
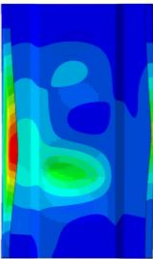
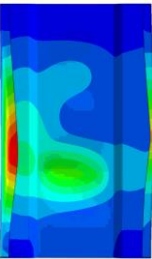
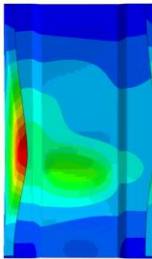
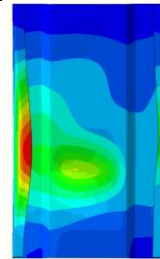
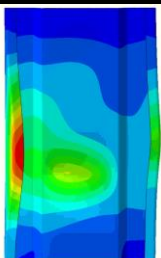
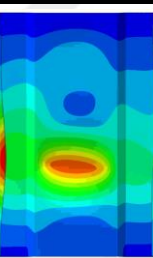
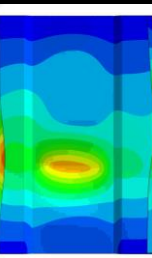
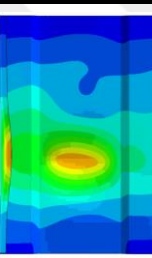
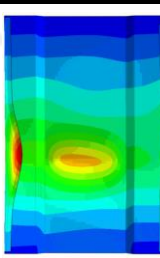
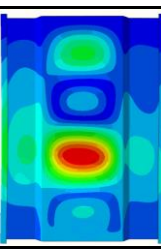
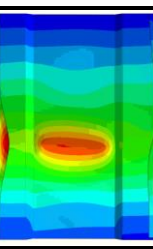
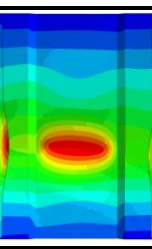
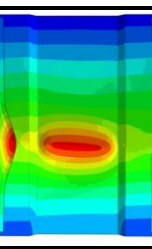
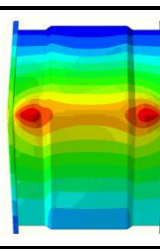
Şekil 188. S260-3.0 numunesinin M1 - M4 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 189. numunesinin M5 – M7 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri

Boyu 500 mm, kalınlıkları ise 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm ve 4 mm olan S260, S300, S340 ve S360 kodlu sigma profillerin aksenal yük altındaki burkulma şekilleri aşağıdaki Tablo 16’da verilmiştir. Profiller üzerinde görünen renk dağılımları oluşan yerdeğiştirmenin bileşke büyüklüğünü temsil etmektedir.

Tablo 16. 500 mm'lik Sigma profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri

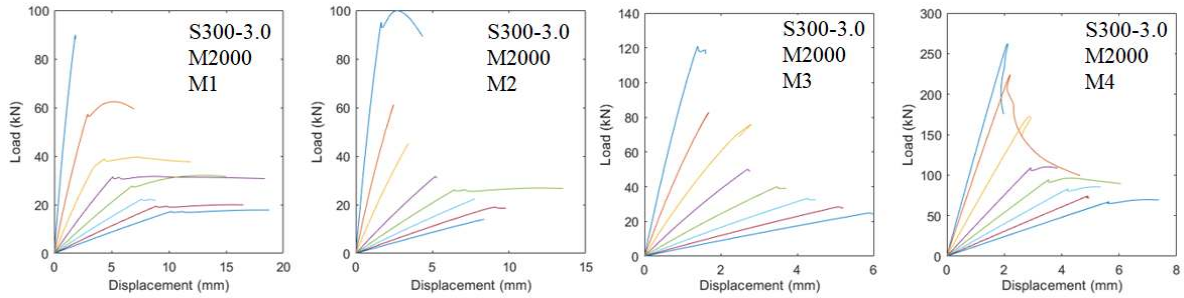
	t=2 mm	t=2.5 mm	t=3 mm	t=3.5 mm	t=4 mm
S260 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	304.46 kN	390.30 kN	470.10 kN	559.21 kN	641.49 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					
S300 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	257.40 kN	350.41 kN	437.24 kN	521.70 kN	609.50 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					
S340 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	249.68 kN	331.88 kN	417.51 kN	503.00 kN	587.33 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					
S360 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	233.34 kN	312.59 kN	39.9 kN	48.37 kN	505.52 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					

Tablo 12’de verilen burkulma şekillerinden görüldüğü üzere eksenel yük altındaki sigma profillerin flanşlarında baskın olarak yerel burkulma gözlemlenmiştir. Profil et kalınlığı 2

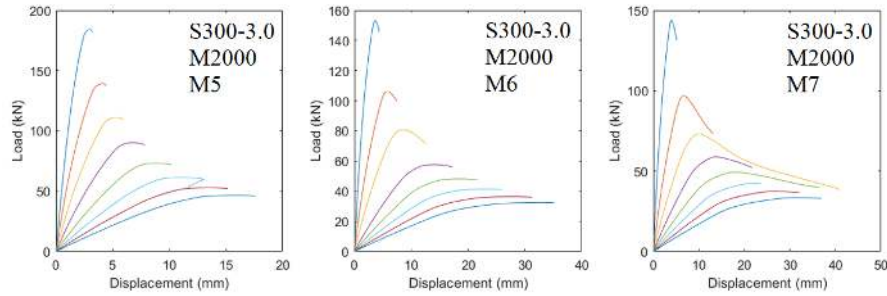
mm'den 4 mm'ye doğru çıkması burkulma davranışını etkilememiş ancak S260 numunesinin flanşlarındaki burkulma diğerlerinin aksine içe doğru oluşmuştur.

3.8.2.2. L=2000 mm'lik Sigma Profillerin Sonuçları

Boyu 2000 mm olan S300-3.0 numunesinin yük-yerdeğiştirme davranışı diğer numunenin davranışını temsilen her yükleme doğrultusu için aşağıdaki Şekil 190 ve Şekil 191'de verilmiştir. Boyları 500 mm olan sigma profillere benzer olarak eksantirsitenin artışının profiling sünekliğinin artırdığı görülmektedir.



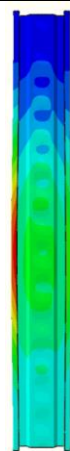
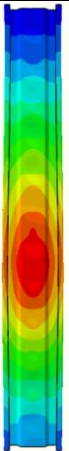
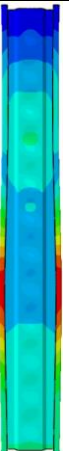
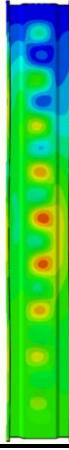
Şekil 190. S300-3.0 numunesinin M1 - M4 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 191. S300-3.0 numunesinin M5–M7 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri

Boyu 2000 mm, kalınlıkları ise 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm ve 4 mm olan S260, S300, S340 ve S360 kodlu sigma profillerin eksenel yük altındakiburkulma şekilleri aşağıdaki Tablo 17'de verilmiştir. Eksenel yük altında 2000 mm boyundaki sigma profiling kesitinde oluşan basınç gerilmesi neticesinde flanşlarda dışa dönük çarpılma burkulması baskın olarak gözlenmiştir.

Tablo 17. 2000 mm'lik sigma profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri

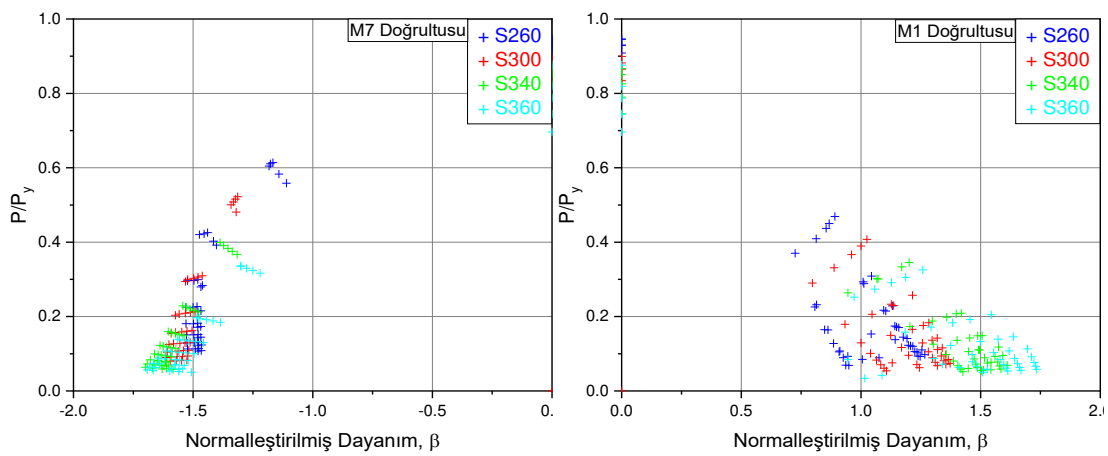
	t=2 mm	t=2.5 mm	t=3 mm	t=3.5 mm	t=4 mm
S260 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	242.28 kN	282.52 kN	408.90 kN	475.32 kN	532.12 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					
S300 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	142.03 kN	193.75 kN	253.27 kN	313.21 kN	431.90 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					
S340 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	109.57 kN	143.84 kN	183.53 kN	222.90 kN	251.71 kN
Kesit Şekildeğiştirmesi					

Tablo 17'nin devamı

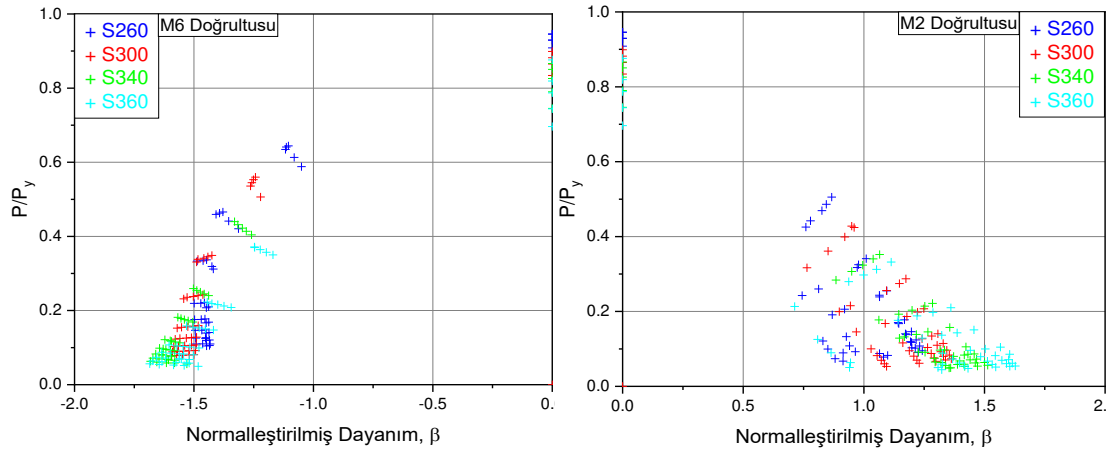
S360 Numunesinin burkulması					
P_{max} (kN)	82.00 kN	109.90 kN	138.85 kN	168.73 kN	203.30 kN
Kesit Şekil değişimi					

3.8.2.3. Sigma Profillerin Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

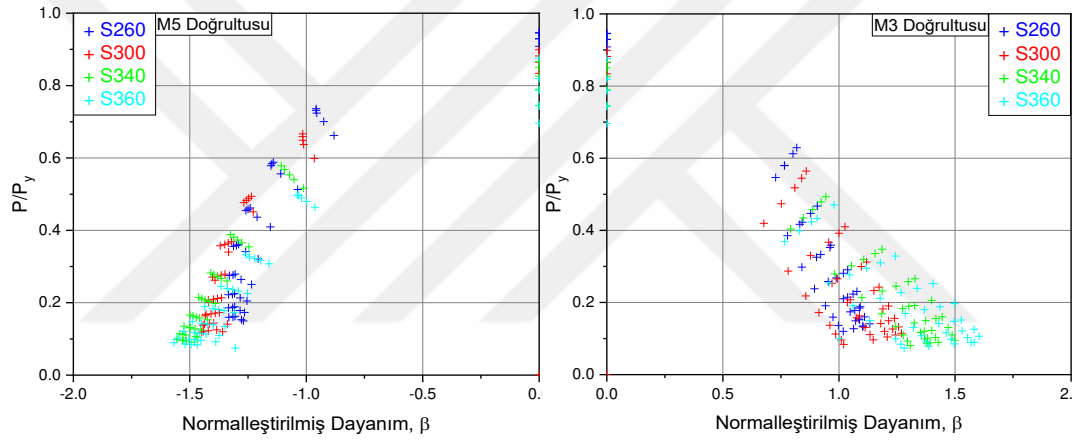
Boyları 500 mm olan 20 farklı sigma profil üzerinde gerçekleştirilen toplam 1120 adet sonlu eleman analizinin sonuçları aşağıdaki Şekil 192 ile Şekil 195 arasında verilmiştir. Elde edilen ham sonuçlar her kesiti akmaya ulaştıran ve CUFSM yazılımı kullanılarak elde edilen P_y , M_{xy} , M_{yy} eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilme momentlerine bölünerek normalize edilmişlerdir.



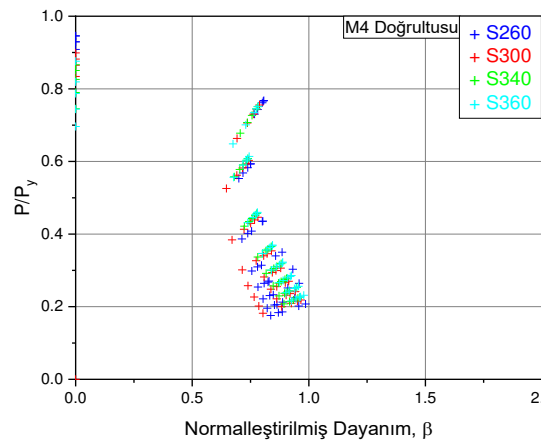
Şekil 192. M1 ve M7 doğrultularındaki normalize edilmiş kapasite oranları , L=500 mm



Şekil 193. M2 ve M6 doğrultularındaki normalize edilmiş kapasite oranları, L=500 mm

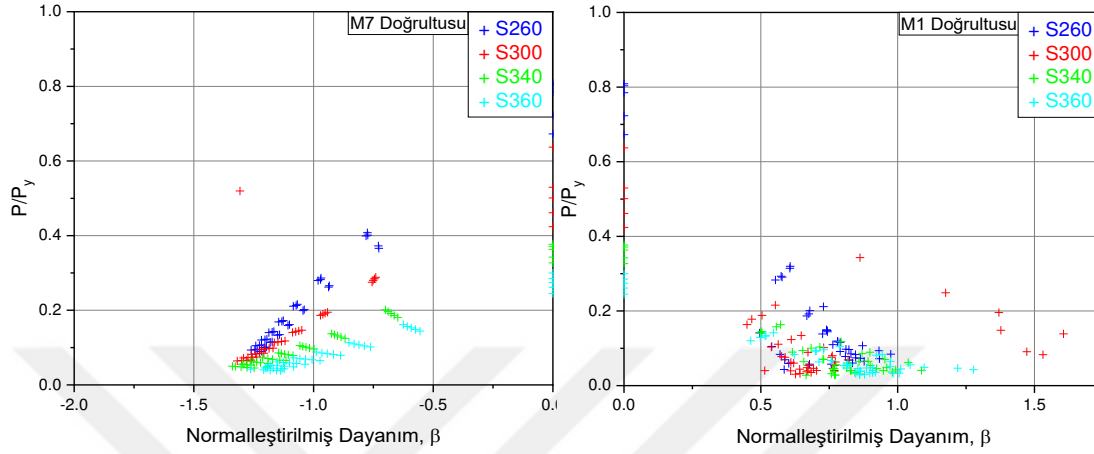


Şekil 194. M5 ve M3 doğrultularındaki normalize edilmiş kapasite oranları, L=500 mm

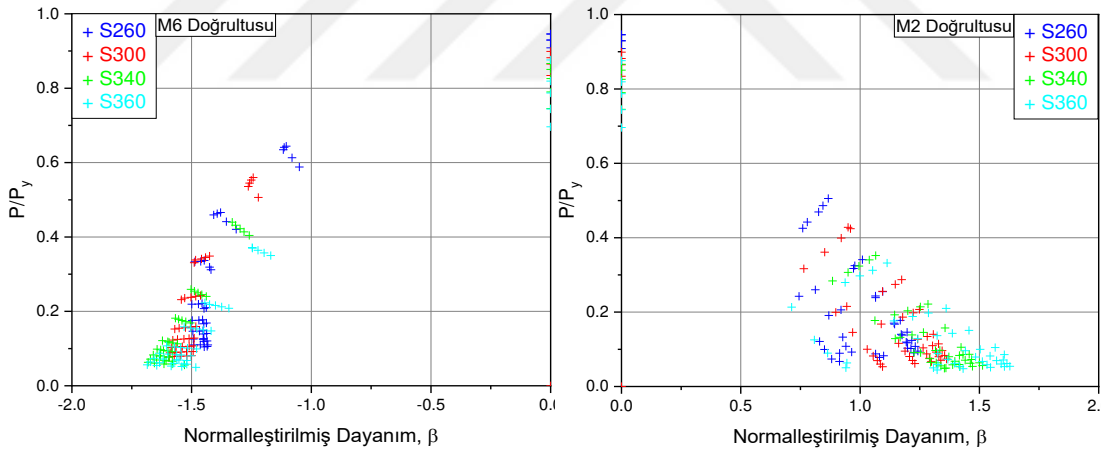


Şekil 195. M4 doğrultusundaki normalize edilmiş kapasite oranları, L=500 mm

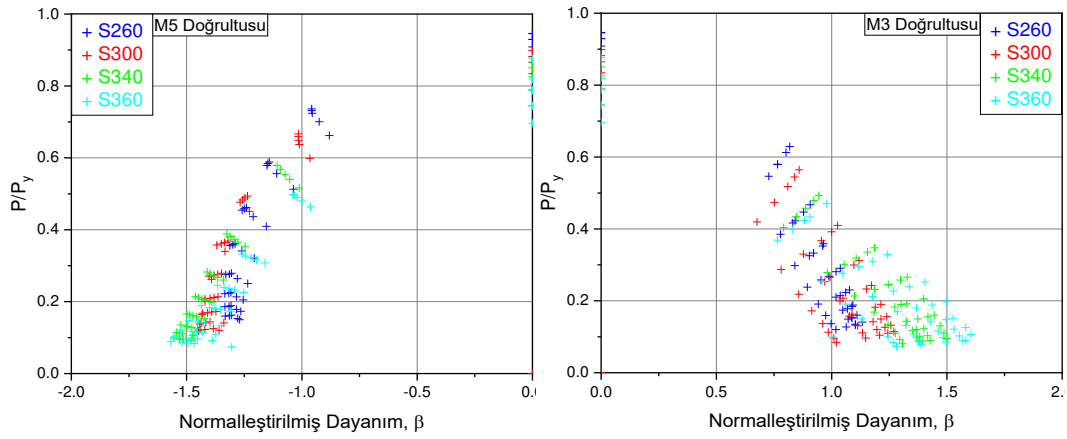
Boyları 2000 mm olan sigma profil üzerinde gerçekleştirilen toplam 1120 adet sonlu eleman analizinin sonuçları ise aşağıdaki Şekil 196 ile Şekil 199 arasında P_y , M_{xy} , M_{yy} eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilme momentlerine bölünerek normalize edilmiş olarak verilmiştir.



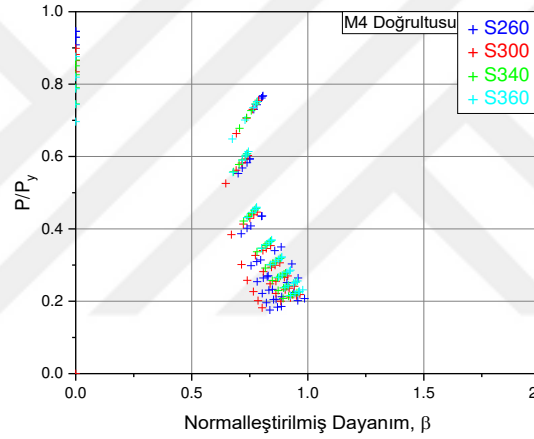
Şekil 196. M1 ve M7 doğrultularındaki normalize edilmiş kapasite oranları , $L=2000$ mm



Şekil 197. M2 ve M6 doğrultularındaki normalize edilmiş kapasite oranları , $L=2000$ mm



Şekil 198. M5 ve M3 doğrultularındaki normalleştirilmiş kapasite oranları, $L=2000$ mm

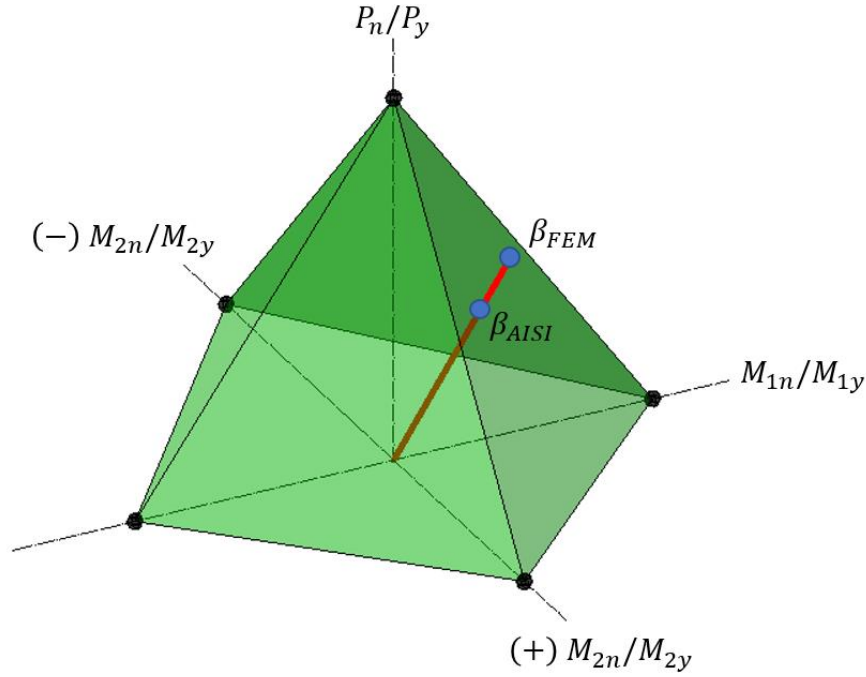


Şekil 199. M4 doğrultusundaki normalleştirilmiş kapasite oranları, $L=2000$ mm

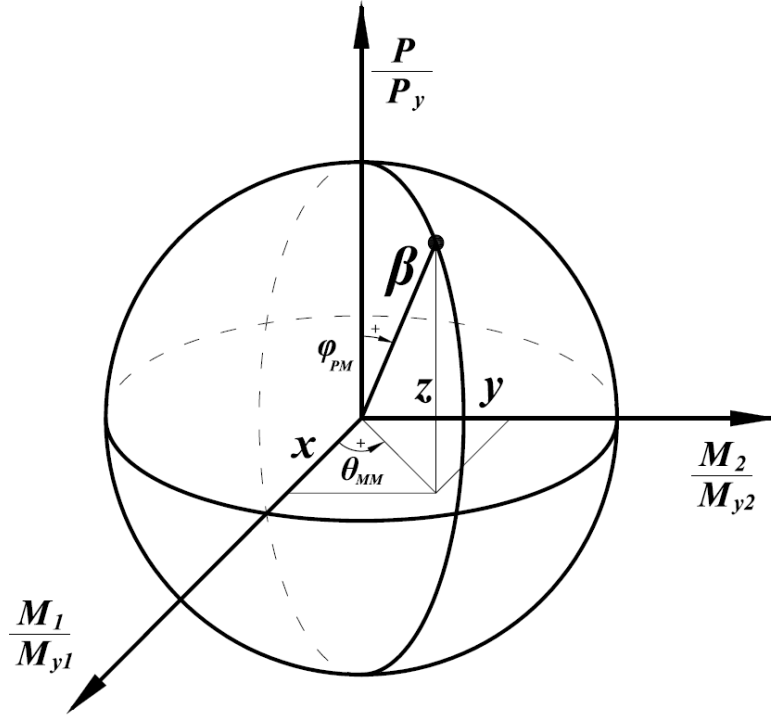
3.8.2.4. Parametrik Çalışma Sonuçlarının AISI-S100-12'e göre Karşılaştırılması

Eksenel yük ve eğilme etkilerinin birlikte etkideği soğuk şekillendirilmiş hafif çelik profillerin dayanımlarının AISI-S100-12'e göre hesaplanmasında kullanılan EWM ve DSM yöntemlerinin her ikisinde de kesitin yalnızca eksenel yük ve yalnızca eğilme kapasiteleri hesaplanarak bu kapasiteler lineer olarak birleştirilmektedir. Bu nedenle aşağıda açıklandığı gibi, çeşitli etkiler altındaki elemanın kapasitesi bir üçgen piramitin sınırları içinde yer alacak şekilde basitleştirilmiştir.

Sonlu eleman analiz sonuçlarıyla AISI-S100-12 hesaplamalarının karşılaştırılma yöntemi Şekil 200'deki üçgen piramitle şematik olarak gösterilmiştir. Buna göre, Şekil 200 (a)'da görülen üçgen piramit her bir kesit için hesaplanan AISI-S100-12 dayanım yüzeyini, bu yüzeyi kesen doğru ise yükleme durumlarına göre oluşan doğrultuyu göstermektedir. Piramitin her bir köşesi; aksenal yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmelerinin normalleştirilmiş kapasitelerini temsil etmektedir. AISI-S100-12 dayanım yüzeyini oluşturan bu noktaların hesaplanabilmeleri için gerekli olan P_{cr1} , P_{crd} , M_{cr1} , M_{crd} CUFSM yazılımı yardımıyla, P_{cre} ve M_{cre} ise CUTWP yazılımı ile elde edilmiştir. AISI-S100-12 dayanım yüzeyini kesen doğru ile yüzeyin kesişme noktası, β_{AISI} , kesitin belirlenen boydaki kapasite oranını, doğrunun sonunda belirtilen nokta ise, β_{FEM} aynı yükleme altındaki elemanın sonlu eleman analiz sonucundan elde edilen normalleştirilmiş dayanımı vermektedir. Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre β_{FEM} değeri aşağıdaki Şekil 201'de gösterildiği şekilde küresel olarak $\sqrt{(x^2 + y + z^2)}$ ifadesiyle hesaplanmıştır. Ayrıca, AISI-S100-12 yönetmeliğinin bu konudaki konservatif hesap yöntemini geliştirmek için bileşik etkilerin lineer olmayan etkileşimlerini dikkate alan küresel yaklaşım üzerinde çalışmalar yürütülmektedir (Torabian, S., Schafer 2018).



Şekil 200. AISI-S100-12'e göre β_{AISI} 'nin hesaplanma yöntemi



Şekil 201. Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre β_{FEM} 'in hesaplanma yöntemi

Eğilme, Burulma veya Burulmalı-Eğilme Burkulması nominal eksenel dayanım DSM

1.2.1.1

$$\lambda_c \leq 1.5 \text{ ise } P_{ne} = (0.658^{\lambda_c^2}) P_y \quad (11)$$

$$\lambda_c > 1.5 \text{ ise } P_{ne} = \left(\frac{0.887}{\lambda_c^2} \right) P_y \quad (12)$$

$$\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} \quad (13)$$

Yerel burkulma nominal eksenel dayanım DSM 1.2.1.2

$$\lambda_l \leq 0.776 \text{ ise } P_{nl} = P_{ne} \quad (14)$$

$$\lambda_l > 0.776 \text{ ise } \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{ne}}{P_{crl}} \right)^{0.4} P_{ne} \quad (15)$$

$$\lambda_l = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}} \quad (16)$$

Çarpılmalı burkulma nominal eksenel dayanım DSM 1.2.1.3

$$\lambda_d \leq 0.561 \text{ ise } P_{nd} = P_y \quad (17)$$

$$\lambda_d > 0.561 \text{ ise } P_{nl} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y \quad (18)$$

$$\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} \quad (19)$$

Boyları 500 mm ve 2000 mm olan sigma profillerin toplam 2240 adet sonlu eleman analiz sonuçlarının AISI-S100-12'ye göre hesaplanan kapasitelere oranları aşağıdaki Tablo 18'de verilmektedir.

Tablo 18. L=500 mm numunelerinin analiz sonuçlarının AISI ile karşılaştırılması

Kesit	FEM/ AISI-S100-12							Ortalama
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	
S260-2.0	1.26	1.42	1.64	1.34	1.98	1.91	1.77	1.62
S260-2.5	1.15	1.20	1.61	1.28	1.97	1.87	1.74	1.54
S260-3.0	1.36	1.46	1.54	1.15	1.96	1.88	1.75	1.59
S260-3.5	1.33	1.42	1.55	1.18	1.93	1.85	1.73	1.57
S260-4.0	1.34	1.46	1.56	1.18	1.89	1.82	1.70	1.57
S300-2.0	1.37	1.44	1.53	1.30	2.03	1.93	1.82	1.63
S300-2.5	1.37	1.45	1.54	1.23	1.97	1.88	1.78	1.60
S300-3.0	1.38	1.45	1.50	1.16	1.89	1.81	1.73	1.56
S300-3.5	1.41	1.49	1.56	1.11	1.83	1.77	1.70	1.55
S300-4.0	1.44	1.51	1.59	1.12	1.81	1.75	1.67	1.56
S340-2.0	1.49	1.45	1.61	1.34	1.90	1.84	1.77	1.63
S340-2.5	1.56	1.49	1.65	1.23	1.87	1.80	1.74	1.62
S340-3.0	1.58	1.52	1.68	1.16	1.85	1.82	1.76	1.62
S340-3.5	1.63	1.57	1.67	1.14	1.84	1.80	1.74	1.63
S340-4.0	1.63	1.52	1.74	1.13	1.85	1.82	1.76	1.64
S360-2.0	1.35	1.25	1.53	1.34	1.75	1.73	1.67	1.52
S360-2.5	1.56	1.50	1.62	1.26	1.77	1.73	1.68	1.59
S360-3.0	1.65	1.59	1.71	1.22	1.76	1.70	1.66	1.61
S360-3.5	1.70	1.65	1.76	1.18	1.77	1.75	1.71	1.65
S360-4.0	1.77	1.69	1.81	1.15	1.78	1.77	1.72	1.67
Ortalama	1.47	1.48	1.62	1.21	1.87	1.81	1.73	1.60

Tablo 19. L=2000 mm numunelerinin analiz sonuçlarının AISI ile karşılaştırılması

Kesit	FEM/ AISI-S100-12							Ortalama
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	
S260-2.0	1.05	1.08	1.17	1.52	1.67	1.61	1.52	1.37
S260-2.5	0.99	1.01	1.03	1.18	1.40	1.39	1.30	1.18
S260-3.0	0.72	0.81	0.96	0.94	1.45	1.43	1.35	1.10
S260-3.5	0.96	0.99	1.06	1.09	1.41	1.41	1.33	1.18
S260-4.0	0.96	1.04	1.01	1.10	1.42	1.42	1.34	1.19
S300-2.0	0.82	0.86	0.93	1.06	1.48	1.46	1.40	1.14
S300-2.5	0.84	0.84	0.89	1.02	1.40	1.40	1.35	1.10
S300-3.0	0.80	0.79	0.83	1.00	1.38	1.38	1.33	1.07
S300-3.5	0.93	0.91	0.99	0.99	1.37	1.37	1.31	1.13
S300-4.0	1.61	1.79	1.76	1.66	2.89	2.93	2.93	2.22
S340-2.0	0.93	0.94	1.05	1.34	1.38	1.38	1.33	1.19
S340-2.5	0.94	0.90	1.04	1.36	1.36	1.37	1.33	1.19
S340-3.0	0.91	1.03	0.99	1.35	1.36	1.34	1.33	1.19
S340-3.5	1.05	1.03	1.04	1.20	1.33	1.37	1.35	1.19
S340-4.0	1.06	1.04	1.10	1.29	1.37	1.40	1.36	1.23
S360-2.0	1.03	1.02	1.13	1.47	1.31	1.30	1.24	1.21
S360-2.5	1.02	1.09	1.18	1.50	1.33	1.33	1.25	1.24
S360-3.0	1.04	1.04	1.14	1.53	1.33	1.34	1.28	1.24
S360-3.5	1.10	1.12	1.18	1.52	1.33	1.35	1.30	1.27
S360-4.0	1.25	1.27	1.29	1.56	1.37	1.39	1.33	1.35
Ortalama	1.00	1.03	1.09	1.28	1.47	1.47	1.41	1.25

Sigma profillerin sonlu eleman analizleri ve AISI-S100-12 şartnamesi kullanılarak hesaplanan yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında, sonlu eleman analiz sonuçlarının boyları 500 mm ve 2000 mm olan numunelerde sırasıyla ortalama %60 ve %25 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki boyda da negative zayıf eksen eğilmesi altındaki oranın pozitif zayıf eksen eğilmesi altındaki orana göre daha fazla olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sigma kesitli hafif çelik profillerin özellikle deprem bölgelerinde inşa edilecek hafif çelik yapılarda kullanımını arttırmak amacıyla, eksenel yükleme ve iki eksende bileşik eğilme ($P-M_x-M_y$) meydana getiren monotonik ve tersinir-tekrarlı eksantrik yüklemeler altındaki kapasiteleri, stabilite uzayları, süneklik ve enerji tüketme gibi davranış özellikleri deneysel ve sayısal olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Bu kapsamda, öncelikle deneysel olarak incelenecek olan sigma profil kesitinin belirlenmesi amacıyla, yerel, çarpılmalı ve genel burkulma modlarının ayrı ayrı gözlenebileceği birbirinden belirgin şekilde farklı kritik burkulma yük katsayılarına sahip olması şartı aranan bir çok kesit CUFSM yazılımında analiz edilerek sigma profil kesitine karar verilmiştir. Ayrıca, mesnet şartlarının kısıtlayıcı etkileri nedeniyle profillerde meydana gelecek yerel ve çarpılmalı burkulmaların belirgin olarak ortaya çıkması için profil boylarının her bir burkulma modunun oluşacağı kritik dalga boyunun en az üç katı olması düşünülmüştür. Bu nedenle, profil boyları yerel burkulma numuneleri için 500 mm, çarpılmalı burkulma numuneleri için 1000 mm ve genel burkulma numuneleri için 1500 mm olarak seçilmiştir.

Sigma profillerin kapasite, burkulma davranışları, süneklik ve enerji tüketme davranışlarını incelemek için öncelikle 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm boylarındaki deney numuneleri üzerinde 45 adet monotonik ve literatürdeki benzerlerinden farklı olarak, 45 adet tersinir-tekrarlı deney gerçekleştirilmiştir. Ardından, bu deneylerde kullanılan sigma profilin malzeme özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla standart kupon numuneler üzerinde eksenel çekme ve çok düşük çevrimli tersinir-tekrarlı malzeme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen malzeme özellikleri deneylerle doğrulanmış olan sonlu eleman modellerinde kullanılarak öncelikle 45 adet monotonik ve 45 adet tersinir-tekrarlı nonlineer analiz gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu elemanlar üzerinde iki kısımdan oluşan parametrik sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda, deneysel ve sayısal çalışmada kullanılan 500 mm, 1000 mm ve 1500 mm'lik boylara sahip sigma profiller üzerinde 105

adet yükleme noktası için toplam 315 adet monotonik ve tersinir-tekrarlı sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmanın ikinci kısmında ise, kalınlıkları 2 mm, 2.5 mm, 3 mm, 3.5 mm ve 4 mm, boyları ise 500 mm ve 2000 mm olan 20 farklı hafif çelik sigma kesitli profil üzerinde toplam 2240 sonlu eleman analizi gerçekleştirilerek farklı kesit narinlik oranlarının etkisi ortaya konmaya çalışılmıştır. Parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar AISI S100-12 standardı ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Hafif çelik sigma profillerin monotonik ve tersinir-tekrarlı eksantrik yükler altındaki davranışının deneysel ve sayısal olarak incelendiği bu çalışmadan elde edilen bulgulardan varılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara yol gösterebileceği düşünülen bazı öneriler aşağıda verilmektedir.

- Deneysel ve sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların tamamı genel olarak birbiriyle oldukça uyumludur. Monotonik yükleme numunelerinde analiz sonuçları deney sonuçlarından %5, tersinir-tekrarlı yükleme numunelerinde itmede %13, çekmede ise %16 daha fazladır.
- Sigma profillerin boyu arttıkça doğal olarak yük taşıma kapasiteleri azalmıştır buna karşın en kesit kalınlıklarının değişmesi profilde oluşan burkulma mekanizmasını değiştirmemiştir.
- Profil dudaklarının basınç gerilmesi altında olduğu N numunelerinin tamamında yük taşıma kapasitesi dudakların çekme gerilmesi altında olduğu P numunelerinden daha az olduğu görülmüştür.
- Tersinir-tekrarlı yük-yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde genel olarak P numunelerinin sünekliğinin N numunelerinden daha büyük olduğu görülmüştür.
- Sayısal sonuçlardan elde edilen başlangıç rijitlikleri genel olarak deneylerden elde edilenlerinkinden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu farklılık numune boyu ve yüklemedeki eksantrisite arttıkça azalmaktadır.
- Sonlu eleman analiz sonuçlarında elde edilen toplam enerji tüketme miktarlarının toplam yerdeğiştirmeye göre değişiminin incelendiği eğrilere göre genel olarak profil

boyu arttıkça her yükleme doğrultusunda enerji sönümleme miktarı azalmıştır. Ancak bazı durumlarda 1000 mm ve 1500 mm'lik numunelerin enerji tüketme kapasiteleri birbirine çok yakın olmuştur. Ayrıca, P ve N numunelerinin enerji sönümleme davranışları birbirine benzer olmuştur. Bu benzer enerji sönümleme davranışı nedeniyle sigma profillerin yapılarda kullanımı göz önüne alındığında, bu elemanların P yükleme durumunda olacakları şekilde konumlandırılmaları hem dayanım hem de enerji sönümleme bakımından faydalı olacaktır.

- Parametrik çalışma sonuçlarına göre, eksantrisitedeki küçük artışlar dahi eksenel yük taşıma kapasitesinde önemli düşüşlere neden olmaktadır. Eksantrisite 180° ve 270° den 90° ye gittikçe eksenel yük taşıma kapasitesi ile eksantrik yük altındaki kapasitelerin arasındaki fark azalmaktadır. Başka bir deyişle, eksantrik yükleme kuvvetli eksen eğilmesine yaklaştıkça bu fark azalmaktadır.
- Parametrik çalışmadan elde edilen ve dayanım uzayındaki her bir normalleştirilmiş kapasiteyi temsil eden β değeri her doğrultuda eksantrisitenin artmasıyla birlikte artmaktadır. Bu durum, eleman kiriş davranışı göstermeye yaklaştıkça bileşik etkiler altındaki dayanımının arttığını göstermektedir.
- İkinci parametrik çalışma kapsamında elde edilen monotonik sonlu eleman analiz sonuçlarının boyları 500 mm ve 2000 mm olan numunelerde AISI-S100-12 yönetmeliğine göre yapılan hesaplamalara göre sırasıyla ortalama %60 ve %25 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki boyda da negatif zayıf eksen eğilmesi altındaki oranının pozitif zayıf eksen eğilmesi altındaki orana göre daha fazla olduğu görülmektedir. Buna göre, AISI yönetmeliğinin mevcut haliyle daha korumacı olduğu ve profil dudaklarının çekme gerilmesi altında olduğu elemanların dayanımlarının hesaplanması bakımından geliştirilme potansiyeli daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Numune boyu arttıkça P/P_y oranı azalmaktadır. Boyu 500 mm olan numunede bu değer yaklaşık 0.85, boyu 1000 mm olan numunede 0.75 ve boyu 1500 mm olan numunede 0.55 olmaktadır. Bu da, numune boyu arttıkça burkulmaların, beklendiği gibi, akma gerilmesinin daha da altında oluştuğunu göstermektedir. Benzer şekilde eksenel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmelerinin birlikte olduğu durumlarda da bu değer boy arttıkça azalmaktadır.

- Tersinir-tekrarlı yüklemelerde çevrim sayısı arttıkça aynı miktar yerdeğiştirme yapan birinci ve ikinci çevrimde sönümlenen enerji arasındaki oran (E_2/E_1) da artmaktadır. Dolayısıyla, analiz ve deneylerin yürütüldüğü $\pm 5\%$ şekildeğiştirme genliğinde numunelerde çevrimsel pekleşme davranışı görölmüştür.
- Numune boyu arttıkça her bir çevrimde sönümlenen enerji miktarı azalmaktadır. Ayrıca, numunelerin boyu arttıkça eşit yerdeğiştirme miktarında sönümlenen enerji miktarı da azalmaktadır. Bu durum, burkulma meydana gelmeden enerji tüketiminin olmayacağını ifade etmektedir.
- Tersinir-tekrarlı deneysel ve sayısal çalışmalarda genellikle, N numunelerinde meydana gelen burkulmalar profil dudaklarında, P numunelerindeki burkulmalar ise gövdede ortaya çıkmıştır. Gövdenin kesit alanı dudaklardan daha fazla olduğu için burkulma ile tüketilen enerji daha fazladır. Bu durum genel olarak P numunelerinin enerji tüketme kapasitelerinin N numunelerinden daha yüksek olmasına neden olmuştur.
- En büyük eksantrisitelerin bulunduğu numunelerin analiz sonuçlarından elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerine göre hesaplanan süneklik oranları deneysel eğrilere göre daha düşük olmuştur. Eksantrisite arttıkça da bu oranların birbirine yaklaştığı görölmüştür. Bu durum, analizlerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin rijitliğinin düşük eksantrisitelerde daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır.
- Bu çalışma kapsamında yalnızca tek bir sigma kesit üzerinde inceleme yapılmıştır ancak, daha farklı boyut ve tiplere sahip sigma kesitli profiller üzerinde yapılacak parametrik çalışmalarla birlikte bu profillerin özellikle sanayide sıklıkla kullanılan C ve Z kesitli profillerle karşılaştırılarak, eşit malzeme kullanılarak üretilen elemanların hangi yükleme durumları altında daha avantajlı olduğunun incelenmesi yerinde olacaktır.
- Hafif çelik yapı tasarımlarında enerji sönümleyen elemanlar olarak yalnızca kesme duvarları ve şerit çaprazlar kullanılmaktadır. Ancak, tersinir-tekrarlı yükler altında tekil elemanların da enerji sönümleyebildikleri görölmüştür. Bu nedenle, farklı sigma

profiller üzerinde monotonik yükler altında gerçekleştirilen parametrik çalışmaların, tersinir-tekrarlı yükler altında da gerçekleştirilerek aynı yükleme durumları altında, değişen kesit narinlik oranına göre dayanım ve rijitlik kaybının karakterize edilerek kapsayıcı zarf eğrilerinin oluşturulması, hafif çelik elemanların yapılarda enerji sönümleyen elemanlar olarak kullanılabilmelerine imkan sağlayacağı için bu eğrilerin sigma profiller için de elde edilmesi faydalı olacaktır.

- Eksenel yük ve bileşik etkiler altında incelenen sigma profillerin, aynı zamanda, monotonik ve tersinir-tekrarlı eğilme etkisi altındaki davranışının da parametrik olarak incelenerek dayanım ve rijitlik kaybının karakterize edilmesi ve kapsayıcı zarf eğrilerinin oluşturulması sigma profillerin çerçevelerin kiriş elemanlarında enerji sönümleyen elemanlar olarak kullanılabilirliğinin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.
- Sigma kesitli profillerle oluşturulacak tam ölçekli iki ve üç boyutlu yapı modelleri ve birleşimleri üzerinde bu çalışmada uygulanan yarı-statik (monotonik ve tersinir-tekrarlı) yükleme deneylerinin yanı sıra, sarsma tablası ile deprem benzeşimi (pseudo-dynamic) deneylerinin de yapılmasında büyük yarar bulunmaktadır. Zira, hafif çelik profillerle inşa edilen bazı yapıların yüksek deprem tehlike seviyesine sahip bölgelerde bile belli bir emniyetle kullanımı mümkünken, onların yerine, gelenekçi bir yaklaşımla standart hadde profilleri kullanılarak inşa edilmelerinin en azından ekonomik açıdan zararlı olacağı açıktır.

5. KAYNAKLAR

- AISI-S100, 2012. North American Specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington (DC, USA).
- ABAQUS, 2017. Analysis User's Manual. Version 6.12, Dassault Systemes Simulia, Inc.
- Australian/New Zealand Standard, 1996. "Cold-formed steel structures."
- AS/NZS 4600, 1996. Standards Australia, Sydney, Australia.
- BS 7270, 2006. Metallic materials – Constant amplitude strain controlled axial fatigue – Method of test. British Standards Institution.
- Chaboche, J.L., 1986. Time-Independent Constitutive Theories for Cyclic Plasticity, *Int. J. of Plasticity*, 2, 2, 149-188.
- Chen, M. ve Young, B., 2020. Beam-column tests of cold-formed steel elliptical hollow sections. *Engineering Structures*. 210, 109911.
- Ciesielczyk, K., Rzeszut, K., 2016. Local And Distortional Buckling Of Axially Loaded Cold Rolled Sigma Profiles, *De Gruyter*, 10,3, 218-222.
- FEMA, FEMA 461, 2007. Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Document No. FEMA 461.
- El Aghourya, M.A., Hannab, M.T., Amoushc E.A., 2017. Experimental and theoretical investigation of cold-formed single lipped sigma columns. *Thin-Walled Structures*, 111, 80–92.
- Li, Y., Li, Y., Song, Y., 2014. Experimental investigation on ultimate capacity of eccentrically-compressed cold-formed beam-columns with lipped channel sections, in: *Proceedings of 22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St.Louis, MO, 393–403.
- Ye J., Mojtabaei SM ve Hajirasouliha I., 2018. Local-flexural interactive buckling of standard and optimised cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 106-118.
- Padilla-Llano D.A, Moen C.D, Eatherton M.R., 2014. Cyclic axial response and energy dissipation of cold-formed steel framing members, *Thin-Walled Structures*, 78, 95–107.
- Park, J., Y., ve Phillips, P., C., B., 1989. *Statistical Inference in Regressions with Integrated Processes: Part 2, Econometric Theory*.

- Sarawit, A., 2006. CUTWP, Thin-walled section properties.
- Standards Australia, 2005. Cold-formed steel structures: NZS 4600. Sydney, Australia.
- Miller, T.H., Pekoz, T., 1994. Load-Eccentricity effects on cold-formed steel lipped-channel columns J. Struct. Eng., 120, 3, 805-823.
- Thomas ve diğ., 2013. Buckling Modes of Cold-Formed Steel Columns. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, 5, 4.
- Torabian, S., Zheng, B. C., ve Schafer, B. W., 2015. Experimental response of cold formed steel lipped channel beam-columns. Thin-Walled Structures, 89, 152–168.
- Torabian, S., Zheng, B. C., Shifferaw, Y. ve Schafer, B. W., 2016. RP16-3: Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Beam-Columns.
- Torabian, S., Amouzegar, H, Tootkaboni, M., Schafer, B., 2016. Finite element modeling protocols and parametric analyses for short cold-formed steel zee-section beam-columns. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Orlando, Florida, April 12-15.
- Torabian, S., Schafer, B.W., 2018. Development and Experimental Validation of the Direct Strength Method for Cold-Formed Steel Beam-Columns. Journal of Structural Engineering, 144, 10.1061.
- TS EN ISO 6892-1., 2016. Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu.
- TS EN 10346, 2016. Sıcak daldırmayla sürekli olarak kaplanmış çelik yassı mamuller - Teknik teslim şartları.
- Ye, J., Becque, J., Hajirasouliha, I., Mojtabaei, S.M., Lim, J., 2018. Development of optimum cold-formed steel sections for maximum energy dissipation in uniaxial bending. Engineering Structures. 161, 55-67.
- Young, B., Hancock, GJ., 2003. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffeners. J. Struct Eng ASCE, 129, 10, 1403–11.
- Young, B., Yan, J., 2002. Channel columns undergoing local, distortional and overall buckling. J Struct Eng ASCE, 128, 6, 728–36.
- Li, Y., Li, Y., Song, Y., 2014. Experimental investigation on ultimate capacity of eccentrically-compressed cold-formed beam-columns with lipped channel sections, in: Proceedings of 22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St.Louis, MO, 393–403.
- Zeinoddini, V. M., ve Schafer, B. W., 2012. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. Thin-Walled Structures, 60, 105–117.

6. EKLER

EK-1

Tablo 20. L=500 mm boyundaki numunelerin pozitif ve negatif zayıf eksen eğilmelerinin karşılaştırılması

DOĞRULTU	S26020	S26025	S26030	S26035	S26040	S30020	S30025	S30030	S30035	S30040	S34020	S34025	S34030	S34035	S34040	S36020	S36025	S36030	S36035	S36040
M7-1/M1-1	-1.36	-1.57	-1.38	-1.36	-1.31	-1.66	-1.51	-1.39	-1.32	-1.28	-1.39	-1.25	-1.27	-1.17	-1.16	-1.26	-1.18	-1.13	-1.10	-1.03
M6-1/M2-1	-1.38	-1.39	-1.35	-1.32	-1.27	-1.60	-1.48	-1.37	-1.30	-1.31	-1.42	-1.35	-1.30	-1.27	-1.25	-1.64	-1.28	-1.22	-1.18	-1.12
M5-1/M3-1	-1.21	-1.21	-1.25	-1.19	-1.17	-1.43	-1.34	-1.25	-1.21	-1.18	-1.28	-1.24	-1.21	-1.19	-1.17	-1.26	-1.20	-1.16	-1.15	-1.05
M7-2/M1-2	-1.74	-1.74	-1.46	-1.44	-1.38	-1.64	-1.46	-1.32	-1.31	-1.20	-1.23	-1.15	-1.11	-1.08	-1.10	-1.17	-1.10	-1.05	-1.01	-0.96
M6-2/M2-2	-1.62	-1.82	-1.45	-1.42	-1.37	-1.66	-1.57	-1.33	-1.26	-1.21	-1.35	-1.27	-1.23	-1.19	-1.17	-1.66	-1.20	-1.15	-1.11	-1.06
M5-2/M3-2	-1.33	-1.33	-1.37	-1.31	-1.26	-1.57	-1.44	-1.32	-1.25	-1.20	-1.27	-1.21	-1.17	-1.14	-1.12	-1.21	-1.14	-1.09	-1.06	-1.01
M7-3/M1-3	-1.70	-1.72	-1.38	-1.37	-1.31	-1.57	-1.39	-1.26	-1.20	-1.16	-1.18	-1.11	-1.08	-1.06	-1.08	-1.54	-1.08	-1.01	-0.98	-0.96
M6-3/M2-3	-1.63	-1.55	-1.40	-1.37	-1.32	-1.59	-1.40	-1.28	-1.21	-1.17	-1.31	-1.31	-1.26	-1.23	-1.16	-1.64	-1.17	-1.12	-1.08	-1.05
M5-3/M3-3	-1.31	-1.26	-1.28	-1.24	-1.21	-1.48	-1.32	-1.29	-1.16	-1.12	-1.14	-1.10	-1.07	-1.05	-1.04	-1.35	-1.06	-1.00	-0.97	-0.98
M7-4/M1-4	-1.67	-1.41	-1.32	-1.31	-1.30	-1.53	-1.35	-1.23	-1.18	-1.14	-1.16	-1.10	-1.08	-1.09	-1.04	-1.15	-1.04	-1.00	-0.98	-0.95
M6-4/M2-4	-1.56	-1.73	-1.31	-1.29	-1.25	-1.52	-1.34	-1.23	-1.17	-1.13	-1.24	-1.18	-1.21	-1.12	-1.32	-1.57	-1.14	-1.07	-1.05	-1.02
M5-4/M3-4	-1.35	-1.32	-1.33	-1.28	-1.24	-1.52	-1.35	-1.32	-1.19	-1.15	-1.17	-1.11	-1.08	-1.11	-1.04	-1.16	-1.05	-1.01	-0.98	-0.96
M7-5/M1-5	-1.63	-1.61	-1.28	-1.31	-1.26	-1.50	-1.32	-1.21	-1.16	-1.13	-1.15	-1.10	-1.08	-1.05	-1.04	-1.13	-1.06	-1.00	-0.99	-0.96
M6-5/M2-5	-1.54	-1.69	-1.27	-1.25	-1.21	-1.50	-1.31	-1.21	-1.16	-1.12	-1.22	-1.17	-1.14	-1.12	-1.15	-1.60	-1.13	-1.05	-1.04	-1.02
M5-5/M3-5	-1.31	-1.26	-1.28	-1.24	-1.21	-1.48	-1.32	-1.29	-1.16	-1.12	-1.14	-1.10	-1.07	-1.05	-1.04	-1.35	-1.06	-1.00	-0.97	-0.98
M7-6/M1-6	-1.60	-1.55	-1.26	-1.24	-1.23	-1.48	-1.40	-1.20	-1.15	-1.12	-1.15	-1.09	-1.08	-1.05	-1.09	-1.09	-1.06	-0.99	-0.99	-0.97
M6-6/M2-6	-1.50	-1.57	-1.25	-1.23	-1.19	-1.48	-1.30	-1.20	-1.14	-1.11	-1.21	-1.14	-1.13	-1.11	-1.28	-1.15	-1.12	-1.03	-1.03	-1.04
M5-6/M3-6	-1.29	-1.23	-1.25	-1.21	-1.20	-1.45	-1.29	-1.19	-1.15	-1.11	-1.14	-1.09	-1.07	-1.10	-1.04	-1.10	-1.06	-1.00	-0.97	-0.96
M7-7/M1-7	-1.38	-1.46	-1.24	-1.22	-1.18	-1.47	-1.29	-1.20	-1.15	-1.12	-1.14	-1.11	-1.12	-1.03	-1.05	-1.42	-1.04	-0.97	-1.00	-0.97
M6-7/M2-7	-1.36	-1.63	-1.23	-1.21	-1.18	-1.47	-1.29	-1.20	-1.14	-1.10	-1.20	-1.12	-1.19	-1.08	-1.14	-1.17	-1.11	-0.99	-1.03	-1.04
M5-7/M3-7	-1.27	-1.20	-1.23	-1.21	-1.18	-1.43	-1.27	-1.18	-1.14	-1.07	-1.13	-1.08	-1.07	-1.11	-1.04	-1.10	-1.06	-1.00	-0.97	-0.97
M7-8/M1-8	-1.56	-1.57	-1.22	-1.20	-1.17	-1.46	-1.28	-1.19	-1.14	-1.11	-1.14	-1.05	-1.08	-1.02	-1.12	-1.54	-1.06	-0.93	-1.00	-0.98
M6-8/M2-8	-1.34	-1.57	-1.22	-1.33	-1.15	-1.46	-1.28	-1.19	-1.14	-1.10	-1.19	-1.13	-1.13	-1.04	-1.19	-1.17	-1.11	-0.96	-1.03	-1.04
M5-8/M3-8	-1.25	-1.20	-1.21	-1.19	-1.15	-1.42	-1.26	-1.18	-1.09	-1.09	-1.13	-1.10	-1.07	-1.10	-1.04	-1.02	-1.06	-1.00	-0.97	-0.99
Ort.	-1.45	-1.48	-1.30	-1.28	-1.24	-1.52	-1.36	-1.25	-1.19	-1.15	-1.21	-1.15	-1.14	-1.11	-1.12	-1.31	-1.11	-1.04	-1.03	-1.00

EK-2

Tablo 21. L=2000 mm boyundaki numunelerin pozitif ve negatif zayıf eksen eğilmelerinin karşılaştırılması

DOĞRULTU	S26020	S26025	S26030	S26035	S26040	S30020	S30025	S30030	S30035	S30040	S34020	S34025	S34030	S34035	S34040	S36020	S36025	S36030	S36035	S36040
M7-1/M1-1	-1.26	-1.27	-1.41	-1.28	-1.28	-1.68	-1.49	-1.60	-1.34	-1.52	-1.29	-1.33	-1.21	-1.20	-1.39	-1.20	-1.15	-1.15	-1.17	-1.14
M6-1/M2-1	-1.26	-1.25	-1.68	-1.26	-1.33	-1.62	-1.62	-1.54	-1.33	-1.64	-1.35	-1.31	-1.28	-1.27	-1.29	-1.26	-1.22	-1.21	-1.26	-1.20
M5-1/M3-1	-1.17	-1.19	-1.29	-1.18	-1.23	-1.51	-1.53	-1.52	-1.26	-1.50	-1.23	-1.21	-1.20	-1.20	-1.35	-1.19	-1.17	-1.16	-1.15	-1.16
M7-2/M1-2	-1.40	-1.38	-1.98	-1.33	-1.43	-1.80	-1.71	-1.56	-1.45	-1.75	-1.33	-1.24	-1.46	-1.34	-1.17	-1.22	-1.12	-1.16	-1.14	-1.08
M6-2/M2-2	-1.43	-1.44	-1.79	-1.49	-1.42	-1.83	-1.77	-1.73	-1.99	-1.48	-1.43	-1.37	-1.31	-1.45	-1.47	-1.31	-1.21	-1.24	-1.18	-1.15
M5-2/M3-2	-1.31	-1.33	-1.51	-1.28	-1.18	-1.61	-1.51	-1.68	-1.32	-1.30	-1.25	-1.21	-1.40	-1.38	-1.21	-1.19	-1.15	-1.15	-1.20	-1.14
M7-3/M1-3	-1.44	-1.40	-2.01	-1.44	-1.44	-1.85	-1.60	-1.84	-1.44	-1.87	-1.37	-1.39	-1.57	-1.20	-1.18	-1.24	-1.21	-1.24	-1.05	-1.05
M6-3/M2-3	-1.49	-1.41	-1.49	-1.32	-1.37	-2.23	-1.79	-1.78	-1.60	-2.00	-1.48	-1.41	-1.26	-1.28	-1.26	-1.36	-1.27	-1.30	-1.12	-1.13
M5-3/M3-3	-1.48	-1.44	-2.04	-1.32	-1.49	-2.09	-1.80	-1.83	-1.52	-1.77	-1.21	-1.29	-1.26	-1.19	-1.35	-1.14	-1.12	-1.17	-1.16	-1.04
M7-4/M1-4	-1.45	-1.39	-2.01	-1.45	-1.44	-1.88	-1.51	-1.86	-1.47	-2.14	-1.40	-1.24	-1.18	-1.39	-1.33	-1.20	-1.22	-1.26	-1.32	-1.11
M6-4/M2-4	-1.51	-1.42	-2.08	-1.50	-1.35	-1.93	-1.46	-1.82	-1.58	-1.90	-1.50	-1.52	-1.02	-1.28	-1.41	-1.26	-1.24	-1.36	-1.09	-1.08
M5-4/M3-4	-1.45	-1.42	-1.59	-1.62	-1.48	-1.98	-1.61	-1.80	-1.69	-1.79	-1.34	-1.27	-1.39	-1.24	-1.21	-1.23	-1.11	-1.16	-1.16	-1.07
M7-5/M1-5	-1.46	-1.39	-2.02	-1.45	-1.34	-2.37	-1.78	-1.53	-1.43	-1.79	-1.40	-1.53	-1.45	-1.15	-1.35	-1.21	-1.21	-1.21	-1.16	-1.10
M6-5/M2-5	-1.51	-1.41	-1.45	-1.50	-1.35	-1.95	-1.85	-1.79	-1.58	-2.00	-1.51	-1.66	-1.36	-1.43	-1.40	-1.30	-1.18	-1.29	-1.11	-1.06
M5-5/M3-5	-1.48	-1.44	-2.04	-1.32	-1.49	-2.09	-1.80	-1.83	-1.52	-1.77	-1.21	-1.29	-1.26	-1.19	-1.35	-1.14	-1.12	-1.17	-1.16	-1.04
M7-6/M1-6	-1.46	-1.39	-2.02	-1.29	-1.44	-2.07	-1.79	-1.91	-1.57	-4.12	-1.43	-1.48	-1.61	-1.36	-1.32	-1.26	-1.23	-1.33	-1.17	-1.08
M6-6/M2-6	-1.52	-1.48	-2.08	-1.33	-1.33	-1.97	-1.89	-1.86	-1.63	-1.63	-1.51	-1.57	-1.37	-1.34	-1.38	-1.26	-1.20	-1.29	-1.34	-1.07
M5-6/M3-6	-1.49	-1.44	-1.51	-1.33	-1.49	-1.83	-1.79	-1.85	-1.50	-1.74	-1.43	-1.25	-1.54	-1.35	-1.17	-1.14	-1.11	-1.18	-1.16	-1.03
M7-7/M1-7	-1.46	-1.39	-1.83	-1.26	-1.44	-1.94	-1.81	-1.87	-1.62	-1.75	-1.79	-1.50	-1.69	-1.36	-1.31	-1.22	-1.34	-1.31	-1.34	-0.96
M6-7/M2-7	-1.52	-1.48	-2.08	-1.50	-1.50	-1.98	-1.91	-1.91	-1.56	-1.68	-1.52	-1.68	-1.43	-1.38	-1.24	-1.32	-1.19	-1.34	-1.44	-1.03
M5-7/M3-7	-1.50	-1.44	-1.50	-1.30	-1.50	-1.59	-1.82	-1.86	-1.38	-1.85	-1.39	-1.46	-1.56	-1.33	-1.15	-1.14	-1.10	-1.19	-1.04	-1.01
M7-8/M1-8	-1.47	-1.39	-2.15	-1.64	-1.32	-2.10	-2.02	-1.87	-1.64	-1.57	-1.45	-1.65	-1.69	-1.35	-1.23	-1.31	-1.32	-1.20	-1.20	-0.99
M6-8/M2-8	-1.51	-1.48	-2.07	-1.50	-1.36	-2.00	-1.89	-2.31	-1.52	-1.48	-1.53	-1.69	-1.38	-1.32	-1.33	-1.37	-1.21	-1.30	-1.16	-1.04
M5-8/M3-8	-1.50	-1.44	-1.48	-1.31	-1.48	-1.84	-1.50	-1.87	-1.46	-1.88	-1.44	-1.47	-1.57	-1.33	-1.31	-1.21	-1.10	-1.19	-1.12	-1.00
Ort.	-1.44	-1.40	-1.80	-1.38	-1.39	-1.90	-1.72	-1.79	-1.52	-1.83	-1.41	-1.42	-1.39	-1.30	-1.30	-1.24	-1.19	-1.23	-1.18	-1.07

ÖZGEÇMİŞ

İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde tamamladıktan sonra bir süre Bomonti-Feriköy otoyol tüneli şantiyesinde saha mühendisi olarak çalışmıştır. Dil eğitimi için 2008 yılında 1 yıl süreyle Londra'da bulunmuş ve dönüşünde bir süre çelik yapı tasarım mühendisi olarak çalıştıktan sonra askerlik görevini yedek subay olarak tamamlamıştır. Yüksek lisans öğrenimine Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2010 yılında başlamış ve Erasmus öğrencisi olarak gittiği Instituto Politécnico de Castelo Branco'da (Portekiz) hafif çelik yapılar konusundaki tezinin ön çalışmalarını gerçekleştirmiş, "Hafif Çelik Yapıların Sonlu Eleman Analiz Programları Yardımıyla Tasarım ve Optimizasyonu" konulu Yüksek Lisans tezini 2014 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde Doktora eğitimine başlamış ve Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktayken YÖK görevlendirmesiyle Erasmus-Mundus SUSCOS programı kapsamında İsveç, İtalya ve Portekiz'i içeren ikinci yüksek lisans programına da başlamıştır. YÖK'ün 6 aylık görevlendirmesi uzatılmadığı için, Yüksel Lisans eğitimini yarıda kesmemek adına Araştırma Görevlisi kadrosundan istifa etmiş ve program kapsamında kazandığı burs yardımıyla "Rüzgar Türbinlerinin Kafes Tipi Taşıyıcı Sistemlerindeki Cıvatalı Birleşimlerinin Yorulma Davranışının Sonlu Eleman Modellemesi" konulu tezini 2016 yılında tamamlayıp yurda dönerek Doktora eğitimine devam etmiştir. CW Enerji şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak çalışan ve ileri düzeyde İngilizce bilmektedir.