

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

C ENKESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN MERKEZİ VE
EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz YILMAZ

OCAK 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**C ENKESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN MERKEZİ VE
EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Yılmaz YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 /12 /2023

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 01/ 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serhat DEMİR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“C Enkesitli Hafif Çelik Profillerin Merkezi Ve Eksantrik Yükleme Altındaki Davranışlarının İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Akademik hayata başlamamda büyük etkisi olan, lisans dönemimden itibaren yanında çalışma fırsatı bulduğum, iş ahlakına, disiplinine, deneysel ve teorik anlamdaki bilgi birikimiyle sorunları çözebilme yeteneğine hayran kaldığım, yüksek lisans tez danışmanlığı yaptığı sürece bana çok önemli yardımlar sağlayan rahmetli hocam Prof. Dr. Selim PUL'a, yüksek lisans eğitimim boyunca deneysel ve teorik anlamda bana büyük katkılar sağlayan, bilgi ve tecrübelerinden faydalanma fırsatı bulduğum, akademik hayata beni yönlendiren, çalışmaktan çok keyif aldığım, maddi ve manevi desteğini beden esirgemeyen çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Serhat DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Lisans döneminden itibaren mühendislik eğitimini, mühendis bakış açısını bana kazandırmaya çalışan, hedeflerinin daima çok yüksek olması gerektiğini vurgulayan, bu yolda ilerlerken beni maddi manevi anlamda asla yalnız bırakmayan değerli hocam Dr. Mehmet ŞENTÜRK'e, yüksek lisans eğitimim boyunca gerek deneysel gerekse teorik anlamda çalışmalarına büyük katkı sağlayan, kıymetli hocam Dr. Ferhan ÖZTÜRK'e, deneysel ve teorik çalışmalarda bana destek olan tüm arkadaşlarıma minnetlerimi sunarım.

Son olarak, başta anne ve babam olmak üzere, üzerimde hepsinin çok çok önemli emekleri olan, bana daima inanan ve güvenen kocaman aileme, hayatım boyunca her türlü zorlukta ve mutlulukta yanımda olan, her zaman bana inanan ve güvenen çok değerli arkadaşlarıma teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Yılmaz YILMAZ

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “C Enkesitli Hafif Çelik Profillerin Merkezi Ve Eksantrik Yükleme Altındaki Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Serhat DEMİR’in 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 hareket ettiğimi ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04 / 01 /2024

Yılmaz YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVII
1.GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş	1
1.1. Hafif Çelik Elemanlarda Burkulma.....	3
1.2. Daha Önce Yürütülmüş Bazı Çalışmalar	6
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	15
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	15
2.1.1. Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	15
2.1.2. Deney Numunelerinin Enkesiti ve Deneye Hazırlanışı	18
2.1.3. C-Enkesitli Profiller Üzerinde Yapılan Deneyler	20
2.2. Sonlu Eleman Analizleri	20
2.2.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	20
2.2.2. Sonlu Eleman Tipi ve Sonlu Eleman Ağı	20
2.2.3. Sonlu Elemanların Yükleme ve Mesnetlenme Durumları	20
2.2.4. Elemanlara Ait Geometrik Kusurların Belirlenmesi.....	20
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
3.1. Deneysel Çalışmaların Kapsamı	22
3.2. Monotonik Yükleme Deney Sonuçları.....	36
3.2.1. Monotonik Yükleme Etkisinde Dudakların Gerilme Durumuna Göre Elemanların Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	51
3.3. Tersinir-Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları.....	55
3.3.1. Tersinir-Tekrarlı Yükleme Etkisinde Dudakların Gerilme Durumuna Göre Elemanların Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi.....	70

3.4. Monotonik Yükleme Sonlu Eleman Analiz Sonuçları.....	73
3.4.1. Monotonik Yükleme Etkisindeki Elemanların Deney ve Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	84
3.5. Tersinir-Tekrarlı Yüklemelerin Sonlu Eleman Analiz Sonuçları.....	92
3.5.1. Çevrimsel Yükleme Etkisindeki Elemanların Deney ve Sonlu Eleman Analizlerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması	103
3.6. Parametrik alışma	112
3.6.1. Parametrik alışmanın Kapsamı.....	112
3.6.2. Parametrik alışma Sonuçları.....	115
4. SONUÇLAR.....	2
5. ÖNERİLER.....	128
6. KAYNAKLAR	129
7. EKLER.....	129
ZGEMİş	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

C ENKESİTLİ HAFİF ÇELİK PROFİLLERİN MERKEZİ VE EKSANTRİK YÜKLEME ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yılmaz YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Serhat DEMİR
2023, 129 Sayfa, 3 Sayfa Ek

Bu tez kapsamında, eksenel yük ve iki eksenli eğilme momentinin ($P-M_x-M_y$) birleşik etkisi altında dudaklı kanal kesitli soğuk şekillendirilmiş kiriş-kolon elemanlarının burkulma davranışı incelenmiştir. Her biri 1500 mm uzunluğunda olan toplam 30 eleman monotonik ve tersinir-tekrarlı yükleme altında deneysel olarak test edilmiştir. Numunelerin eksantrik yükleme altındaki dayanım ve enerji yutma kapasitesi gibi performansları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kesitin taşıma kapasitesini belirleyen yerel, çarpılmalı ve global burkulma modları ve tüm bu burkulma modlarının görülebileceği dudaklı kanal elemanı uzunluğu belirlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi (finite element analysis (FEA)) Abaqus yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Doğrulan sonlu eleman modeli kullanılarak, çeşitli kesit boyutlarına ve uzunluklara sahip sigma ve dudaklı kanal kesitli elemanlar üzerinde 345 FEA gerçekleştirilerek kapsamlı bir parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışma sonunda monotonik ve tersinir tekrarlı deneysel ve sayısal çalışmalarda genellikle, P elemanların enerji tüketme kapasitelerinin N elemanlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda, C-kesitli hafif çelik kiriş-kolon elemanların burkulma özellikleri büyük ölçüde belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif çelik, C-kesit, monotonik yükleme, çevrimsel yükleme, sonlu eleman analizi

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF C-SECTION COLD-FORMED STEEL PROFILES UNDER AXIAL AND ECCENTRIC LOADING

Yılmaz YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Serhat DEMİR
2023, 129 Pages, 3 Pages Appendix

In this thesis, the buckling behavior of cold-formed steel (CFS) beam-column members with lipped channel sections under the combined effect of axial load and biaxial bending moment ($P-M_x-M_y$) is investigated. A total of 30 members, each 1500 mm in length, were experimentally tested under monotonic and cyclic loading. The local, distortional and global buckling modes that determine the bearing capacity of the section and the length of the lipped channel member in which all these buckling modes can be seen were determined. Finite element analysis (FEA) was performed with Abaqus software, and the numerical results were verified with the experimental results. Using the validated finite element model, a comprehensive parametric study was carried out by performing 345 FEA on sigma and lipped channel section members with various cross-sectional dimensions and lengths. The experimental results show that significant differences in load bearing capacity, energy absorption capacity and buckling modes occur even for the smallest eccentricity variation. At the end of the parametric study, monotonic and cyclic experimental and numerical studies generally show that the energy dissipation capacity of P members is higher than that of N members. As a result of the studies, the buckling properties of cold-formed steel beam-column members have been determined to a large scale.

Keywords: CFS, lipped channel section, monotonic loading, cyclic loading, finite element analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Hafif çelik yapı örneği (URL-1).....	1
Şekil 2. Çeşitli kesitlerde hafif çelik profiller (URL-2).....	2
Şekil 3. Roll-form üretim tekniği (URL-3)	3
Şekil 4. Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanların tasarım kriterleri	4
Şekil 5. Tipik bir C kesit profilin burkulma modları (URL-4).....	5
Şekil 6. C profilde çarpılmalı burkulma (Mahi vd., 2019)	6
Şekil 7. Eksantrisenin kuvvetli (a) ve zayıf eksenlerde (b) etkisi	7
Şekil 8. C kesitli deney elemanları ve deney düzeneği	7
Şekil 9. Pozitif ve negatif flanş açılımları ve deney görüntüsü(Young vd., 2003).....	8
Şekil 10. C kesitli hafif çelik profilin deney sonu görüntüsü (Lam vd., 2006)	8
Şekil 11. Çok parçalı C kesitli deney elemanı ve deney düzeneği	9
Şekil 12. C kesite kolon ve kirişten oluşan sistemin görüntüsü	9
Şekil 13. C profilin 3 farklı eksantrisinde yüklenmesi ve deney sonuçları	10
Şekil 14. Deney düzeneği ve deney, analiz sonuçları.....	11
Şekil 15. Deney düzeneği ve deney elemanının sonlu eleman modeli.....	12
Şekil 16. Deney anında 2 farklı boydaki sigma kesitli elemanının görüntüsü	13
Şekil 17. Monotonik çekme deneyinde kullanılan numunelerin geometrik özellikleri	15
Şekil 18. Monotonik çekme numunelerinin ortalama gerilme- birim şekildeğiştirme diyagramı	16
Şekil 19. İtme-çekme deneyinde kullanılan burkulma engelleyici düzenek ve deney anından bir görünüm	17
Şekil 20. İtme- çekme deneyinde uygulanan zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği	17
Şekil 21. İtme-çekme deneyi sonucunda elde edilen ortalama gerilme- birim şekildeğiştirme eğrisi.....	18
Şekil 22. Deneyde kullanılan elemanın enkesit ölçüleri.....	19
Şekil 23. Eleman başlığının ölçüleri ve kesimi	19
Şekil 24. C-enkesitli profillerin deney hazır halleri.....	20
Şekil 25. Deney elemanının ağırlık merkezine göre yükleme noktaları.....	20
Şekil 26. Deney düzeneğinin farklı açılardan görünüşleri	20
Şekil 27. Deney düzeneğinin şematik görünümü	20
Şekil 28. Alt ve üst yükleme levhası	20

Şekil 29. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları.....	20
Şekil 30. Plastik mafsallar ve profile yapıştırılma detayı.....	20
Şekil 31. Deney anına ilişkin görüntüler	20
Şekil 32. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü	20
Şekil 33. Abaqus'te kullanılan kabuk elemanlar	21
Şekil 34. S9R5 Kabuk Sonlu Elemanı.....	20
Şekil 35. Deney numunesine ait sonlu eleman modeli ve ağ düzeni.....	20
Şekil 36. Elemana ait yükleme ve mesnetlenme durumları.....	20
Şekil 37. CUFSM Programı yardımıyla hesaplanan kesiti akmaya ulaştıracak eksenel yük (P_y), güçlü (M_{xy}) ve zayıf (M_{yy}) eksen eğilme kapasiteleri	21
Şekil 38. Monotonik ve çevrimsel yüklemeye ilişkin yükleme koordinatları.....	22
Şekil 39. Elemanların yükleme levhası üzerindeki yerleri	34
Şekil 40. M.1500.0.0 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	36
Şekil 41. M.1500.0.180 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	37
Şekil 42. M.1500.0.360 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	38
Şekil 43. M.1500.50.90.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	39
Şekil 44. M.1500.100.180.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	40
Şekil 45. M.1500.100.60.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	41
Şekil 46. M.1500.200.120.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	42
Şekil 47. M.1500.100.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	43
Şekil 48. M.1500.200.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	44
Şekil 49. M.1500.100.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	45
Şekil 50. M.1500.200.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	46
Şekil 51. M.1500.100.60.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	47
Şekil 52. M.1500.200.120.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler.....	48

Şekil 53. M.1500.50.90.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	49
Şekil 54. M.1500.100.180.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	50
Şekil 55. Monotonik yüklemelerde dudakların gerilme durumuna göre numunelerin karakteristik özellikleri	52
Şekil 56. Monotonik yüklemeye ait deney elemanların deney sonu yandan görünümüleri	54
Şekil 57. C.1500.0.0 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	55
Şekil 58. C.1500.0.180 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	56
Şekil 59. C.1500.0.360 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	57
Şekil 60. C.1500.50.90.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	58
Şekil 61. C.1500.100.180.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	59
Şekil 62. C.1500.100.60.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	60
Şekil 63. C.1500.200.120.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	61
Şekil 64. C.1500.100.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	62
Şekil 65. C.1500.200.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	63
Şekil 66. C.1500.100.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	64
Şekil 67. C.1500.200.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	65
Şekil 68. C.1500.100.60.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	66
Şekil 69. C.1500.200.120.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	67
Şekil 70. C.1500.50.90.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	68
Şekil 71. C.1500.100.180.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler	69
Şekil 72. Çevrimlere göre elemanların rijitliklerinin değişimi.....	71
Şekil 73. Tersinir-tekrarlı yüklemeler altında deney elemanlarının deney sonundaki burkulma şekilleri.....	72

Şekil 74. M.1500.0.0 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	74
Şekil 75. M.1500.0.180 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	75
Şekil 76. M.1500.0.360 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	75
Şekil 77. M.1500.50.90.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	76
Şekil 78. M.1500.100.180.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali	77
Şekil 79. M.1500.100.60.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	77
Şekil 80. M.1500.200.120.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali	78
Şekil 81. M.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	79
Şekil 82. M.1500.200.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	79
Şekil 83. M.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	80
Şekil 84. M.1500.200.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	81
Şekil 85. M.1500.100.60.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	81
Şekil 86. M.1500.200.120.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	82
Şekil 87. M.1500.50.90.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	83
Şekil 88. M.1500.100.180.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	83
Şekil 89. C.1500.0.0 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	93
Şekil 90. C.1500.0.180 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	93
Şekil 91. C.1500.0.360 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	94
Şekil 92. C.1500.50.90.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	95
Şekil 93. C.1500.100.180.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali.....	95

Şekil 94. C.1500.100.60.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	96
Şekil 95. C.1500.200.120.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	97
Şekil 96. C.1500.100.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	97
Şekil 97. C.1500.200.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	98
Şekil 98. C.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	99
Şekil 99. C.1500.200.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	99
Şekil 100. C.1500.100.60.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	100
Şekil 101. C.1500.200.120.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali	101
Şekil 102. C.1500.50.90.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali.....	101
Şekil 103. C.1500.100.180.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali	102
Şekil 104. Parametrik çalışmadaki yükleme noktaları	112
Şekil 105. Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre β_{FEM} 'in hesaplanma yöntemi	114
Şekil 106. 500 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultlarındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	119
Şekil 107. 1000 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultlarındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	119
Şekil 108. 1500 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultlarındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri	120
Şekil 109. 500, 1000 ve 1500 mm uzunluğundaki elemanlar için taşıma kapasiteleri	120
Şekil 110. 500, 1000, 1500 mm uzunluğundaki elemanlara ait normalleştirilmiş dayanım uzayları	121

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Monotonik çekme deneyinden elde edilen ortalama sonuçlar	16
Tablo 2. Yükleme koordinatları ve yükleme durumları	20
Tablo 3. Ön kusur büyüklükleri.....	20
Tablo 4. Deney elemanlarının yükleme noktalarına göre etiket kodları	35
Tablo 5. Monotonik yüklemeye ait deney sonuçları ve burkulma şekilleri	53
Tablo 6. Analiz yapılacak elemanın görünümü ve Abaqus programına girilen yükleme koordinatları.....	73
Tablo 7. M.1500.0.0 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması	85
Tablo 8. M.1500.0.180 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması	85
Tablo 9. M.1500.0.360 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması	86
Tablo 10. M.1500.50.90.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	86
Tablo 11. M.1500.100.180.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	87
Tablo 12. M.1500.100.60.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	87
Tablo 13. M.1500.200.120.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	87
Tablo 14. M.1500.100.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	88
Tablo 15. M.1500.200.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	89
Tablo 16. M.1500.100.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	89
Tablo 17. M.1500.200.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	90
Tablo 18. M.1500.100.60.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	90
Tablo 19. M.1500.200.120.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	91

Tablo 20. M.1500.50.90.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	91
Tablo 21. M.1500.100.180.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	92
Tablo 22. C.1500.0.0 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	103
Tablo 23. C.1500.0.180 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	104
Tablo 24. C.1500.0.360 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	104
Tablo 25. C.1500.50.90.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	105
Tablo 26. C.1500.100.180.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	105
Tablo 27. C.1500.100.60.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	106
Tablo 28. C.1500.200.120.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	106
Tablo 29. C.1500.100.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	107
Tablo 30. C.1500.200.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	107
Tablo 31. C.1500.100.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	108
Tablo 32. C.1500.200.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	108
Tablo 33. C.1500.100.60.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	109
Tablo 34. C.1500.200.120.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	109
Tablo 35. C.1500.50.90.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	110
Tablo 36. C.1500.100.180.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması.....	110
Tablo 37. Sonlu eleman modelinin farklı eksantrisitelerde tersinir-tekrarlı yükleme durumundaki genel burkulma şekilleri.....	111
Tablo 38. Parametrik çalışmada için belirlenen yükleme noktaları ve koordinatları.....	113
Tablo 39. 500 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri	117
Tablo 40. 1000 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri	117

Tablo 41. 1500 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri	118
Ek Tablo 1. 500 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri	130
Ek Tablo 2. 1000 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri	131
Ek Tablo 3. 1500 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri	132



SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ε	: Birim şekildeğiştirme
σ	: Gerilme
ΔL	: Boy değişimi
δ_e	: Elastik yerdeğiştirme
β	: Normalleştirmiş eksenel yük ve momentlerin uzaydaki yeri
A	: Alan
E	: Elastisite Modülü
GPa	: Gigapascal
J	: Joule
kN	: Kilonewton
L	: Boy
L_0	: İlk boy
MPa	: Megapascal
M_x	: Güçlü eksen moment değeri
M_{xy}	: Kesiti akmaya ulaştıracak güçlü eksen moment değeri
M_y	: Zayıf eksen moment değeri
M_{yy}	: Kesiti akmaya ulaştıracak zayıf eksen moment değeri
P	: Eksenel yük değeri
P_y	: Kesiti akmaya ulaştıracak eksenel yük değeri
cm	: Santimetre
dk	: dakika
mm	: milimetre
mm/sn	: milimetre/saniye

1.GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

Hafif çelik yapı elemanları, sac levhalardan kesilmiş çelik şeritlerin bir üretim bandı boyunca silindirler arasından geçirilmesi veya preslerle bükülmesi ile elde edilir. Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanlarının kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. Bu yapı elemanları, 19. yüzyılın ortalarında ABD ve İngiltere'de kullanılmış ve 1849'da bir çatı ustası tarafından oluklu çelik evlerin yapımında kullanılmıştır (Eren, 2014). 1920'ler ve 1930'lar, yapıların tasarım standartlarının olmaması nedeniyle soğuk şekillendirilmiş yapı elemanlarının gelişiminde yavaşlama yaşanmıştır. Ancak, yapısal kullanımdaki artışla birlikte bu yapı elemanlarının davranışı, İkinci Dünya Savaşı sırasında anlaşılmaya başlanmış ve 1946'da ABD'de yapılar için ilk şartname oluşturulmuştur [2]. Soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların gelişimi, İkinci Dünya Savaşı sırasında ve sonrasında devam etmiştir. 1946'dan 1948'e kadar olan dönemde ABD, eski askerler için 2498 konut inşa etmiştir ve bu konutların neredeyse tamamı bu malzemeden yapılmıştır. 1970'te Avrupa'da bu alana artan ilgi devam etmiş ve soğuk şekillendirilmiş çelik ile ilgili ilk Eurocode 1990'lı yıllarda yayınlanmıştır (Macdonald vd., 2008).



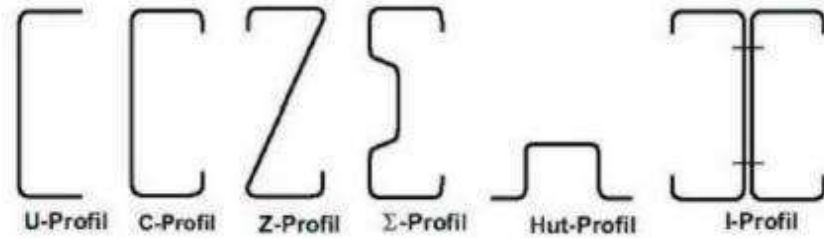
Şekil 1. Hafif çelik yapı örneği (URL-1)

Soğuk şekillendirilmiş çelik profiller özellikle yapısal bileşen olarak başta otomobil endüstrisi, gemi yapımı, demiryolu taşımacılığı, uçak endüstrisi, karayolu mühendisliği, tarım ve sanayi olmak üzere geniş kullanım alanına sahiptir. Yapısal çelik sektöründe

gerçekleşen en büyük gelişmelerden biri, soğuk şekillendirilmiş hafif çelik profillerin çerçeve sistemlerinde kullanılmasıdır. Bu profiller, geleneksel profillere göre çok daha hafif olduğu için az katlı binalar ve endüstriyel yapılar için ekonomik bir tercih olmaktadır (Şekil 1).

Bugün soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlarının yapı sektöründe önemli bir paya sahip olduğu gözlemlenmekte olup son 50 yılda ülkemizde de kullanımı giderek artmaktadır. Hafif çelik profillerin hızla yaygınlaşmasının başlıca sebepleri, düşük ağırlığa sahip olması, istenilen kesit toleransını hızlı bir şekilde sağlayabilmesi, levha malzemesine bağlı olarak yangına dayanıklı olabilmesi ve kütlesi ile dayanım/ağırlık oranı gibi faktörlerdir.

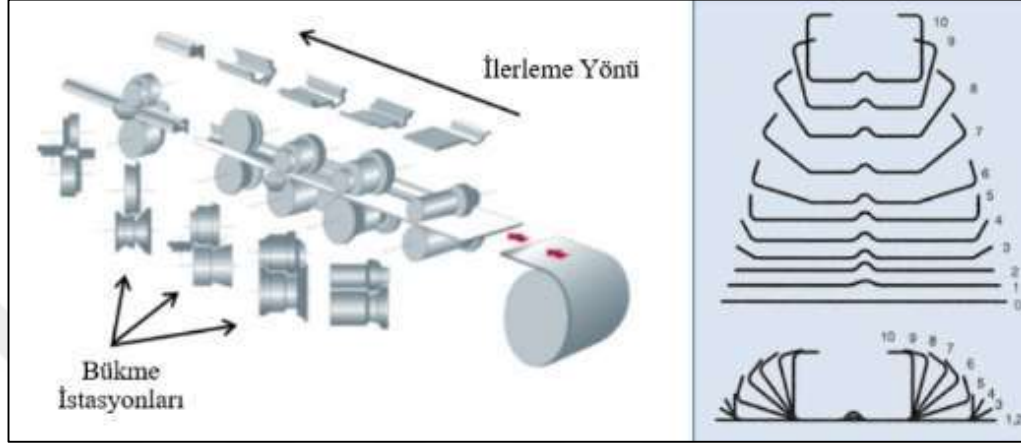
Hafif çelik yapı elemanları, sıcak veya soğuk haddeleme yöntemiyle üretilen profillerdir. Genellikle 50-350 mm yüksekliğe ve 0.6-6 mm kalınlığa sahip olup istek üzerine farklı kesitler de imal edilebilmektedir (Şekil 2). Yaygın olarak kullanılan bazı kesit tipleri, Z profillerin çatı ve saçak detaylarında, Omega profillerin çatı mertekleri veya alçıpan tavan yapımında, U profillerin duvar panellerinin üst veya alt başlıklarında, C profillerin ise taşıyıcı kolon veya kirişlerde kullanıldığı görülmektedir (Eren, 2014).



Şekil 2. Çeşitli kesitlerde hafif çelik profiller (URL-2)

Bazı profillerin yüzeyleri korozyondan etkilenmemesi amacıyla, erimiş çinko banyosuna batırılarak (galvanize) kaplanır. Profillerin formları, saçları çekerek inceltme, kenar bükme veya soğuk halde haddeleme işlemlerinden geçirilerek oluşturulur. Kesit için çekme tekniğinde, tam olarak hadde çekmesiyle bükmede, makaradaki çelik bant, sıkma kısıkaçlı bir çekiç kullanılarak, makara takımları arasından çekilir. Üretilen eleman tek tek sıralanmış şekil verme istasyonlarının farklı tipteki tekerlek şeklinde kalıpları (istasyonlar) arasından geçerek kademeli olarak bükülmekte ve istenen enkesit şeklini almaktadır. Bu üretim tekniği “roll-form” olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 3). Bu teknikle 15m uzunluğa

varan profiller üretilmektedir. Saç ilk etapta büküm makinesine yerleşilir ve alt ve üst flanşları arasında büyük bir kuvvetle sıkıştırılır. Daha sonra makinedeki hareketli bir flanş tarafından istenilen açığa kadar bükülür. Büküm açısı flanşlarda yer alan ayar rayları sayesinde değiştirilebilir.



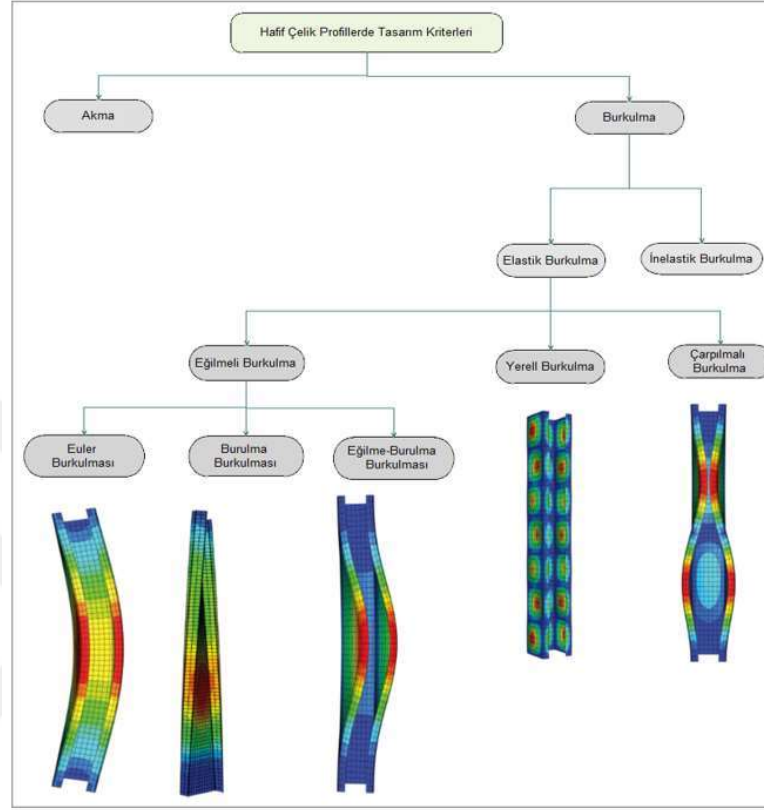
Şekil 3. Roll-form üretim tekniği (URL-3)

Hafif çelik yapı sistemlerinin tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden biri de ölü ağırlıklarının az olmasından ötürü deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde uygun şekilde inşa edildiğinde iyi performans göstermesidir. Bu yüzden nüfusunun %95'i deprem tehlikesi altında yaşayan ve aktif sanayi merkezlerinin %98'i aktif deprem bölgesi üzerinde bulunan ülkemiz için hafif çelik yapı sistemleri büyük önem arz etmektedir (Karamanoğlu & Ulay, 2017). Depreme dayanıklı olarak inşa edilmediği takdirde yapı sistemi hasarın daha yıkıcı olmasına sebep olmaktadır.

1.1. Hafif Çelik Elemanlarda Burkulma

Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik yapı tasarımındaki en büyük zorluklardan biri, basınç elemanlarının burkulma problemidir. Elemanlarının kalınlıklarının genişliklerine göre çok daha düşük olması nedeniyle basınç kuvveti uygulandığında kesit akma gerilmesine ulaşmadan daha düşük bir gerilme değerinde burkulmaktadır. Bu nedenle soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlarda burkulma ana tasarım düşüncelerinden biridir. Kesitlerinde kalınlık/genişlik oranı daha yüksek olan sıcak haddelenmiş çeliğin davranışı

soğuk şekillendirilmiş çeliğin davranışına göre farklılık göstermektedir. Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlar için tasarım kriterleri Şekil 4’te gösterilmiştir.

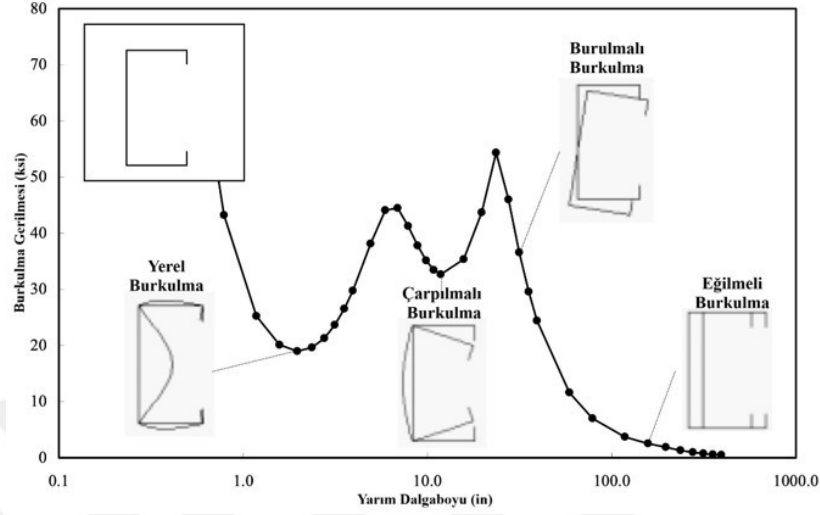


Şekil 4. Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanların tasarım kriterleri (Piyawat vd., 2013)

Basınç etkisindeki elemanlar için genel olarak akma ve genel burkulma olarak iki sınır durumu vardır. Genel olarak kompakt ve kısa (narin olmayan) basınç elemanları malzemenin akması ile ulaşır. Eleman boyu uzadıkça elemanın akmasından ziyade burkulmanın kontrol edilmesi gerekmektedir. Basınç yüklemesi altındaki elemanların burkulmasına sebep olacak birçok faktör bulunmaktadır. Burkulma üzerindeki birincil faktör narinlik oranıdır ancak geometrik kusurlar, yükün eksantrikliği ve malzemedeki kusurlar gibi diğer faktörlerde etkilidir (Kang vd., 2013). Burkulma hem elastik hem de inelastik olarak meydana gelebilir.

Temel olarak soğuk şekillendirilmiş elemanlarda yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burulmalı burkulma olarak adlandırılan üç tip burkulma davranışı gözlemlenebilir. Yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burulmalı burkulma olarak adlandırılır. Bu üç ana burkulma şeklinin dışında başka burkulma şekilleri de gerçekleşebilir. Bunlara eğilmeli ve çarpılmalı, çarpılmalı ve yerel, yerel ve eğilmeli burkulma gibi örnekler verilebilir. Bu burkulma

tiplerine ait burkulma şekilleri ve modları örnek bir C profil üzerinde Şekil 5'te gösterilmiştir.



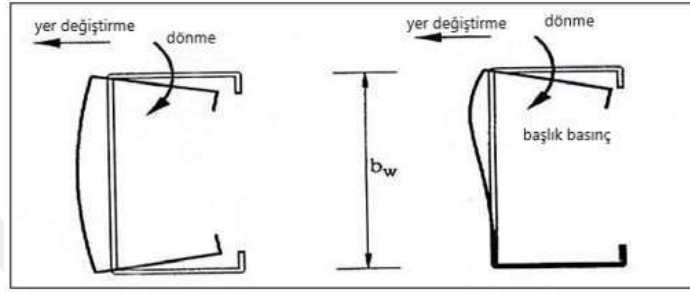
Şekil 5. Tipik bir C kesit profilin burkulma modları (URL-4)

Yerel burkulma sonrasında eleman yük taşımaya devam eder. Kompakt olmayan basınç elemanlarında uzunlamasına kenarın konumu değişmeden yerel burkulma meydana gelir. Bu duruma ek olarak yerel burkulma elemanın kendi iç yapısından da kaynaklanabilir. Yerel burkulma, kompakt basınç elemanlarında yaygın görülen bir burkulma durumudur. Yerel burkulmanın burkulma modu yarım dalga boyu olup diğer göçme modları arasında en kısa olanıdır.

En yaygın eğilmeli burkulma modu, genel (global) burkulma olarak bilinir. Genel burkulmanın davranışı kirişlerin davranışına benzediği için eğilmeli ve eğilmeli burulmalı burkulma olarak da bilinir. Eğilmeli burkulmada kesit şekil değiştirmeden kalır ve sadece yanal hareket yapar. Bu yüzden bu burkulma moduna bazen rijit cisim burkulması da denir çünkü herhangi bir kesit global burkulmadan sonra aynı kalır. Yarım dalga boyuna sahip olan eğilmeli burkulma, burkulma modları arasında en uzun dalga boyuna sahiptir.

Rijitleştirilmiş elemanların burkulmaya karşı direnci rijitleştirilmemiş elemanlara göre önemli ölçüde az olduğu için soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlarda genellikle dudaklar veya diğer tipte kenar rijitleştiriciler tasarlanır. Dudakların eklenmesi ile flanş-dudak bağlantı noktalarındaki düzlem sapmaların engellenmesi amaçlanır.

Dudaklar yeterince orantılıysa bu amaç yerine getirilebilir ancak biraz daha uzun bir dalga boyunda başka bir yarı-yerel burkulma biçimi olasılığı artar. Bu tür davranışın 1980’lerde meydana geldiğini gören Hancock (1997) bu karmaşık davranışı tanımlamak için “çarpılmalı burkulma” olarak tanımlanır. Yerel burulmalı burkulma olarak bilinen burkulma modu, diğer burkulma modlarına kıyasla daha yeni ve daha az araştırılmış bir burkulma modudur. Bu burkulma modu tipik bir C profilinde Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. C profilinde çarpılmalı burkulma (Mahi vd., 2019)

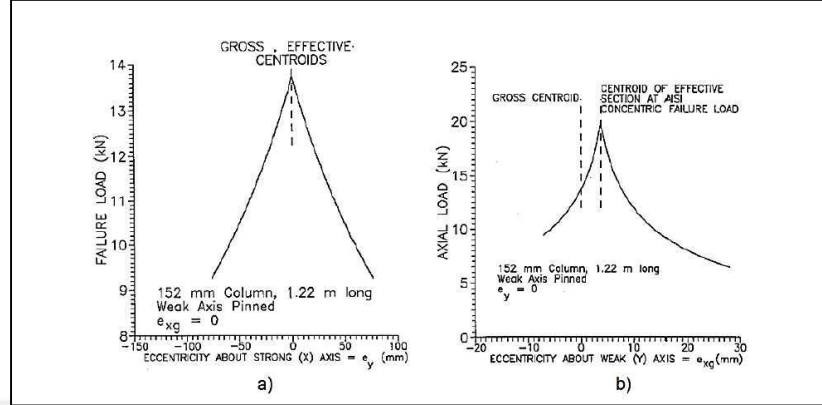
1.2. Daha Önce Yürütülmüş Bazı Çalışmalar

Literatürdeki hafif çelik elemanların konusunda yapılan çalışmalara bakıldığında, büyük çoğunluğunun aksel yük ve eğilme dayanımının belirlenmesine yönelik olduğu görülmektedir. Son yıllarda bu elemanlar üzerinde aksel yük ve eğilme dayanımlarının belirlenmesine ek olarak tersinir-tekrarlı yüklemeler yapılarak enerji sönmüleme ve rijitlik değişimlerinin belirlendiği çalışmalar da yapılmıştır. Bu bölümde aksel, tek veya iki doğrultuda eğilme ve tersinir-tekrarlı yükler altında elemanların incelendiği bazı çalışmalara yer verilmektedir.

1970’ten 2000’li yıllara kadar soğuk şekillendirilmiş çelik kolon profiller üzerine bir dizi deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden bazıları Klöppel ve Bilstein (1976), Rhodes ve Harvey (1977) ve Batista ve ark. (1987). Ayrıca Klöppel ve Bilstein (1976), Thomasson (1978), Rodos ve Loughlan (1980), Mulligan ve Peköz (1983), Batista ve ark. (1987) ve Weng ve Peköz (1990) tarafından yürütülmüştür.

Miller ve Peköz (1994), C kesitli hafif çelik profiller zayıf ve kuvvetli eksenel eksantrik yükleme deneyleri gerçekleştirmiştir. C kesitli hafif çelik kolonların Şekil 7’de verilen aksel yük taşıma kapasiteleri belirlemiş ve elde ettikleri sonuçları AISI 1986

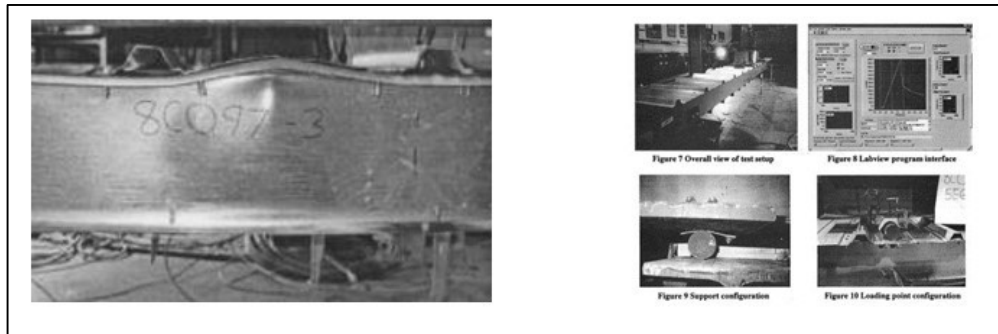
yönetmenliğindeki eğilme ve eğilmeli-burulmalı burkulma hesap yöntemlerine göre karşılaştırmışlardır.



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

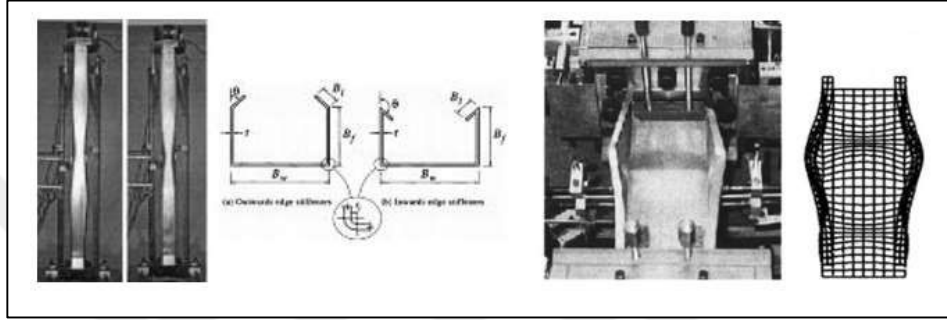
Young ve Rasmussen (1999), sabit ve ankastre tutulu sınır koşullar altında düz ve dudaklı C kesitli hafif çelik kolonlar üzerinde deneyler yapmıştır. Lokal burkulma, çarpılmalı burkulma, genel eğilmeli burkulma ve eğilmeli-burulma burkulmalarının gerçekleşebilmesi için deney numunelerin boyları geniş aralıklarda seçmişlerdir. Sabit mesnetli durumda, tek simetrik C kesitte lokal burkulma eğilmeyi burkulmaya sebep olurken ankastre mesnet durumunda böyle bir burkulma gerçekleşmediğini tespit etmişlerdir.

Yu ve Schafer (2002), C ve Z kesitli hafif çelik kiriş elemanlar üzerinde deneyler yürütmüşlerdir. Şekil 8’de görülen C ve Z kesite sahip kiriş elemanlarda lokal burkulma görülmüştür. Deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. C ve Z kesite sahip iki kiriş elemanın da elastik ve yerel burkulma meydana gelmiş ve AISC standartlarına göre bu profiller yapısal eleman olarak kullanılmaya elverişli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 8. C kesitli deney elemanları ve deney düzeneği (Yu & Schafer, 2002)

Young ve Hancock (2003), Şekil 9’da gösterilen farklı flanş/kalınlık oranına sahip C kesitli hafif çelik profiller üzerinde dudak ve flanş açılımının pozitif ve negatif olmasının taşıma kapasitesine etkisini gözlemleyebilmek için bir dizi deneyler gerçekleştirmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar Kuzey Amerika Standardı (NAS 2001), Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü Standardı (AISI 1996) ve Avustralya/Yeni Zelanda Standardı (AS/NZS 1996) yönetmelikleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmanın tasarımı ve sayısal olarak araştırılması Young (2004) tarafından yapılmıştır.



Şekil 9. Pozitif ve negatif flanş açılımları ve deney görüntüsü(Young vd., 2003)

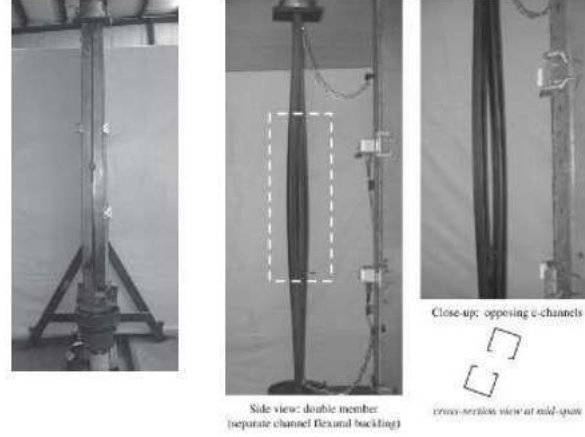
Lam vd. (2006) yaptıkları deneysel çalışmalarda soğuk şekillendirilmiş Şekil 10’da verilen C kesite sahip elemanların yük taşıma kapasiteleri belirlemişlerdir. Yapılan deneylerde C kesite sahip hafif çelik profillerin ilgili standartlara göre belirlenmiş yük taşıma kapasitelerinden daha az miktarda yük taşıdığı belirlenmiştir. Buna ek olarak çelik profillerde yerel burkulmalar görüldüğü ve burkulma yüzünden dayanımda azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 10. C kesitli hafif çelik profilin deney sonu görüntüsü (Lam vd., 2006)

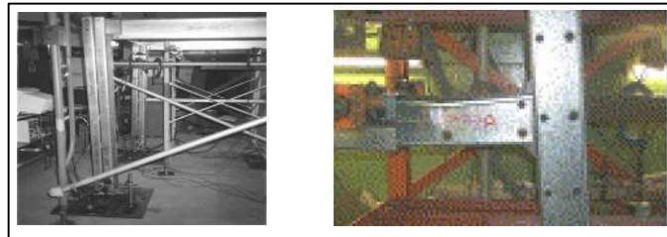
Whittle ve Ramseyer (2009), eksenel yükleme altında Şekil 11’de verilen çok parçalı C kesitin burkulma kapasitelerini araştırmışlardır. Araştırmacılar çok sayıda deney yaparak

elde edilen sonuçları teorik burkulma kapasiteleriyle karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda yerel burkulmaların görüldüğünü ve düzelenmiş kesitin narinlik oranına bağlı olarak ortalama eksenel kapasiteleri genelde %70'ten fazla emniyetli olduğuna ulaşılmıştır.



Şekil 11. Çok parçalı c kesitli deney elemanı ve deney düzeneği (Whittle & Ramseyer, 2009)

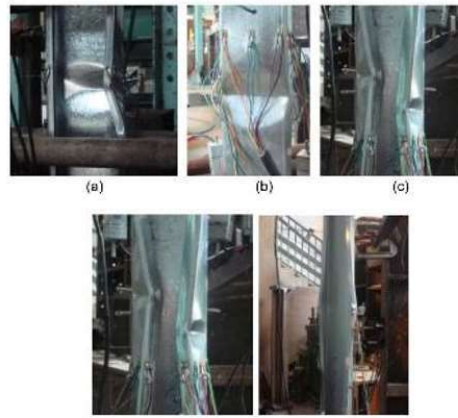
Chung ve Lau (1999) Şekil 12’de görülen hafif çelik profillerin birleşim elemanları ile oluşturulan bağlantının davranışını deneysel olarak incelemişlerdir ve elde ettikleri sonuçları teorik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çift C profil kullanılarak oluşturulan kolon ve kirişlerle yapılan deneylerde bulonlu birleşimdeki moment dayanımının birleşim bölgesindeki moment dayanımının %84’ü kadar oluşabileceğini belirlemişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde, çift C kesitli profillerin yapısal eleman olarak kullanılmasında ekonomik fayda olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 12. C kesite kolon ve kirişten oluşan sistemin görüntüsü (Chung & Lau, 1999)

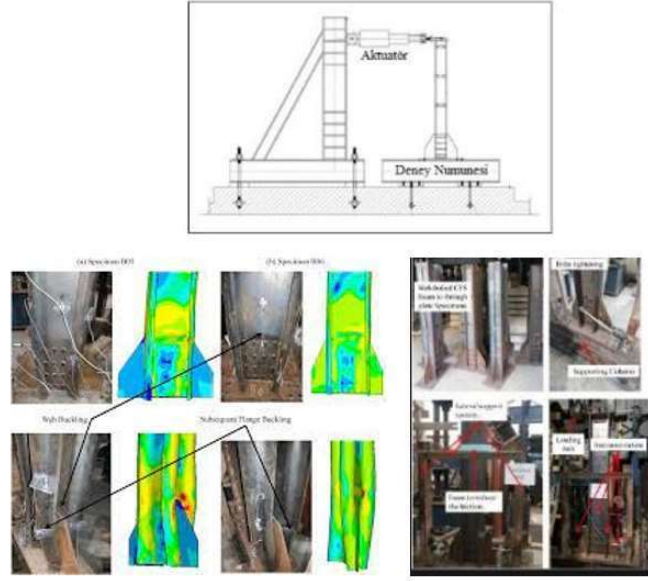
Young ve ark.(2013), yerel ve çarpımalı burkulma modlarında hafif çelik profillerin nihai dayanımlarını ve tasarımlarını araştırmıştır. Yerel ve çarpımalı burkulma arasındaki ilişkiyi incelemek için 26 farklı geometriye sahip dudaklı kolon numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneyden elde edilen veriler sonucunda yeni bir DSM (Direct Strength Method) yöntemi geliştirilmiştir ve yöntemin doğru sonuç verdiği belirlenmiştir.

Li vd. (2014), C profillerin aksel-kuvvetli eksen eğilmesi, aksel-zayıf eksenlerin dudakların basınç ve çekme altında olmasına göre Şekil 13'te gösterilen 3 farklı eksantirisitede yüklenmiştir. Deneysel ve sonlu elaman analizleri EWM (Effective Width Method) ve DSM (Direct Strength Method) yöntemlerini kullanarak karşılaştırmış ve EWM'un DSM'a göre daha uyumlu olduğu bildirilmiştir.



Şekil 13. C profilin 3 farklı eksantirisitede yüklenmesi ve deney sonuçları (Li vd., 2014)

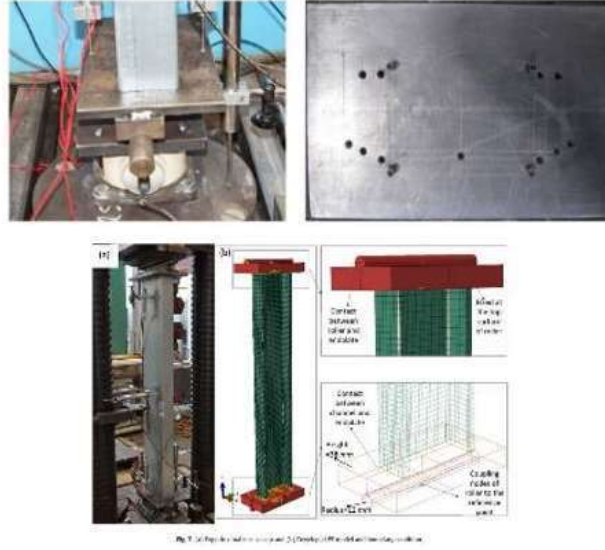
Serror vd (2016), soğuk şekillendirilmiş hafif çelik kirişler Şekil 14'te teknik çizimi verilen aktüatör yardımıyla döngüsel yükler altında dönme kapasitelerini incelemişlerdir. Deneylerde birden fazla kesite sahip profiller kullanılmıştır. Eğilme altında düzlem dışı destekler olmadan burkulmalar daha erken meydana geldiğini ve bu durumdan dolayı yüksek moment dayanımı elde etmek için destekler kullanmışlardır. Abaqus analiz programı kullanarak deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılıp C kesitli kirişlerin daha sünek ve yüksek moment kapasitesine sahip olabilmesi için desteklere ihtiyaç duyulduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 14. Deney düzeneği ve deney, analiz sonuçları (Mohammed H. Serror, 2016)

EI Aghoury ve ark.(2017) sigma kesitli hafif çelik kolonların üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu deneysel çalışmalara ek olarak geometrik kusurlar araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, sayısal modelleme sonuçları ve AISI ve DSM sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Ye ve ark. (2018), yerel ve eğilmeli burkulmalar arasındaki ilişkinin Eurocode 3'e göre tasarım kriterlerin doğruluğu ve önceki çalışmalarda geliştirilen optimizasyon yöntemlerin etkinliği incelemişlerdir. Eksenel yük altında Şekil 3 farklı uzunlukta (1m, 2.5m, 2m) dudaklı ve dudaksız C kesitli kolonlar üzerinde 36 adet deney yapmışlardır. Deney numunesi, numunenin sonlu eleman modeli ve eksantrisiteler Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Deney düzeneği ve deney elemanının sonlu eleman modeli
(Ye, Becque, vd., 2018)

Chen ve ark. (2019), farklı rijitliklere sahip soğuk şekillendirilmiş C ve Z kesitli kolonlar üzerinde deneyler yapmışlardır. 18 adeti C kesite geri kalan 12 adeti Z kesite sahip olan kolonlar ankastre tutulu sınır koşullar altında test edilmişlerdir. Fazla sayıda köşe bükümüne sahip olan kesitlerin düz kesitlere kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduklarını belirlemişlerdir. Deneysel sonuçları DSM (Direct Strength Method) yöntemi ile karşılaştırmış ve gövdesi rijitlendirilmiş C kesit deney numuneleri dışında doğru ve güvenilir sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Öztürk (2021), soğukta şekillendirilmiş sigma kesitli profiller üzerinde farklı boylarda ve eksantrisitetlerde, monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler altında toplamda 90 adet deney yürütmüşlerdir (Şekil 16). Monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler altında deney numuneleri kapasiteleri, stabilite uzayları, süneklik ve enerji tüketme gibi davranış özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Monotonik yüklemeler de analiz ve deneysel sonuçların %5, tersinir-tekrarlı yüklemelerin itmede %13 çekmede ise %16 daha fazla olduğunu bildirmişlerdir. Numunelerin boyları arttıkça yük taşıma kapasitelerinin azaldığını fakat burkulma mekanizmasının değişmediği sonucuna varmışlardır.



Şekil 16. Deney anında 2 farklı boydaki sigma kesitli elemanın görüntüsü

Düşük kalınlık/genişlik oranına sahip elemanlar hafif çelik elemanlar herhangi bir yüklemeye maruz kaldığında elemanda eğilmeli burkulma, çarpılmalı burkulma veya yerel burkulma nedeniyle rijitlik azalmaları meydana gelir. Bu nedenle, hafif çelik yapı elemanlarının oluşturduğu bir yapı incelenecekse, yukarıda bahsedilen burkulmalar nedeniyle meydana gelecek rijitlik azalmaları tasarım aşamasında dikkate alınmalıdır.

Günümüzdeki yönetmeliklere göre (North American Specification, The American Iron and Steel İnstitute Specification ve Australian/New Zealand Standard) eksenel yükleme ve bileşik eğilme etkisindeki basınç elemanlarının kapasitesi aşağıdaki denklemle belirlenebilmektedir.

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

Fakat bu yönetmelikler kolon- kiriş elemanlarda eksenel yük ile eğilme momenti arasında lineer bir ilişkin olduğu yaklaşımını benimseyerek birinci ve ikinci merteye etkilerini dikkate almamıştır. Bu yaklaşım biçimi bazı durumlarda doğru sonuç vermeyebilir. Bu nedenle, ilgili yönetmeliklerde hafif çelik profillerin enerji sönümleme, dayanım ve rijitlik kayıpları gibi karakteristik davranış özellikleri hakkında bilgi verilememekle birlikte yanal yük taşımayan elemanların da katkısı ihmal edilmektedir. Son yıllarda hafif çelik profillerin eksenel yük ve moment taşıma kapasitelerinin belirlenmesine yönelik “Effective With

Method” (EWM) ve “Direct Strength Method” (DSM) olmak üzere iki farklı yöntem önem kazanmıştır. EWM temelini düzlem elemanlardaki yerel burkulmaların herhangi bir kesiti meydana getiren bu elemanların etkenliklerinde azalma meydana getireceği oluşturmaktadır (Yu ve Lokie, 2016). Başka bir ifadeyle, yük altında burkulan bir levhadaki gerilme hali basitleştirilerek genişliği azaltılmış bir levhada idealize edilmiş denge halinde ifade edilmektedir. Etkili genişliği hesaplayabilmek için uzun iterasyon işlerini yapmak bu yöntemi oldukça güç bir hale getirmektedir. DSM yönteminde ise elemanın dayanımı kesitin tamamında meydana gelecek tüm elastik burkulmalara (yerel, çarpılmalı ve genel) göre kesiti akmaya zorlayacak yükün bulunması ile doğrudan belirlenmektedir (Schafer, 2008). Bu yöntem diğer yöntemlere kıyasla daha kolay olduğu için çalışmalarda daha çok kullanılmaktadır. DSM yöntemi için Johns Hopkins Üniversitesi’nde CUFSM (2017) adlı bir yazılım programı geliştirilmiştir. Bu program profilin kesitini akmaya ulaştıracak burkulma modlarının hangi yük ve dalga boylarında oluşacağını belirleyerek eleman dayanım hesaplamalarını önemli ölçüde kolay hale getirmiştir. Fakat, bu yöntemin kullanımı tersinir-tekrarlı yükleme altındaki bir yapı elemanının tasarımı için uygun olmamaktadır. Bir yapı sisteminin sismik etkiler altındaki davranışına ilişkin bilgi sahibi olabilmek için yapıyı oluşturan taşıyıcı elemanların ve bileşim yerlerinin, enerjiyi nasıl ve ne ölçüde sönümleyebildiklerini belirleyebilmek gerekmektedir. Yukarıda sıralanan bilinmeyenler bu alandaki çalışmaların temel hedefi olmuştur.

Bu tez kapsamında, 30 adet C-enkesitli soğuk şekillendirilmiş hafif çelik eleman eksenel yük, bir veya iki eksenli bileşik eğilme ($P-M_x-M_y$) etkisinde kalacak şekilde yüklenerek taşıma kapasitesi, tüketilen enerji ve süneklilik gibi karakteristik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak deney elemanlarının 15 tanesi monotonik, 15 tanesi ise tersinir-tekrarlı olarak 15 farklı eksantriseden yüklenerek test edilmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak aynı yükleme tipi ve eksantrisite kullanılarak 30 adet sonlu eleman analizi yapılmıştır. Deney çalışmaları ve sonlu eleman analizinden elde edilen taşıma kapasitesi, tüketilen enerji ve süneklilik gibi karakteristik özellikler karşılaştırılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

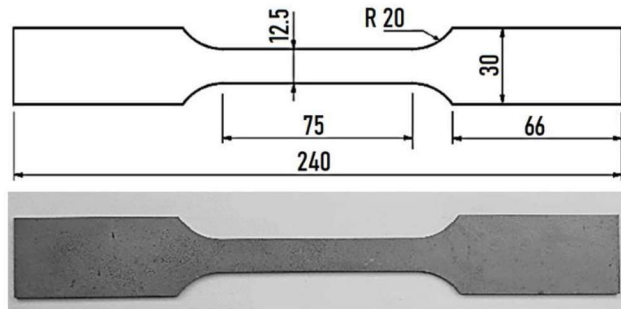
2.1. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar kapsamında, C-enkesitli kiriş-kolon elemanlara eksenel yük, bir veya iki eksenli bileşik eğilme etkisinde kalacak şekilde çeşitli eksantrisite değerlerinde, monotonik ve tersinir-tekrar yüklemeler yapılmıştır. Bu bölümde deney elemanlarının üretiminde kullanılan malzemeler ve bu malzemeler üzerinde gerçekleştirilen çekme testleri, deney elemanlarının özellikleri ve üretimi, deneysel çalışma programı ve kullanılan yükleme protokollerinin özellikleri anlatılmaktadır.

2.1.1. Malzeme Parametrelerinin Belirlenmesi

a) Monotonik Çekme Deneyleri

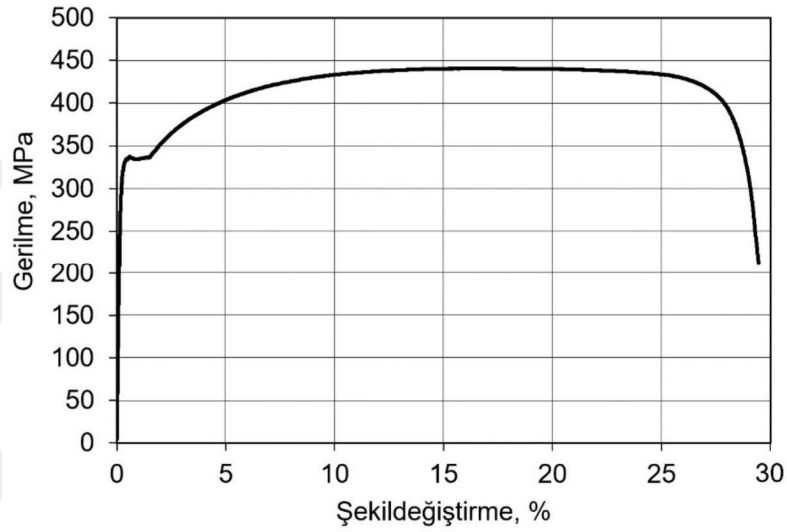
Deneylerde kullanılan profil numuneleri TS EN 10346 (2015) 'e göre akma dayanımı minimum 320 MPa olan 1.5 mm kalınlığında S320GD+Z kalite sınıfında sıcak daldırma yöntemiyle üretilmiş galvanize çelik saclardan imal edilmiştir. Çelik sacların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için TS EN ISO 6892-1 (2020) de verilen ölçülere uygun kupon numuneler hazırlanmıştır. Aynı standartta göre numuneler üzerinde çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Kupon numunelerin geometrik özellikleri Şekil 17' de, deneylerden elde edilen ortalama veriler Tablo 2.1'de ve gerilme- birim şekildeğiştirme eğrisi Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 17. Monotonik çekme deneyinde kullanılan numunelerin geometrik özellikleri
(Öztürk, 2021)

Tablo 1. Monotonik çekme deneyinden elde edilen ortalama sonuçlar (Öztürk, 2021)

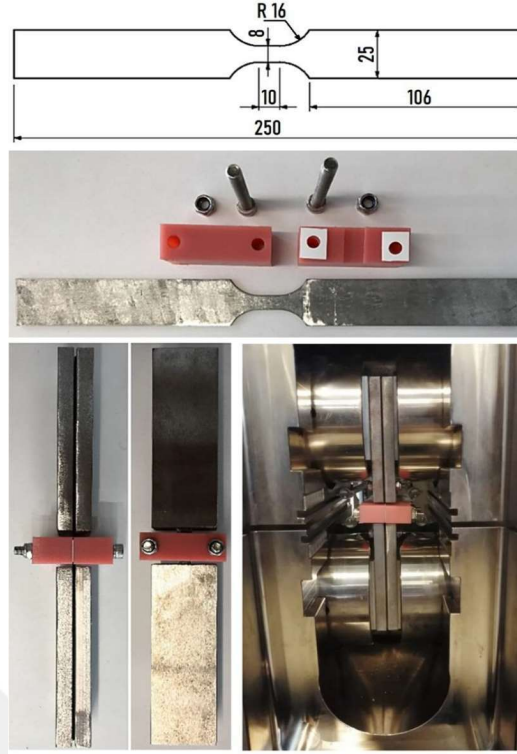
Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)
334	443	28.7	184.03



Şekil 18. Monotonik çekme numunelerinin ortalama gerilme- birim şekil değiştirme diyagramı (Öztürk, 2021)

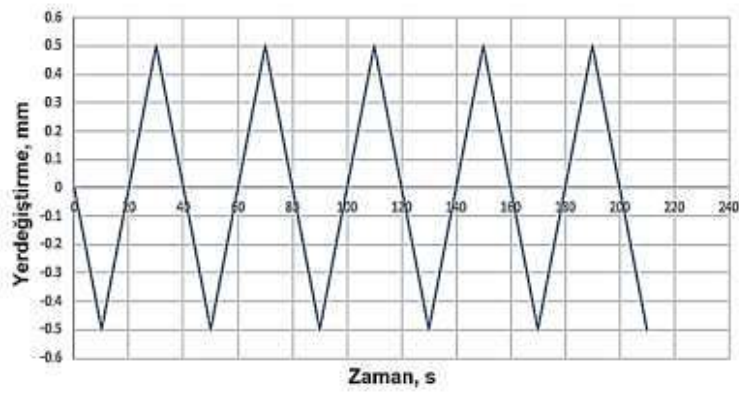
b) Düşük Çevrimli İtme-Çekme Deneyleri

C-enkesitli profillerin tersinir-tekrarlı yükleme etkisinde sonlu eleman analizlerinin gerçekleştirebilmek için gerekli malzeme pekleşme parametreleri düşük çevrimli itme-çekme deneylerinden elde edilen çevrimsel gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri üzerinden hesaplanmaktadır. Hazırlanan kupon numuneler üzerinde BS 7270 (2006) standartlarına göre düşük çevrimli itme-çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında inceltirilmiş orta kesitin basınç etkisinde burkulmasını engellemek amacıyla döküm polayamid malzemeden bir aparat tasarlanıp kullanılmıştır. İtme-çekme deneyinde kullanılan kupon numunenin, geometrik ölçüleri, burkulmayı engelleyen düzenek ve deney anındaki görünümü Şekil 19'da verilmiştir.



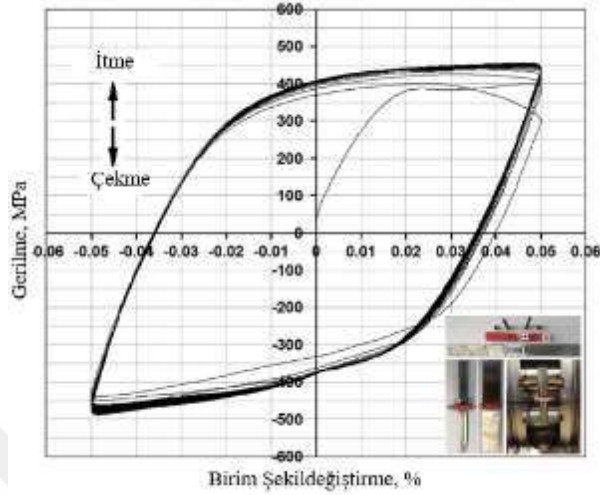
Şekil 19. İtme-çekme deneyinde kullanılan burkulma engelleyici düzenek ve deney anından bir görünüm (Öztürk, 2021)

Deneye hazır hale getirilen kupon numuneler üzerinde %5 genlik oranında deneyler yapılmıştır. Deneylerde birim şekildeğiştirme hızı 5×10^{-3} mm/mm/s olarak seçilerek $L_0 = 10$ mm olan orta bölge boyuna göre yükleme hızı 5×10^{-2} mm/s olarak hesaplanmıştır. Bu hesap doğrultusunda, %5 genlik oranına sahip yerdeğiştirme zaman grafiği Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. İtme- çekme deneyinde uygulanan zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

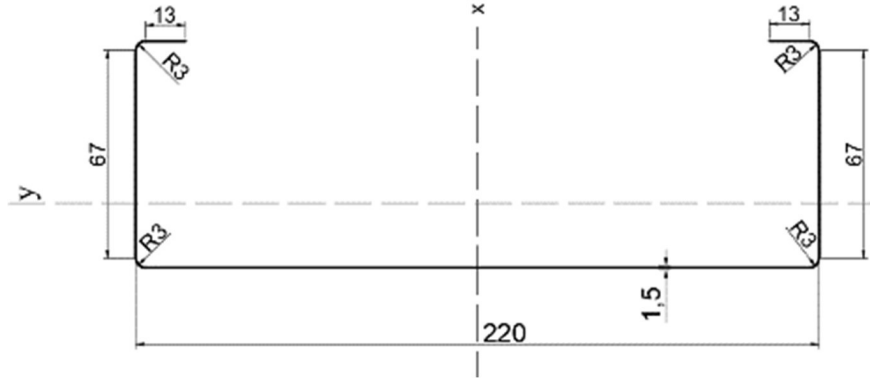
Üç adet kupon numune düşük çevrimli itme-çekme deneyine maruz bırakılmıştır. Her bir numuneye ortalama 80 çevrim uygulanmış olup ortalama gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. İtme-çekme deneyi sonucunda elde edilen ortalama gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi (Öztürk, 2021)

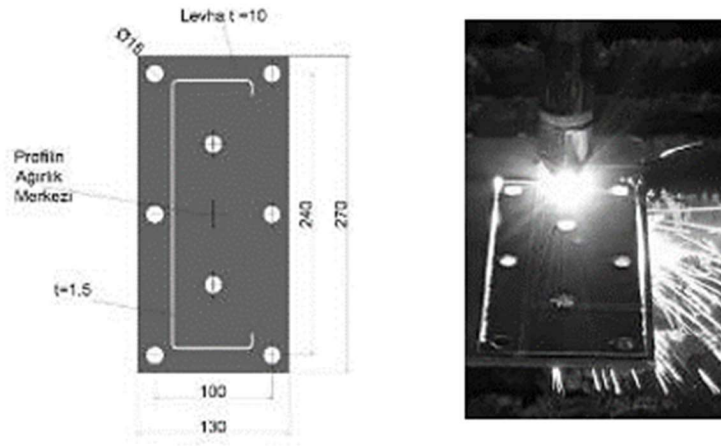
2.1.2. Deney Numunelerinin Enkesiti ve Deneye Hazırlanışı

Enkesit ölçüleri Şekil 22’de verilen deney elemanları, 1.5 mm kalınlığa, 1500 mm uzunluğa ve 552.801 mm² enkesit alanına sahiptir. Deney elemanlarının korozyona uğramasını engellemek için profiller galvanize sacdan üretilmiştir. Profillerin boy doğrultusunun sacların üretim bandından çıkış doğrultusuna denk gelmesi, kesme ve bükme işlemlerinin doğru şekilde uygulanması için kritik bir adımdır. Bu adım, deney sonuçları üzerinde potansiyel olumsuz etkileri önlemek ve parçaların istenilen özelliklere sahip olmasını sağlamak için önemlidir. Eğer profillerin boy doğrultusu ve sacların çıkış doğrultusu birbirine uymazsa, geometrik sapmalar ortaya çıkabilir ve parçalar istenilen boyut ve şekillere sahip olmayabilir. Bu durum, parçaların işlevselliğini etkileyebilir ve dayanım sorunlarına yol açabilir. Montaj süreci de aksayabilir ve üretim kalitesi üzerinde olumsuz etkiler meydana gelebilir.



Şekil 22. Deneyde kullanılan elemanın enkesit ölçüleri

Deney elemanlarının alt ve üst uçları, alt ve üst yükleme levhasına monte edebilmek için, 10 mm kalınlığında üzerinde 8 adet 15 mm çapında delik bulunan başlık levhasına kaynaklanmıştır. Bu çelik levhalar CNC plazmada kesilmiş olup ölçüleri ve kesimine ait görseller Şekil 23’te verilmiştir.



Şekil 23. Eleman başlığının ölçüleri ve kesimi

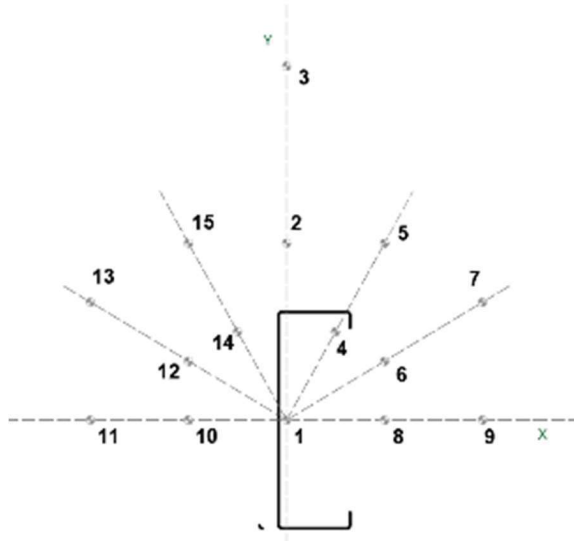
Kaynaklama işlemi için, öncelikle deney elemanlarının alt ve üst uçlarından yaklaşık 25 mm derinliğindeki çinko galvanize kaplama hidroklorik asit çözeltisine 20 dakika daldırılarak eritilmiştir. Daha sonra profillerin ağırlık merkezi levhanın ağırlık merkezine denk getirilerek gaz altı kaynağıyla birleşim tamamlanmıştır. Üretimi tamamlanmış deney elemanları Şekil 24’te verilmiştir.



Şekil 24. C-enkesitli profillerin deney hazır halleri

2.1.3. C-Enkesitli Profiller Üzerinde Yapılan Deneyler

C-enkesitli soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar üzerinde yürütülen deneylerin amacı, monotonik ve tersinir-tekrarlı yükleme altında yerel, çarpılmalı ve eğilmeli burkulma modlarının incelenmesidir. Bu tez kapsamında, 1500 mm uzunluğa sahip C-enkesitli deney elemanları 15 farklı noktadan monotonik ve tersinir-tekrarlı olarak yüklenmiştir. Yükleme noktaları numaralandırılmış ve deney elemanının ağırlık merkezine göre konumları Şekil 25'te gösterilmiştir. Ayrıca yükleme noktası numarasına ilişkin yükleme koordinatları da Tablo 2.2'de verilmiştir.



Şekil 25. Deney elemanının ağırlık merkezine göre yükleme noktaları

2.1.3.1. Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemleri

C-enkesitli hafif çelik elemanlar üzerindeki deneysel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler, HEB200 çelik profiller kullanılarak üretilen yükleme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme çerçevesi yüksek dayanımlı rot ve somunlar yardımıyla güçlü döşemeye sabitlenmiştir.

Tablo 2. Yükleme koordinatları ve yükleme durumları

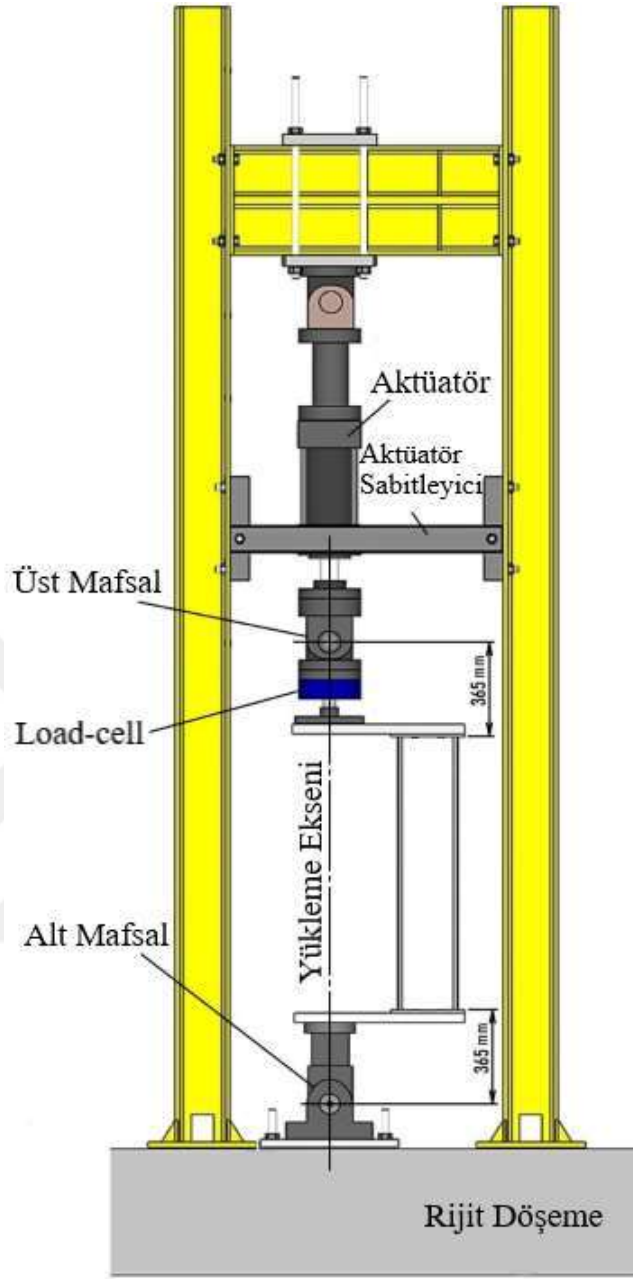
Yükleme Noktası Numarası	Nokta Koordinatı (mm)		Yükleme	
	x	y		
1	0	0	P	Eksenel
2	0	180	P-M ₁	Asal Eksende (x) Eğilme
3	0	360	P-M ₁	Asal Eksende (x) Eğilme
4	50	90	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik Eğilme
5	100	180	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik Eğilme
6	100	60	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik Eğilme
7	200	120	P-M ₁ -M ₂ (+)	Eğik Eğilme
8	100	0	P-M ₂ (+)	Asal Eksende (y) Eğilme
9	200	0	P-M ₂ (+)	Asal Eksende (y) Eğilme
10	-100	0	P-M ₂ (-)	Asal Eksende (y) Eğilme
11	-200	0	P-M ₂ (-)	Asal Eksende (y) 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

Çerçeveadaki kolonların iç başlıklarına 30 cm aralıklarla delikler açılarak deney elemanının boyuna göre güçlü kiriş deliklere M.20-10.3'lük cıvatalar yardımıyla bağlanmıştır. Yerleştirilen güçlü kiriş üzerine belirlenen eksantrisitelere göre aktüatör sabitlenmiştir. Yükleme çerçevesi içine yerleştirilecek deney elemanının her iki ucu da mafsallı bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Aktüatörün yükleme merkezi, üst ve alt mafsalların merkezi ile aynı doğrultuda çakışacak şekilde lazer metre yardımıyla ayarlanmıştır.

Elemanın başlık levhalarının cıvatalarla sabitlemek için altta ve üste olmak üzere iki adet 40 mm kalınlığında yükleme levhası bulunmaktadır. Üst yükleme levhası, aktüatör mafsallına, alt yükleme levhası ise güçlü döşemeye sabitlenen alt mafsala sabitlenmiştir. 30 adet deneyin gerçekleştirildiği deney düzeneğine ilişkin örnek fotoğraflar Şekil 26'da deney düzeneğinin şematik görünümü ise Şekil 27'de gösterilmektedir.

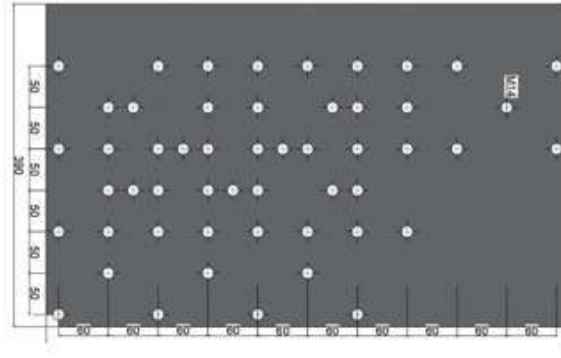


Şekil 26. Deney düzeneğinin farklı açılardan görünümüleri



Şekil 27. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Yükleme levhaları, belirlenen eksantrisite değerlerine göre yarı simetrik şekilde delinmiştir. Deliklere M14 diş çekilmiş ve eleman alt ve üst başlıkları yükleme levhasına M14 cıvatalar yardımıyla bağlanmıştır. Deneylerde, aynı noktaya elemanlar 180° döndürülerek yerleştirilmiştir. Örneğin, 6 numaralı yüklemenin M_2 momenti açısından ters işaretlisi olarak simetriği olan 12 numaralı yükleme deneyi yapılmıştır. 1500 mm boyundaki deney elemanının cıvatalar yardımıyla bağlanacağı yükleme levhasının görünümü Şekil 28’de verilmiştir.



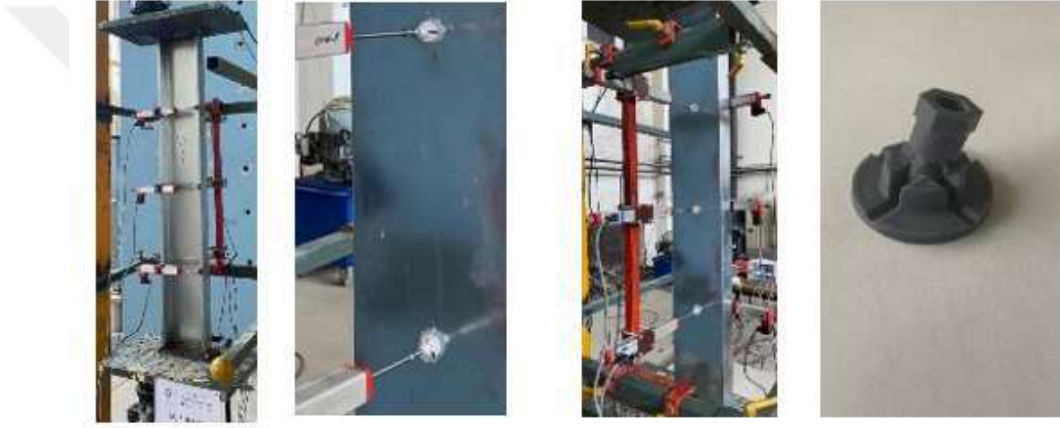
Şekil 28. Alt ve üst yükleme levhası

C enkesitli deney elemanlarına uygulanacak monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler, yerdeğiştirme kontrollü olarak 280 kN kapasiteli servo hidrolik aktüatör ile gerçekleştirilmiştir. Aktüatör, Moog marka deney kontrol cihazı ile kumanda edilerek hedef yerdeğiştirmeler deney elemanlarına uygulanmıştır. Yük ölçümünde, aktüatör ile üst yükleme levhası arasına yerleştirilen 500 kN kapasiteli itme-çekme tipi elektronik yük hücresi (Loadcell) kullanılmıştır. Yerdeğiştirme ölçümlerinde toplamda 7 adet iki ucu mafsallı çeşitli ölçüm boylarında potansiyometrik cetveller (LPDT) kullanılmıştır. Yük hücresindeki ve potansiyometrik cetvellerdeki verilerin toplanıp bilgisayar ortamına aktarılması Coda AI8B marka elektronik veri toplayıcı ile sağlanmıştır. Tüm ölçüm cihazları Şekil 29’da verilmiştir.



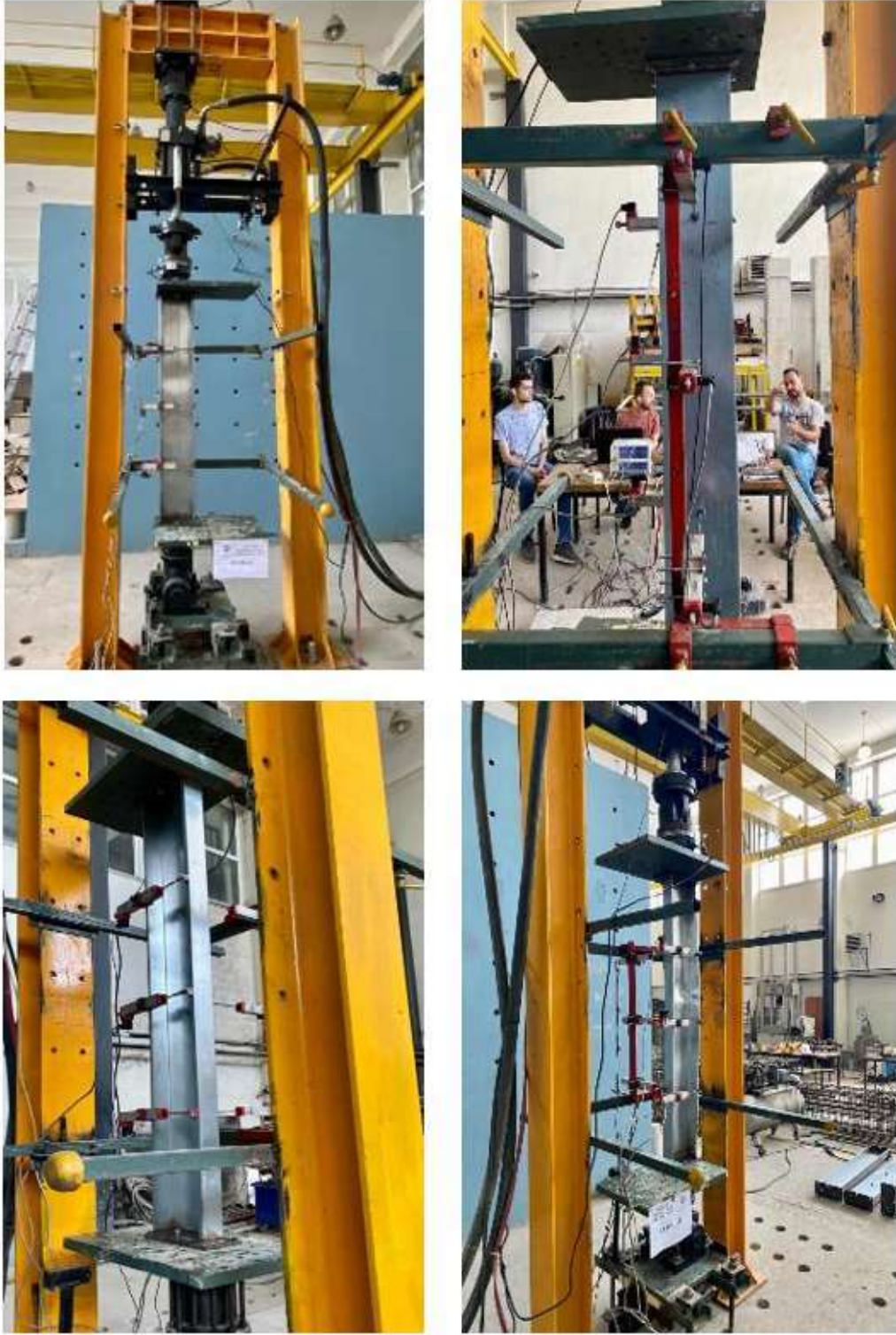
Şekil 29. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları

Tüm ölçümlerin elektronik olarak gerçekleştirildiği deneylerde, veri toplayıcının 8 kanalı kullanılmıştır. Kanallardan bir tanesi Yük hücresini geri kalan yedi adedi yerdeğiştirmeleri ölçmek için kullanılmıştır. Bir adet cetvel düşey yerdeğiştirmeyi, üç adet cetvel gövde boyunca 375 mm aralıklarla yerleştirilerek gövdede gerçekleşebilecek düzlem dışı yerdeğiştirmeleri ölçmek ve üç adet cetvel flanşlar arasına 375 mm aralıklarla yerleştirilerek flanşların açılması durumundaki yerdeğiştirmeyi ölçmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 30 ve Şekil 31). Flanşların ve dudakların burkulmasını ölçebilmek için çelik levha, kutu profil ve cıvata-somun düzeneği yapılmıştır. Yapılan düzenek galvanize profillere hasar vermeyecek ve burkulma davranışını etkilemeyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 30. Plastik mafsallar ve profile yapıştırılma detayı

Deney esnasında LPDT'lerin deney elemanlarını zorlamaması (serbestçe dönebilmesi) için laboratuvar bünyesinde tasarlanan mafsallar 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Birçok kez kullanılabilen bu mafsallar LPDT'lerin ucuna monte edilmiştir. LPDT'lerin ucuna monte edilen bu mafsalların hem dönme kapasitelerinde hem de yapışma dayanıklılıklarında bir sakınca oluşmamıştır. Mafsal ve deney elemanına yapıştırılma detayı Şekil 30'da verilmiştir.



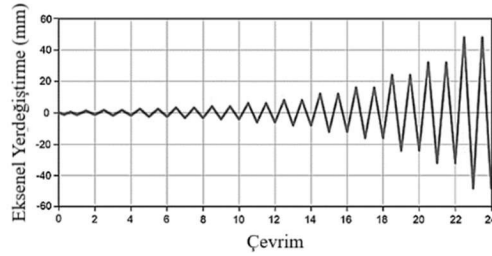
Şekil 31. Deney anına ilişkin görüntüler

2.1.3.2. Monotonik Deneylerde Uygulanan Yükleme Protokolü

Monotonik deneyler, AISI-S910-08 (2008) yönetmeliğinde önerilen dakikada 21 MPa yükleme hızını aşmayacak şekilde yarı statik olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı, malzemenin lineer elastik davrandığı kabulü doğrultusunda $\sigma = E * \varepsilon$ (Hooke Kanunu) bağıntısından eleman boyuna göre $\Delta L = 21L/184000$ formülü ile hesaplanmıştır. 1500 mm boya sahip deney elemanını için: $\Delta L = 0.00333$ mm/s olarak hesaplanıp uygulanmıştır. Monotonik deneyler yük taşıma kapasitesinde %40'lık bir azalma olana kadar devam ettirilmiştir.

2.1.3.3. Tersinir-Tekrarlı Deneylerde Uygulanan Yükleme Protokolü

Tersinir-tekrarlı yüklemeler yarı statik ve yer değiştirme kontrollü olarak yürütülmüştür. Tersinir-tekrarlı yüklemelerde, yükleme protokolü olarak FEMA-461 (2007)'de tanımlanan iki tekrarlı yükleme protokolü esas alınmıştır. Başlangıçtan itibaren her iki döngüden sonra yerdeğiştirme değeri %40 arttırılmıştır. Deneylerde uygulanan yükleme protokolü Şekil 32'de verilmiştir.



Şekil 32. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü

FEMA-461 (2007) yükleme protokolü uyarınca, 4. adımı oluşturan 7 ve 8 nolu çevrimlerde hedef yerdeğiştirme değeri elastik yerdeğiştirme değeri olan $\delta_e = P_e L / AE$ alınarak gerçekleştirilmiştir. Elastik yerdeğiştirme formülündeki elastik burkulma yükü P_e , AISI-S100-12 standardına göre hesaplanmıştır. Bu işlem sonucunda hesaplanan yerdeğiştirme değerine ters çevrimde %40 azaltılarak başlangıç yerdeğiştirme değeri 0.7 mm olarak gerçekleştirilmiştir. Tersinir-tekrarlı yüklemelerde yükleme hızı 0.008 mm/mm/dak olarak alınıp (Padilla-Llano vd., 2014) numunenin boyuna göre $L = 1500$ mm için;

$\Delta L = 0.2$ mm/s olarak hesaplanıp uygulanmıştır.

2.2. Sonlu Eleman Analizleri

2.2.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

C enkesitli hafif çelik elemanların monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler altındaki şekildeğiştirme ve enerji sönümleme mekanizmalarını belirlemek amacıyla Abaqus programı yardımıyla doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Analizlerde parçalar arasındaki etkileşimi hesaba katılarak malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan üç boyutlu modelleme teknikleri kullanılmıştır.

C kesitli hafif çelik profiller CUFSM (Sándor Ádány, 2006) programı ile modellenerek özvektör ve burkulma analizleri yapılmış ve baskın burkulma modları belirlenmiştir. Belirlenen burkulma modları %50 oluşma ihtimaline göre Tablo 2.3'te verilen büyüklüklerle ölçeklenerek Abaqus programındaki sonlu eleman modeline ön kusur olarak eklenmiştir (Zeinoddini, Schafer, 2012). Sonlu eleman modellerinin göçme analizleri doğrusal olmayan malzeme ve geometriyle "Risk arc-length" metodu kullanılarak yapılmıştır.(Öztürk, 2021)

Tablo 3. Ön kusur büyüklükleri(Zeinoddini, Schafer, 2012)

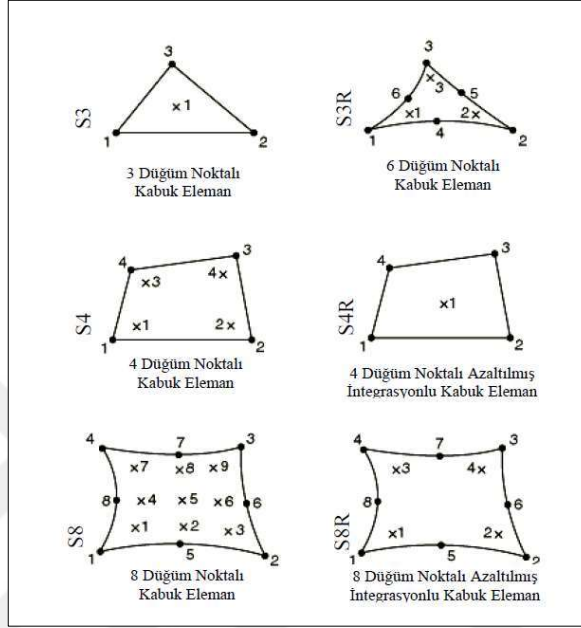
Aşılma İhtimali (%)	Yerel (δ/t)	Çarpılgan (δ/t)	Zayıf Eksen (L/δ)	Güçlü Eksen (L/δ)	Burulma (Derece/m)
25	0.17	0.43	4755	6295	0.20
50	0.31	0.75	2909	4010	0.30
75	0.54	1.14	1659	2887	0.49

2.2.2. Sonlu Eleman Tipi ve Sonlu Eleman Ağı

Bu tez kapsamında, sonlu eleman modeli olarak kabuk (shell) eleman kullanılmıştır. Abaqus programında kabuk eleman modeli mevcuttur, temel olarak bu kabuk elemanlar, genel amaçlı kabuk elemanlar, (S3R, S4R vb. kalın kabuk elemanlar, (S8R, S8RT vb.) ve ince kabuklar (S4R5, STRI35, S8R5, S9R5 vb.) olmak üzere üç başlık altında toplanabilir.

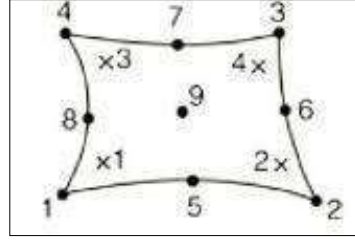
İnce kabuklarda kayma deformasyonu ihmal edilerek Kirchhoff (2009) teorilerine göre analizler yapılırken kalın kabuklarda kayma deformasyonu ihmal edilmez ve Mindlin (2013) teorisine göre analizler gerçekleştirilir. Sonlu eleman analizlerinde analiz boyunca

elemanın kalınlıklarının değiştirilmesi mümkün olduğu durumlarda Abaqus programındaki S3R, S4R gibi elemanların kullanımı tavsiye edilirken elemanın analiz boyunca kalınlığının değişmesinin izin verilmediği durumda STRI3, S8R, S8RT, S8R5, S9R5 gibi elemanlar kullanılır(Öztürk vd., 2022). Şekil 33'te örnek kabuk elemanlar gösterilmiştir.



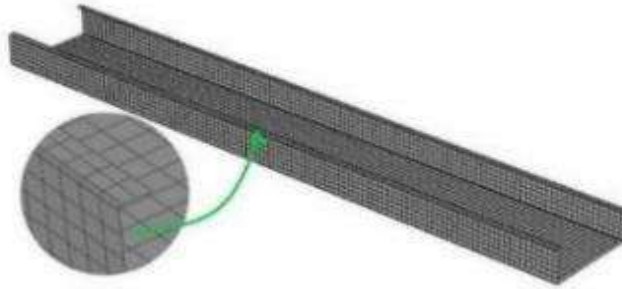
Şekil 33. Abaqus'te kullanılan kabuk elemanlar

Bu tez kapsamında sonlu eleman modeli olarak azaltılmış integrasyon noktalarına sahip 9 nodlu S9R5 kodlu Abaqus kabuk elemanı kullanılmıştır. Şekil 34'te gösterilen S9R5 elemanı düğüm noktalarında 3 doğrultuda yer değiştirme ve 2 doğrultuda düzlem içi dönme yaparak toplamda 5 serbestlik derecesine sahiptir. S9R5 elemanı tek elemanda çift eğriliğe izin verdiği için büyük dönmelerin veya burkulmaların meydana geldiği uygulamalarda kullanılmaktadır. Schafer vd.(2010) yürüttükleri çalışmada, S9R5 kabuk elemanın S4, S4R ve S5R5 gibi diğer kabuk elemanlarla karşılaştırıldığında hesaplama süresi daha verimli ve ince cidarlı elemanlar için yüksek oranda doğru sonuç verdiğini bildirmişlerdir. Çalışma kapsamında kullanılan S9R5 kabuk sonlu elemanı Şekil 34'te gösterilmiştir.



Şekil 34. S9R5 Kabuk Sonlu Elemanı

Soğuk bükme nedeniyle elemanda oluşan artık gerilmelerin eleman dayanımı üzerindeki etkisinin göz ardı edilebilecek olduğu literatürdeki çalışmalar neticesinde (Torabian vd., 2016) belirlendiği için sonlu eleman modellerinde ihmal edilmiştir. Sonlu eleman modellenirken en/boy oranının her iki doğrultuda da 1'e yakın olması dikkat edilerek en büyük elemanın bir kenar uzunluğu 10 mm olarak belirlenmiştir. Köşe bükümlerinde daha uygun sonuç vermesi adına 4 adet sonlu eleman kullanılmıştır. Deney numunesine ait sonlu eleman modeli ve ağ düzeni Şekil 35'te verilmiştir.

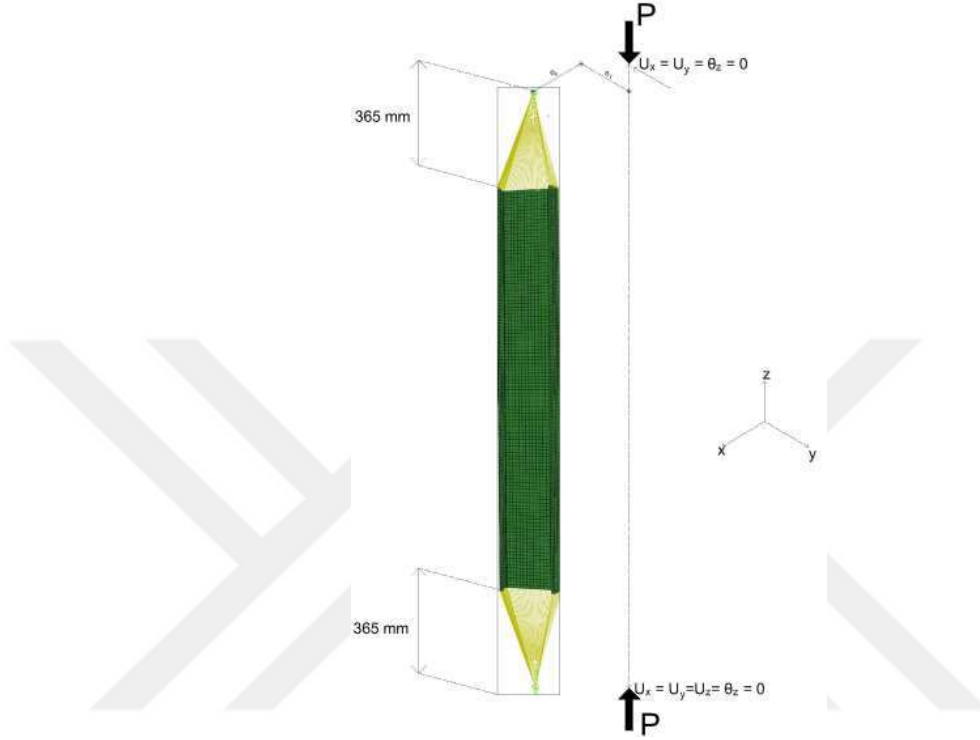


Şekil 35. Deney numunesine ait sonlu eleman modeli ve ağ düzeni

2.2.3. Sonlu Elemanların Yükleme ve Mesnetlenme Durumları

Deney modeli üzerindeki sınır koşullarını sonlu eleman modeline aktarabilmek için deney düzeneğinde olduğu gibi elemanın alt ve üst ucundan 365 mm uzaklıkta bulunan mafsal noktalarına kiriş tipi kontrol noktaları atanmıştır. Eleman uçlarındaki kesitlerin davranışları mafsal noktalarında da sağlandığı için mesnet koşulları da bu noktalarda tanımlanmıştır. Bu kontrol noktalarını (kesitin ağırlık merkezi) merkez kabul ederek kesitin her iki ekseninde hareket ettirilmesiyle eksantrisite oluşturulmuş ve yüklemeler bu noktalardan uygulanmıştır. Mesnet koşulları yüklemenin yapıldığı üst uça eksenal

yerdeğiştirme, kuvvetli ve zayıf eksen dönmeleri serbest, burulma tutuluyken elemanın alt ucuunda üst ucundan farklı olarak sadece eksenel yerdeğiştirme tutulu olarak tanımlanmıştır (Şekil 36).

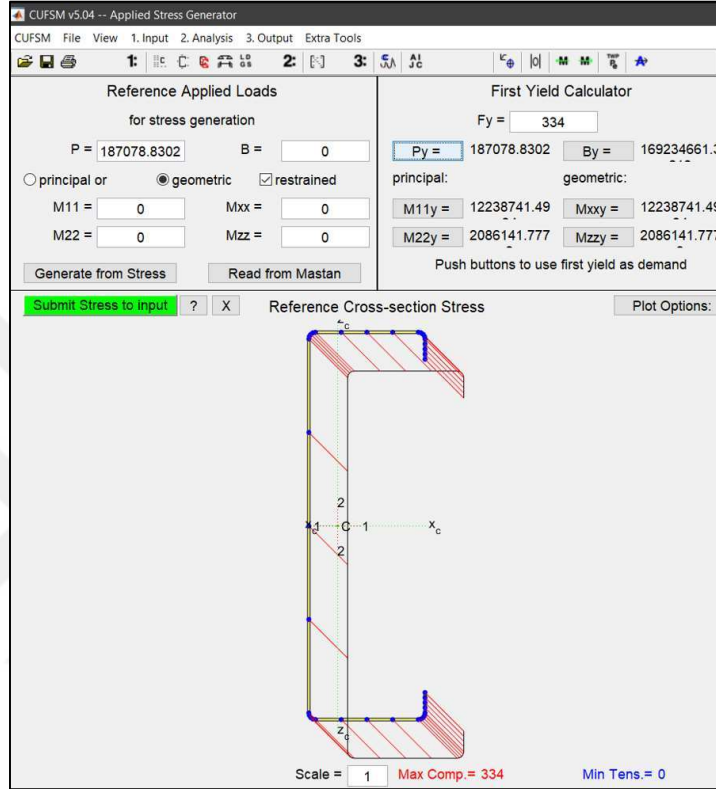


Şekil 36. Elemana ait yükleme ve mesnetlenme durumları

2.2.4. Elemanlara Ait Geometrik Kusurların Belirlenmesi

Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanların taşıma kapasiteleri ve burkulma sonrası davranışları ancak malzeme ve geometrik bakımından doğrusal olmayan sonlu eleman modellerine geometrik ön kusurların doğru şekilde dahil edilmesiyle mümkün olmaktadır. Ön kusurlar, burkulma analizlerinde ulaşılan, genellikle ilk burkulma modunun profil et kalınlığı veya narinliğin bir fonksiyonu olarak ya da profil üzerinden çok hassas ölçümler olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem, işlemlerde kolaylık sağlamasına karşın ön kusur yayılımları ile modelin burkulma modları arasında bir ilişki olduğunun fiziksel bir dayanağı mevcut değildir. Göçme durumları her zaman burkulma modlarına göre ortaya çıkmamaktadır.

C kesitli profil CUFSM yazılımı kullanılarak eksenel yükleme altındaki gerilme durumunu gösteren ve kupon çekme deneyinden elde edilen 334 MPa akma dayanıma (Öztürk, 2021) ve kesit özelliklerine göre hesaplanan kesiti akmaya ulaştıracak eksenel yük (P_y), güçlü (M_{xy}) ve zayıf (M_{yy}) eksen eğilme kapasiteleri Şekil 37’de gösterilmektedir.



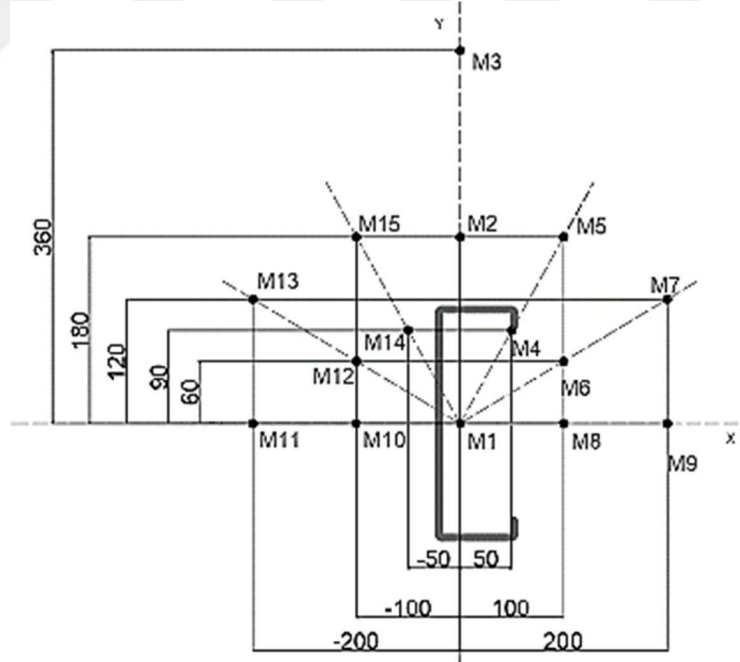
Şekil 37. CUFSM Programı Yardımıyla Hesaplanan Kesiti Akmaya Ulaştıracak eksenel yük (P_y), Güçlü (M_{xy}) ve Zayıf (M_{yy}) eksen eğilme kapasiteleri

Sonlu eleman analizinde kullanılacak numunenin, CUFSM yazılımı kullanılarak eksenel yükleme altındaki gerime dağılımları ile elde edilen burkulma analizlerinden yerel ve çarpımalı burkulma mod şekilleri ve oluştukları yarım dalga boyları elde edilmiştir. Bu modlar %50 oluşma ihtimaline göre genişletilerek CUFSM yazılımı yardımıyla doğrudan Abaqus’te sonlu eleman modeline dönüştürülmüştür.

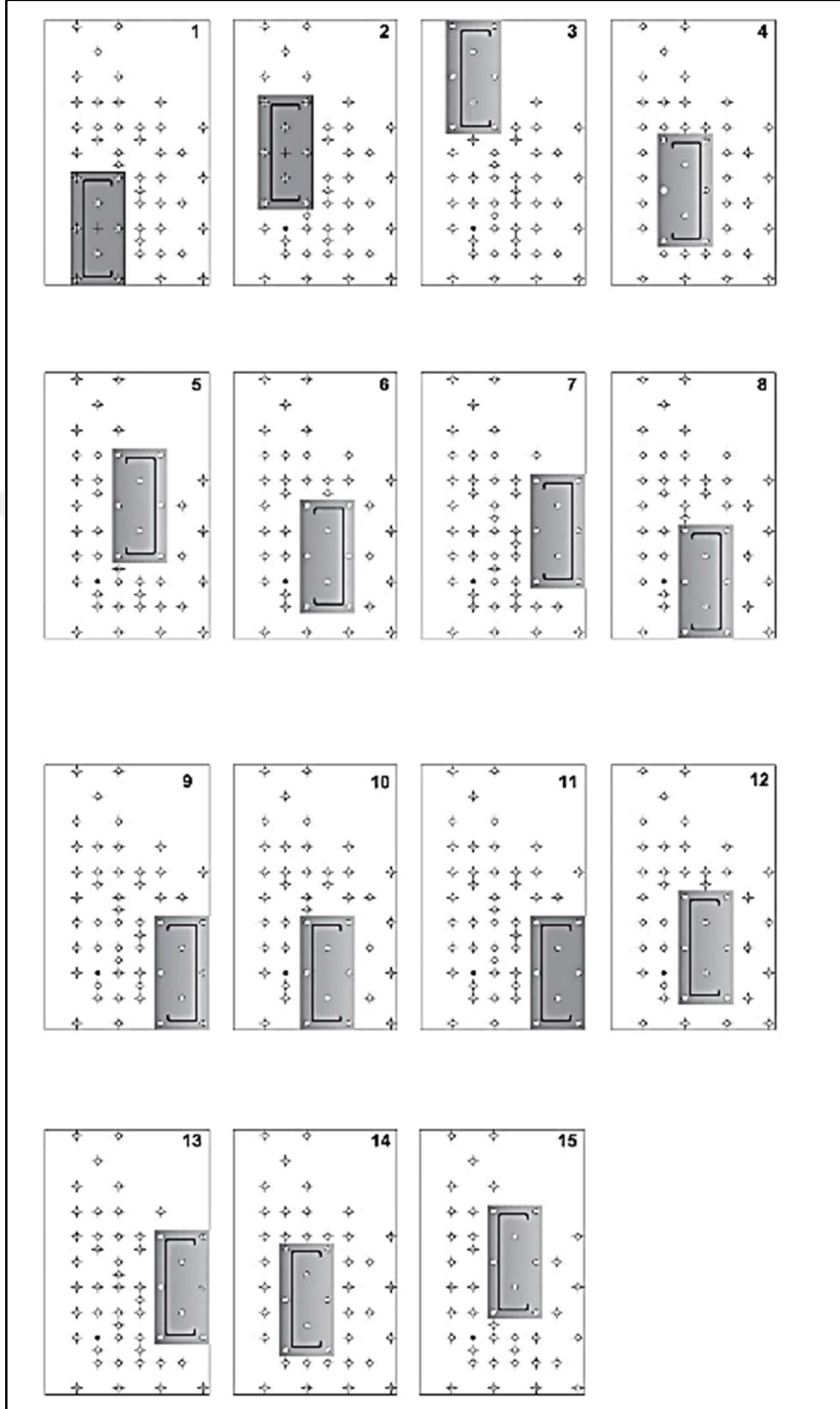
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Çalışmaların Kapsamı

Bu tez çalışması kapsamında, hafif çelik C-kesitli elemanlar, eksenel ve iki doğrultuda çeşitli eksantrisite monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler ile yüklenmiştir. Yüklemeler, özellikle dış yüklerin etkisi altında oluşabilecek eksenel yükü, kuvvetli ve zayıf eğilme etkilerini temsil edecek şekilde hazırlanmıştır. Her deneyde, sabit yükleme levhası üzerindeki deliklerin konumu değiştirilerek Şekil 38'de verilen eksantrisiteler ayarlanmıştır. Deneysel çalışmada, elemandaki yük-düşey yer değiştirme, gövdedeki yer değiştirme ve flanşlardaki yer değiştirme değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sayesinde genel çarpılmalı ve yerel burkulmalar hakkında bilgi edinilmiş ve yük-düşey yer değiştirme eğrileri çizdirilmiştir. Elemanların yükleme levhası üzerindeki konumu Şekil 39'da ve deneylerde yüklemenin yapıldığı koordinatlar ile yükleme kodları Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 38. Monotonik ve çevrimsel yüklemeye ilişkin yükleme koordinatları

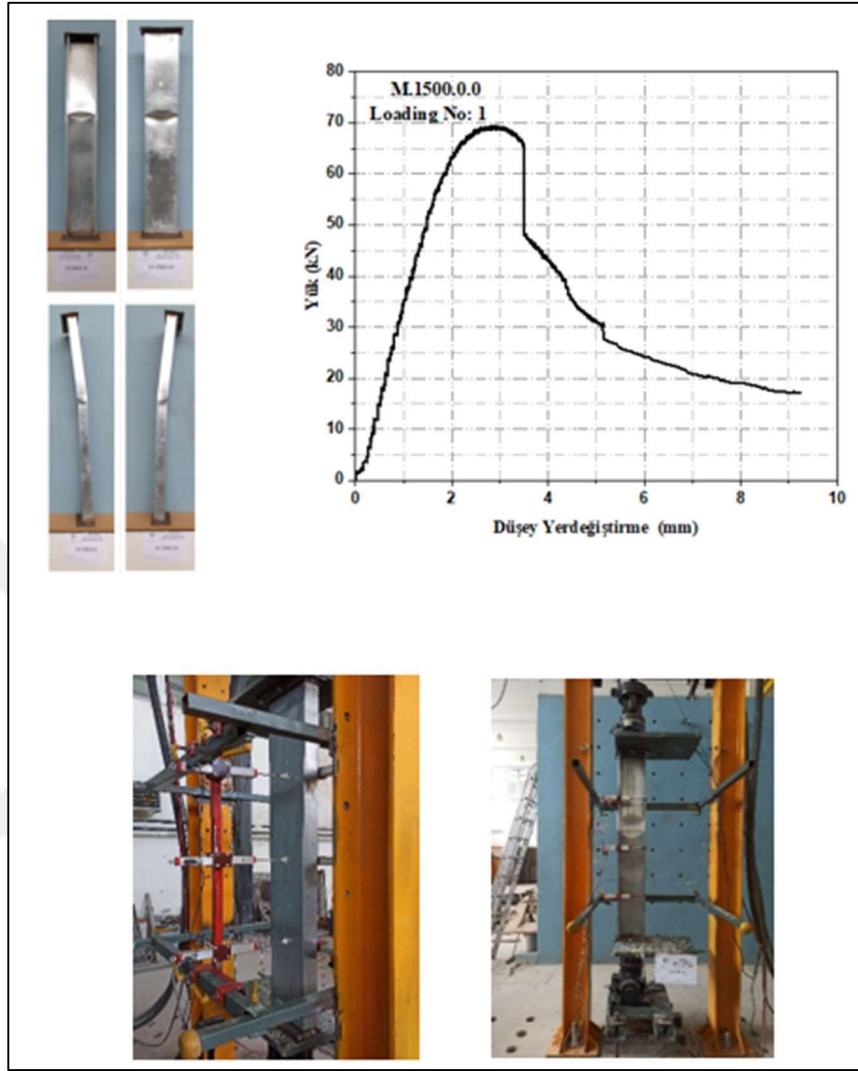


Şekil 39. Elemanların yükleme levhası üzerindeki yerleri

Tablo 4. Deney elemanlarının yükleme noktalarına göre etiket kodları

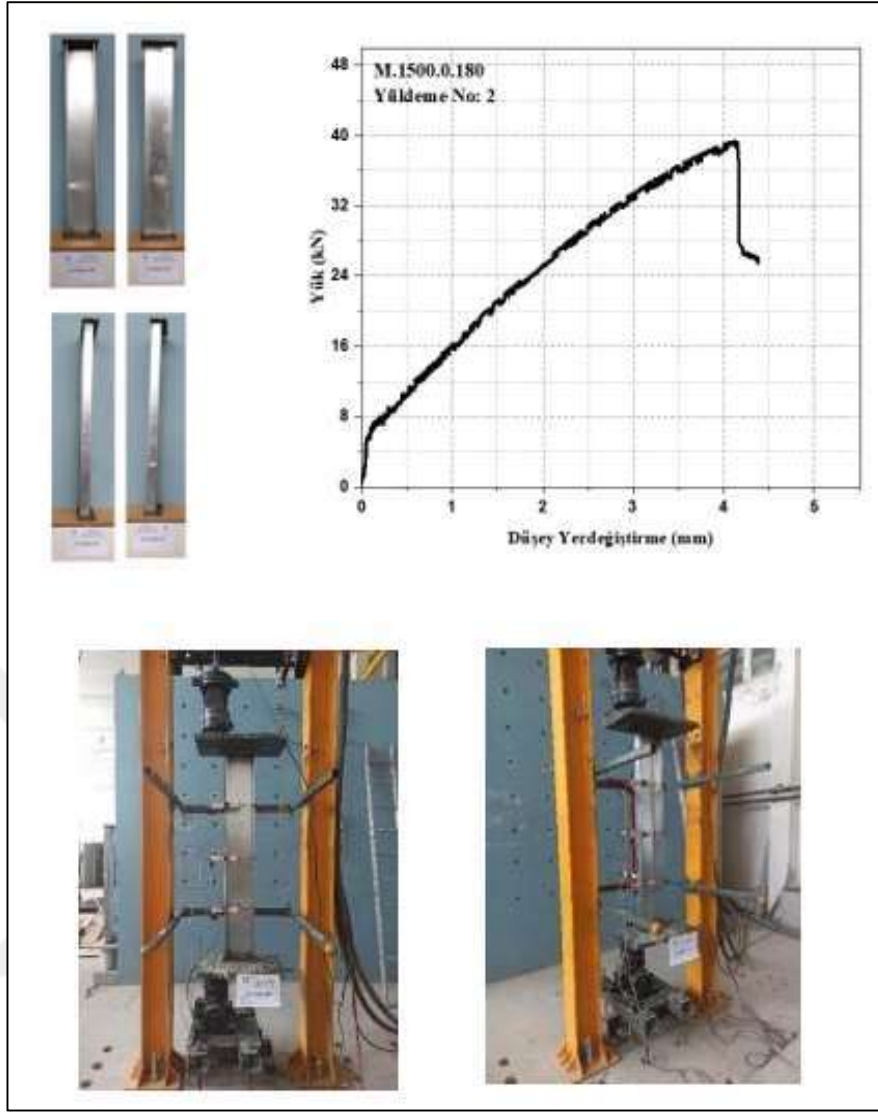
Yükleme Noktası	Koordinat (mm)		Yükleme	Deney Elemanlarının Etiket Kodları	
	x	y		Monotonik	Tersinir-Tekrarlı
1	0	0	P	M.1500.0.0	C.1500.0.0
2	0	180	P-M1	M.1500.0.180	C.1500.0.180
3	0	360	P-M1	M.1500.0.360	C.1500.0.360
4	50	90	P-M1-M2(+)	M.1500.50.90.N	C.1500.50.90.N
5	100	180	P-M1-M2(+)	M.1500.100.180.N	C.1500.100.180.N
6	100	60	P-M1-M2(+)	M.1500.100.60.N	C.1500.100.60.N
7	200	120	P-M1-M2(+)	M.1500.200.120.N	C.1500.200.120.N
8	100	0	P-M2(+)	M.1500.100.0.N	C.1500.100.0.N
9	200	0	P-M2(+)	M.1500.200.N	C.1500.200.N
10	-100	0	P-M2(-)	M.1500.100.0.P	C.1500.100.0.P
11	-200	0	P-M2(-)	M.1500.200.P	C.1500.200.P
12	-100	60	P-M1-M2(-)	M.1500.100.60.P	C.1500.100.60.P
13	-200	120	P-M1-M2(-)	M.1500.200.120.P	C.1500.200.120.P
14	-50	90	P-M1-M2(-)	M.1500.50.90.P	C.1500.50.90.P
15	-100	180	P-M1-M2(-)	M.1500.100.180.P	C.1500.100.180.P

3.2. Monotonik Yükleme Deney Sonuçları



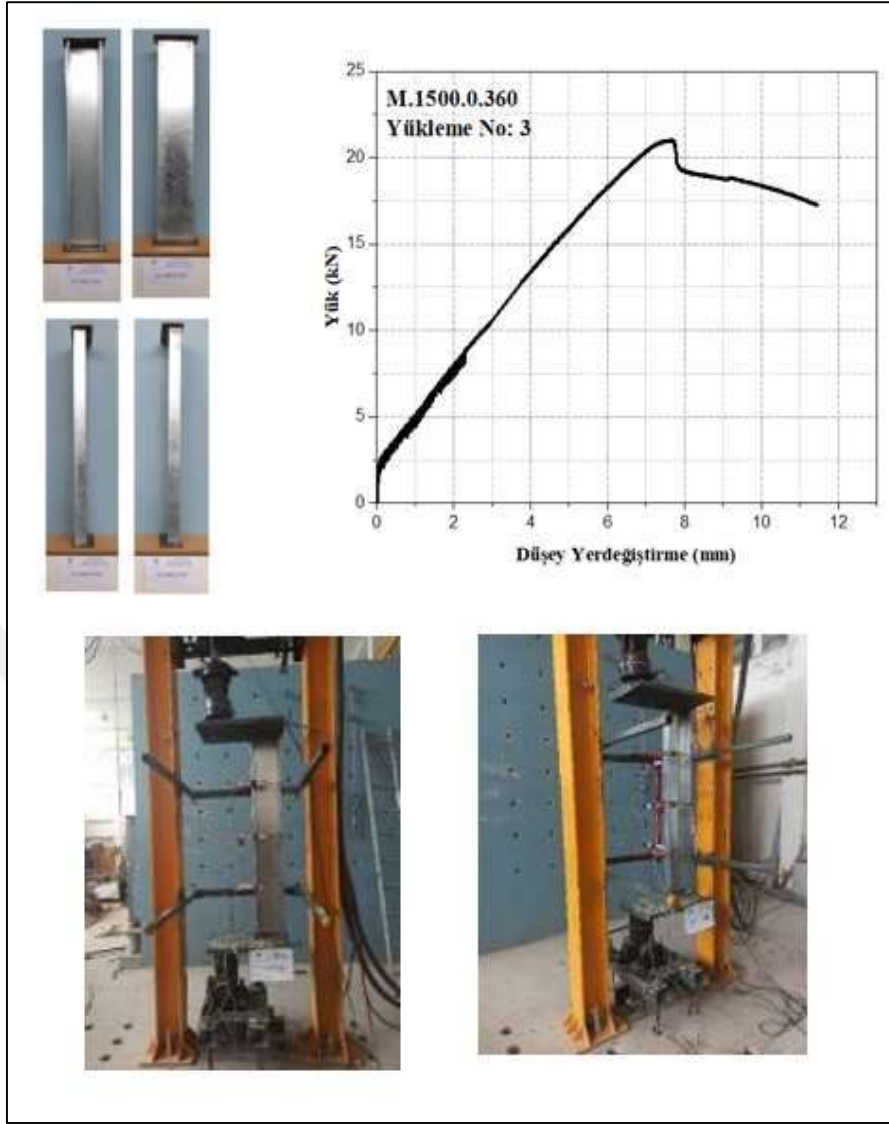
Şekil 40. M.1500.0.0 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

Eksenel yük etkisinde test edilen M.1500.0.0 kodlu deney elemanının deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 40'ta verilmiştir. M.1500.0.0 kodlu numunede burkulma ilk olarak gövdede dalgalanmalar ile başlamıştır. Artan yük seviyelerinde orta kısmının hemen üzerinde gövde flanş birleşim bölgesinde yerel burkulmalar meydana gelmiştir. Gövdedeki burkulma ile yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş görülmüştür. Yükleme devam ettirildiğinde flanş-gövde birleşiminden itibaren dudaklarda yerel burkulmalar görülmüştür. Bu esnada burkulma bölgesinde flanşlar arasındaki mesafe artmıştır. Burkulma sonunda numune kesitin x eksenin negatif (-) yönüne doğru yerdeğiştirme yapmıştır. Maksimum yük 69.489 kN, düşey yerdeğiştirme 2.836 mm olarak ölçülmüştür.



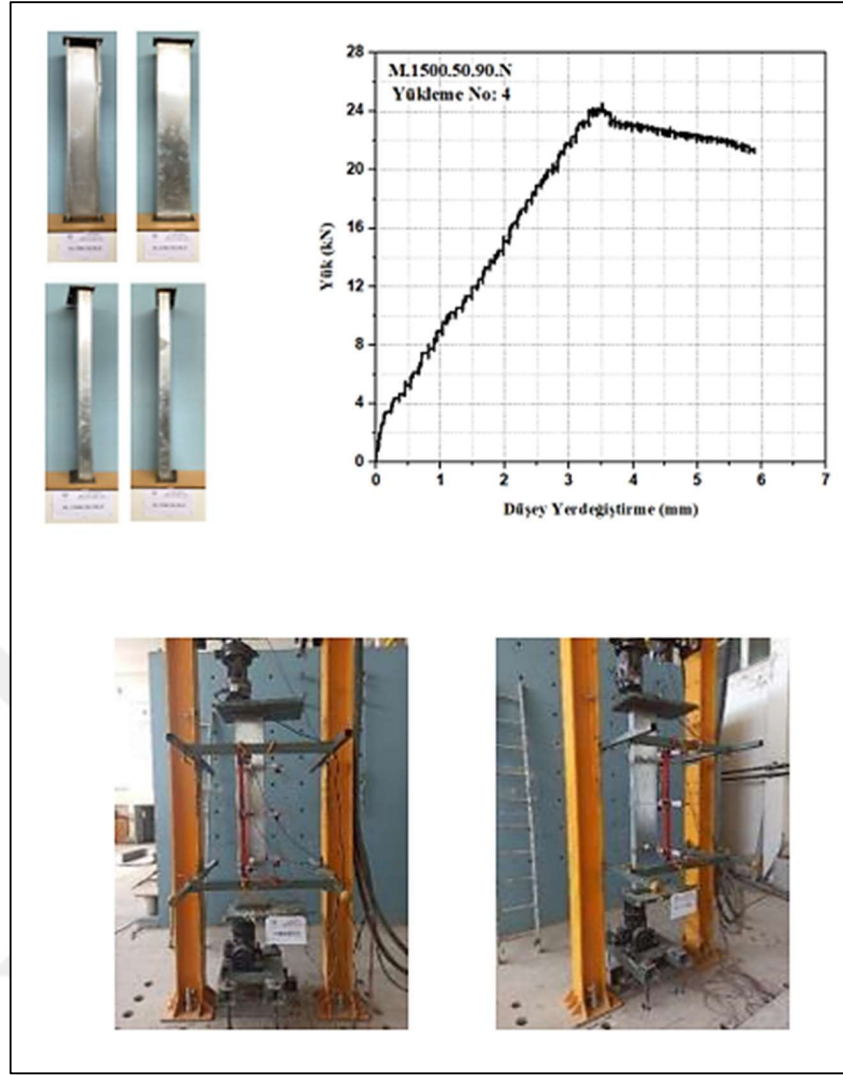
Şekil 41. M.1500.0.180 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.0.180 kodlu deney numunesi asal ekseninde (x) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 41’de verilmiştir. M.1500.0.180 kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulma alt taban plakasının yaklaşık olarak 30 cm yukarısında gövde-flanş birleşim noktasına yakın bölgede yerel burkulma şeklinde gerçekleşmiştir. Flanştaki ani burkulma ile yükte ani bir düşüş meydana gelmiştir. Burkulma bölgesinde gövde numune kesitine göre +x yönüne doğru yerdeğiştirmiştir. Burkulma bölgesi dışında flanşlar arasında açılma ve gövdede belirgin bir şekildeğiştirme gözlemlenmemiştir. Bu gözlemler elde edilen verilerle uyumludur. Maksimum yük 39.357 kN, düşey yerdeğiştirme 4.110 mm’dir.



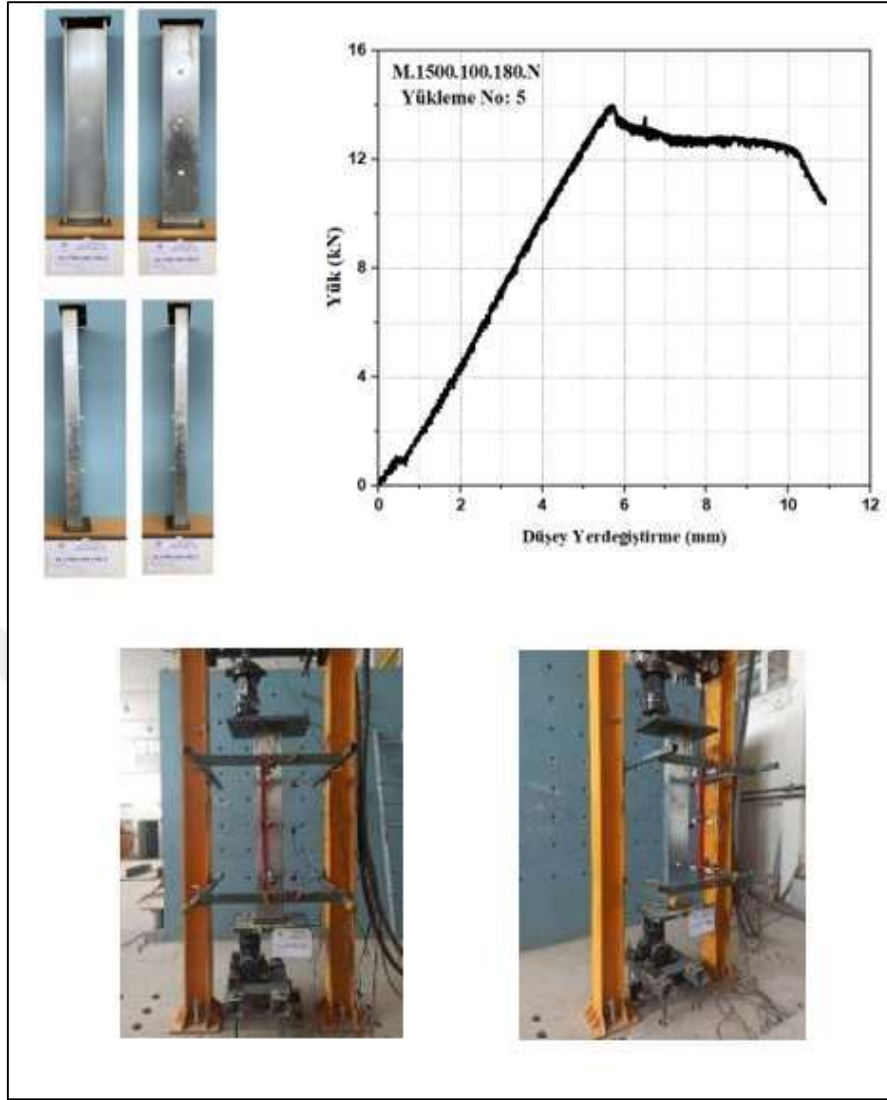
Şekil 42. M.1500.0.360 deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.0.360 kodlu deney numunesi asal ekseninde (x) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 42’de verilmiştir. M.1500.0.360 numaralı numune incelendiğinde, ilk burkulma üst taban plakasının yaklaşık 15 cm altında flanşın dışa doğru açılmasıyla gerçekleşmiş ve burkulmadan sonra yükte ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Yükleme devam ettikçe yük kademeli olarak azalmış ve üst taban plakasına yakın bölgede gövde-flanş bölgesinde burkulma meydana gelmiştir. Burkulmanın olduğu bölgede flanşların dışa açıldığı LPDT’den okunan yerdeğiştirmeden tespit edilmiştir. Burkulma bölgesi dışında flanşlarda ve gövdede belirgin bir şekildeğiştirme gözlemlenmemiştir. Maksimum yük 21.028 kN, düşey yerdeğiştirme 7.658 mm olarak elde edilmiştir.



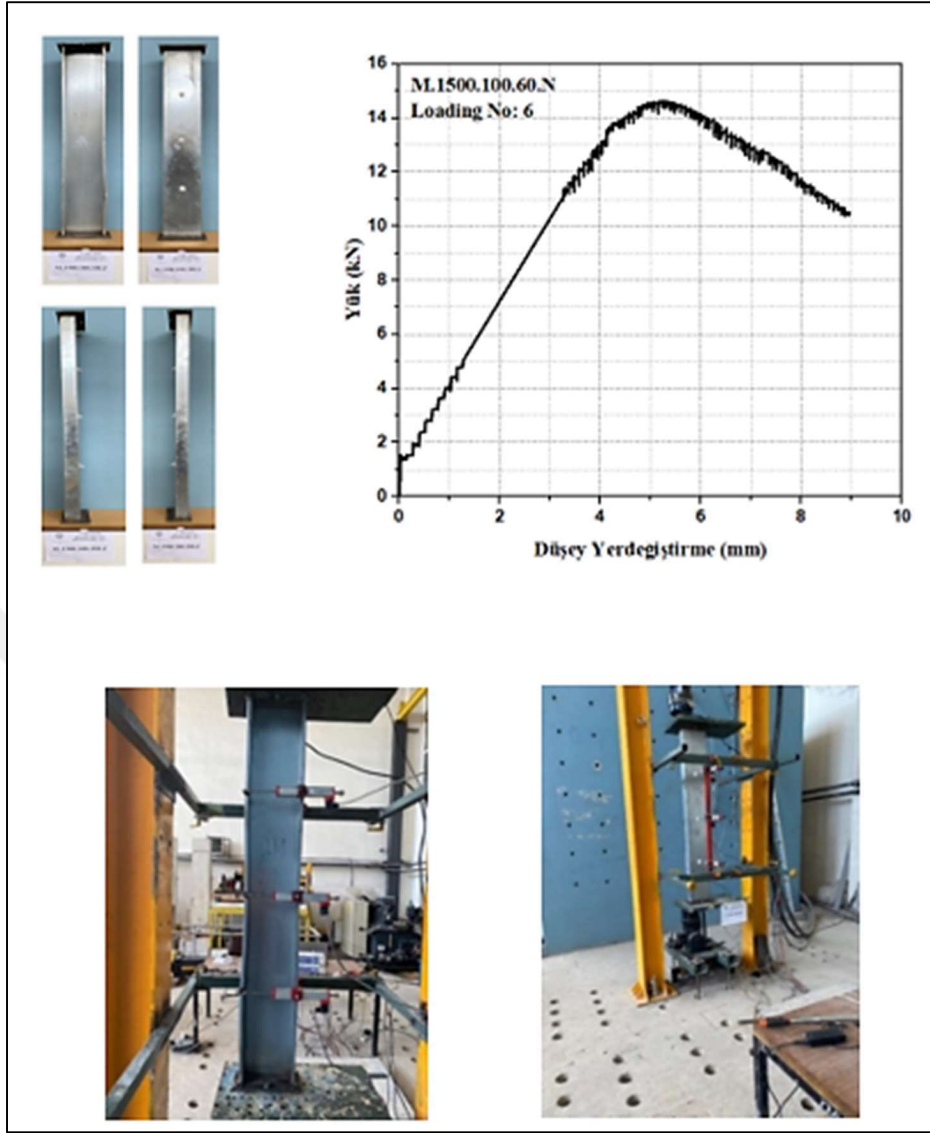
Şekil 43. M.1500.50.90.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.50.90.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 43'te verilmiştir. M.1500.50.90.N kodlu numune incelediğinde, burkulmalar üst taban plakasından 37 cm uzaklıkta flanşlar ve dudaklarda yerel burkulma şeklinde görülmekte ve alt taban plakasından yaklaşık olarak 25 cm uzaklıkta flanşlar ve dudaklar açılarak çarpımalı burkulma görülmektedir. İlk burkulmayla birlikte yük kademeli bir şekilde azalmış ve gövdede belirgin burkulma hasarları gözlemlenmiştir. Numunenin burkulma bölgesinde flanşlar dışa doğru açılmıştır. Maksimum yük 24.544 kN, düşey yerdeğiştirme 3.514 mm'dir.



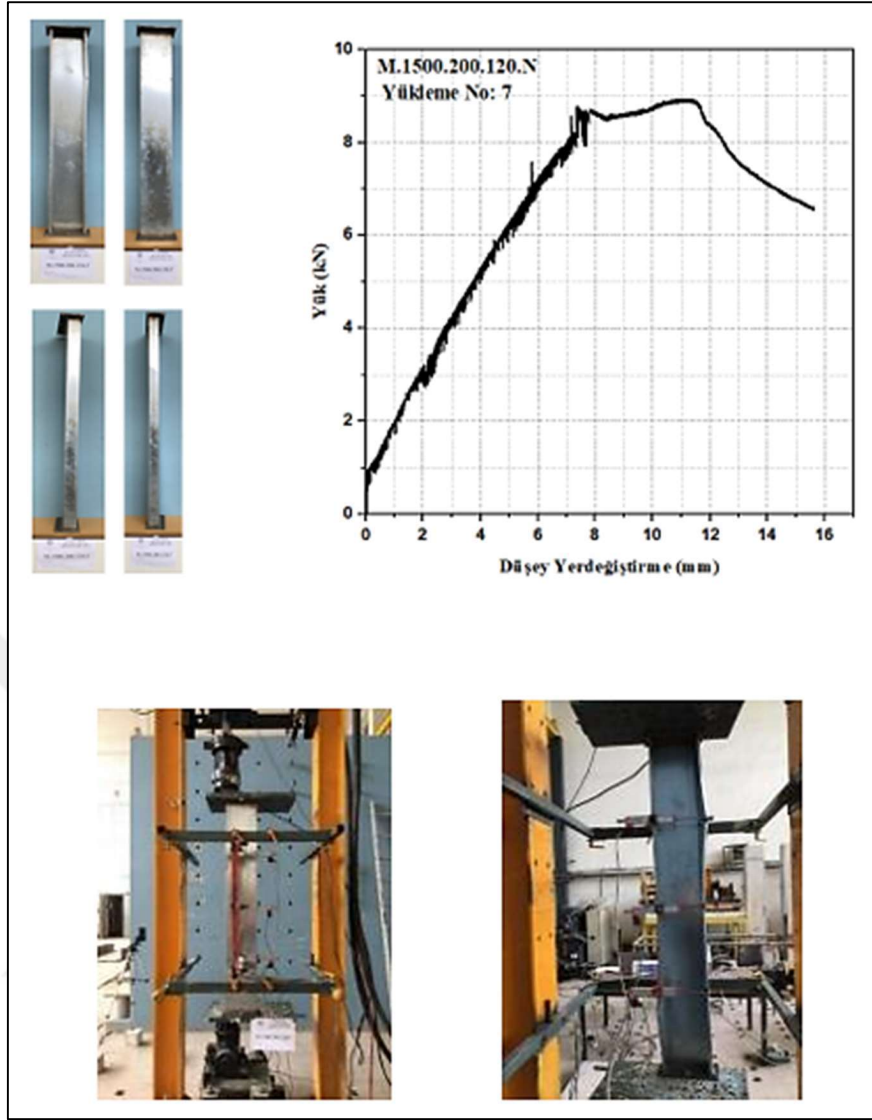
Şekil 44. M.1500.100.180.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.180.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 44'te verilmiştir. M.1500.100.180.N kodlu numune incelendiğinde, ilk olarak alt taban plakasının yaklaşık olarak 30 cm yukarısında flanşlar ile dudakların açılmasıyla çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra yükte kademeli azalma meydana gelmiş ve yükleme devam ettirildiğinde üst bölgeye yakın bölgede flanşlar arasında açılma ve numune orta bölgesinde flanşlar arasında daralma meydana gelmiştir. Gövdede belirgin bir yerel burkulma gözlemlenmemiştir. Maksimum yük 13.978 kN, düşey yerdeğiştirme 5.684 mm'dir.



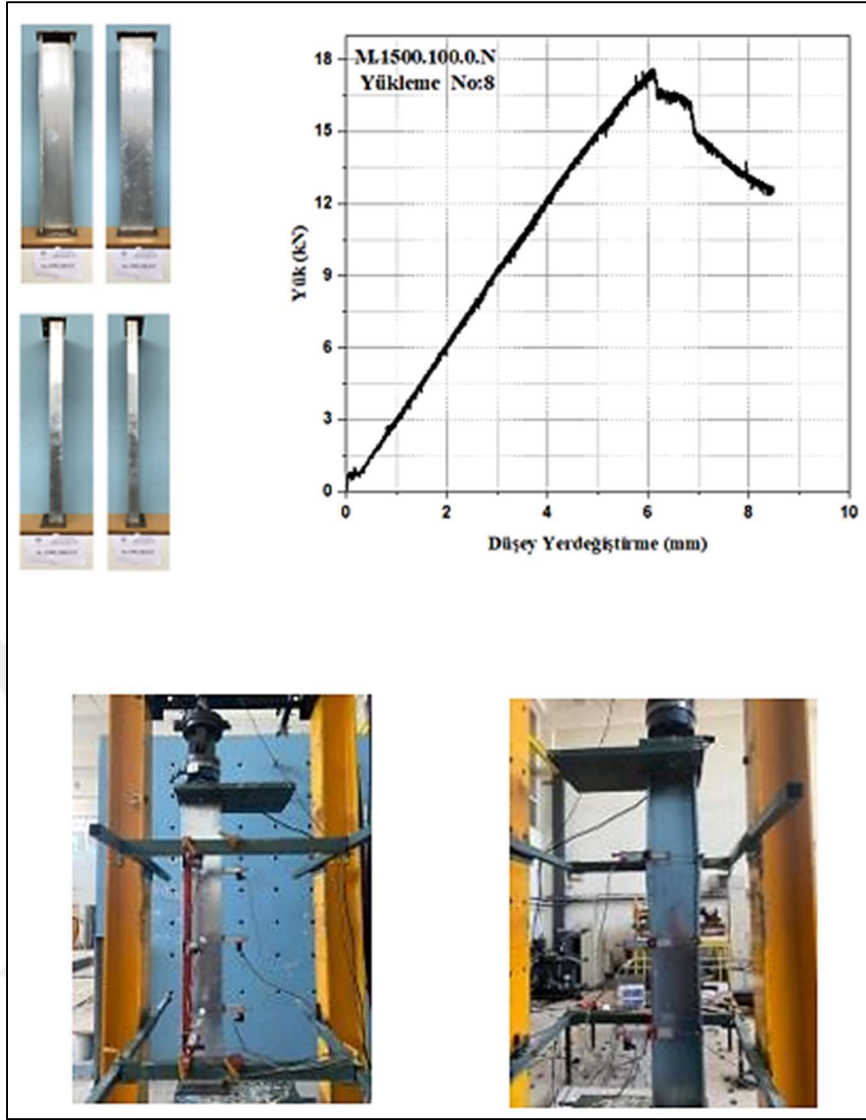
Şekil 45. M.1500.100.60.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.60.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 45’te verilmiştir. M.1500.100.60.N kodlu numuneyi incelendiğinde, ilk olarak alt taban plakasının yaklaşık olarak 30 cm yukarısında flanşların açılmasıyla çarpımalı burkulma meydana gelmiştir. Daha sonra yük taşıma kapasitesi azalmaya başlamıştır. Yükleme devam ettirildiğinde üst bölgeye yakın flanşların arası açılırken orta bölgedeki flanşların arasında daralma meydana gelmiştir. Gövdede daha çok orta bölgede dalgalanma görülmüştür. Maksimum yük 14.639 kN, düşey yerdeğiştirme 5.317 mm’dir.



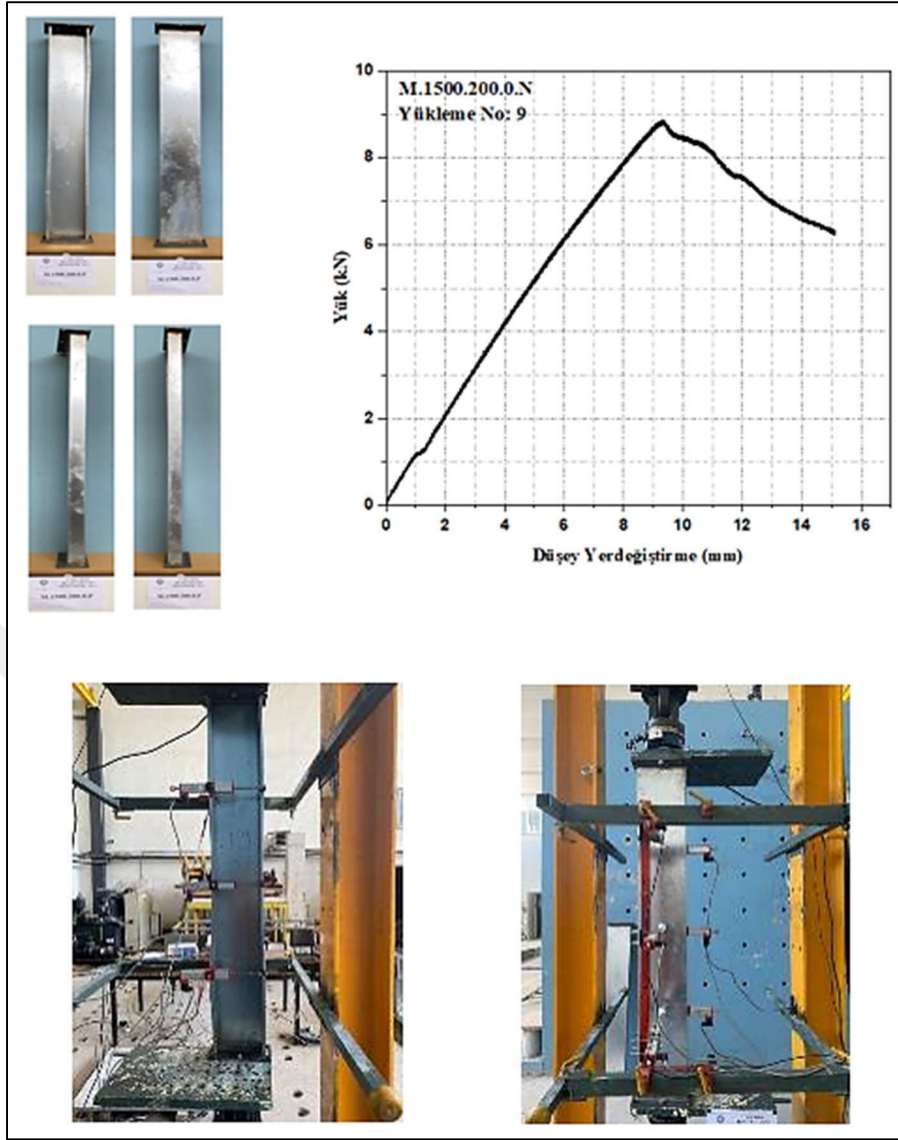
Şekil 46. M.1500.200.120.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.200.120.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 46’da verilmiştir. M.1500.200.120.N kodlu numune incelendiğinde, burkulmalar alt ve üst taban plakalarına 30 cm uzakta, yükleme noktasına yakın flanşın açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde gerçekleşmiş ve burkulmadan sonra yükte ani bir azalma olmuştur. Gövdede belirgin bir dalgalanma meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Maksimum yük 8.873 kN, düşey yerdeğiştirme 11.756 mm’dir.



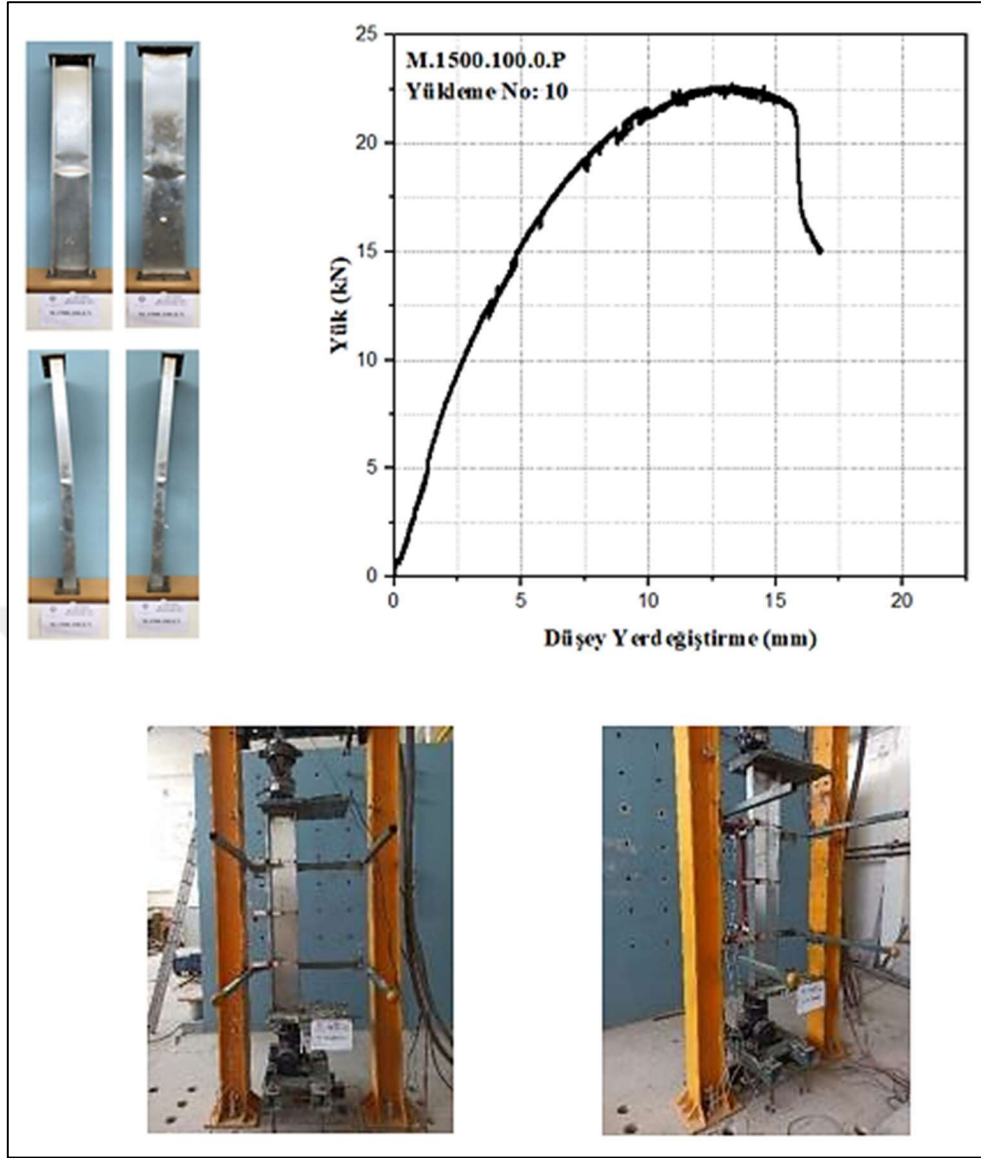
Şekil 47. M.1500.100.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.0.N kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 47’de verilmiştir. M.1500.100.0.N kodlu numune incelendiğinde, flanşlarda üst taban plakasına yaklaşık olarak sırasıyla 35 ve 40 cm uzaklıkta yerel burkulma meydana gelmiştir. Numunenin orta bölgesinde flanşlar arasındaki uzaklık yükleme boyunca azalmış ve gövdede belirgin dalgalanma gözlemlenmiştir. Maksimum yük 17.599 kN, düşey yerdeğiştirme 6.069 mm’dir.



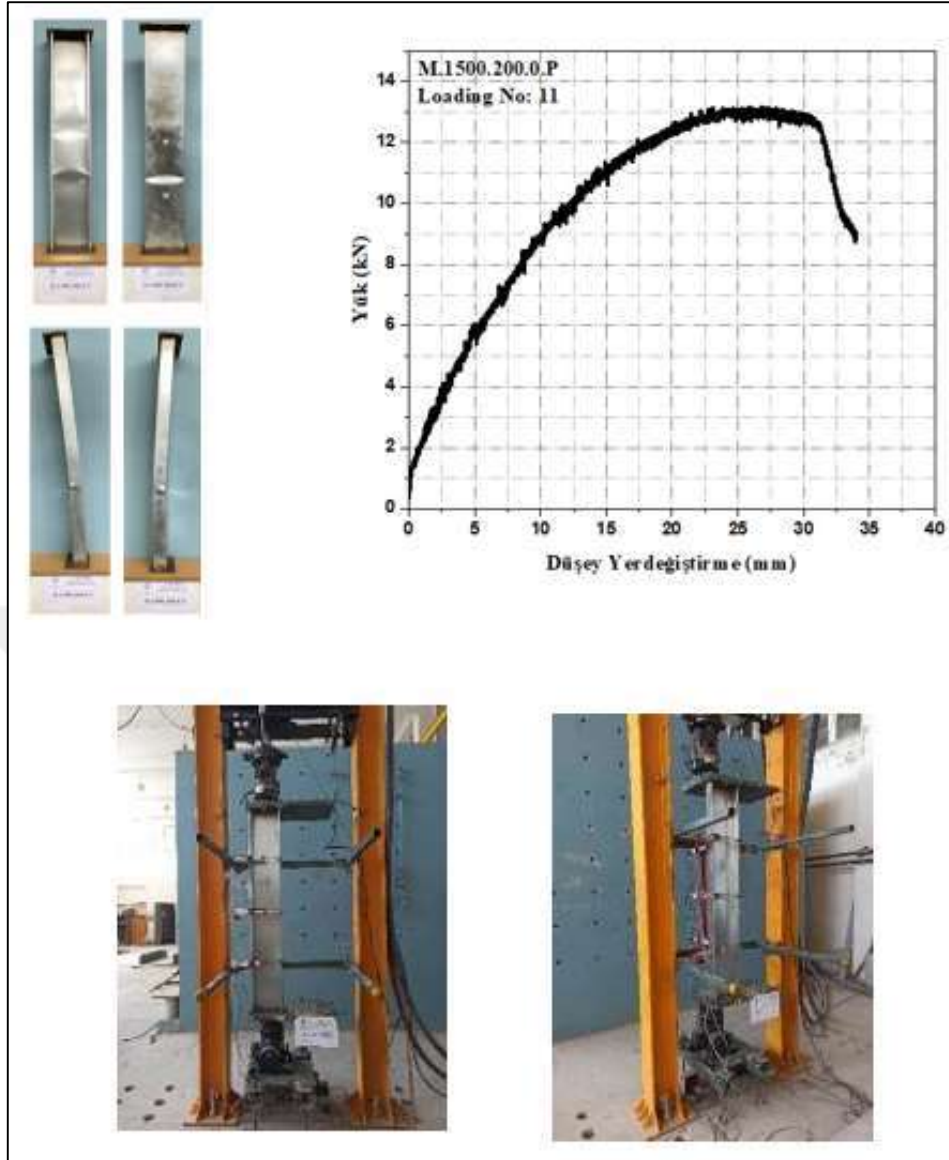
Şekil 48. M.1500.200.0.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.200.0.N kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 48’de verilmiştir. M.1500.200.0.N kodlu numune incelendiğinde, kesitin y eksenin negatif bölgesinde alt taban plakasından yaklaşık 30 cm uzaklıkta ve kesitin y eksenin pozitif bölgesinde üst taban plakasından yaklaşık olarak 30 cm uzaklıkta, flanşlarda açılma ve dudaklarda yerel burkulması meydana gelmiştir. Numunenin orta bölgesinde flanşlar arasında daralma meydana gelmiş ve gövdede belirgin dalgalanma gözlemlenmiştir. Maksimum yük 8.843 kN, düşey yerdeğiştirme 9.259 mm’dir.



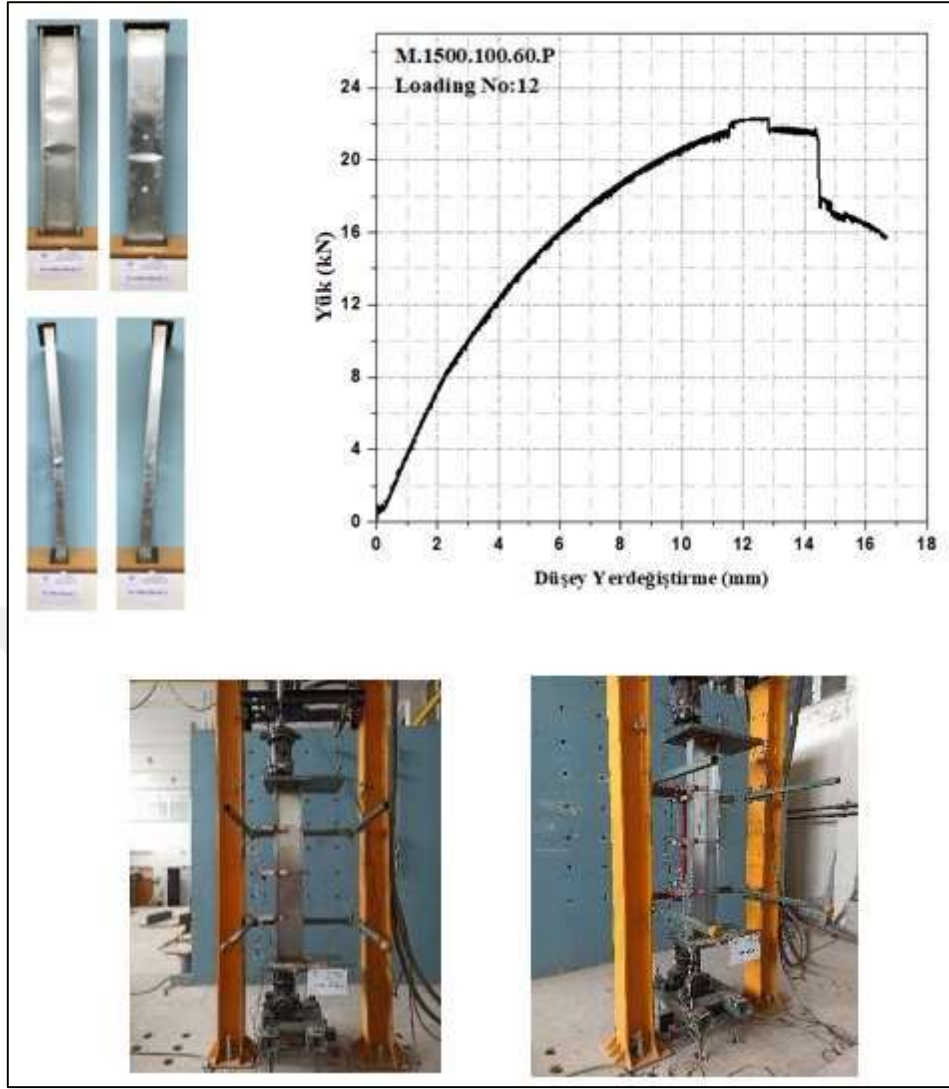
Şekil 49. M.1500.100.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.0.P kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 49’da verilmiştir. M.1500.100.0.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar numunenin orta bölgesinde gövdede ve flanşlarda yerel burkulma şeklinde oluşmuştur. Gövdede yerel burkulma meydana gelmesiyle yükte ani bir azalma olmuştur. Burkulma bölgesinin dışındaki diğer bölgelerde belirgin bir burkulma gözlemlenmemiştir. Maksimum yük 22.751 kN, düşey yerdeğiştirme 13.291 mm’dir.



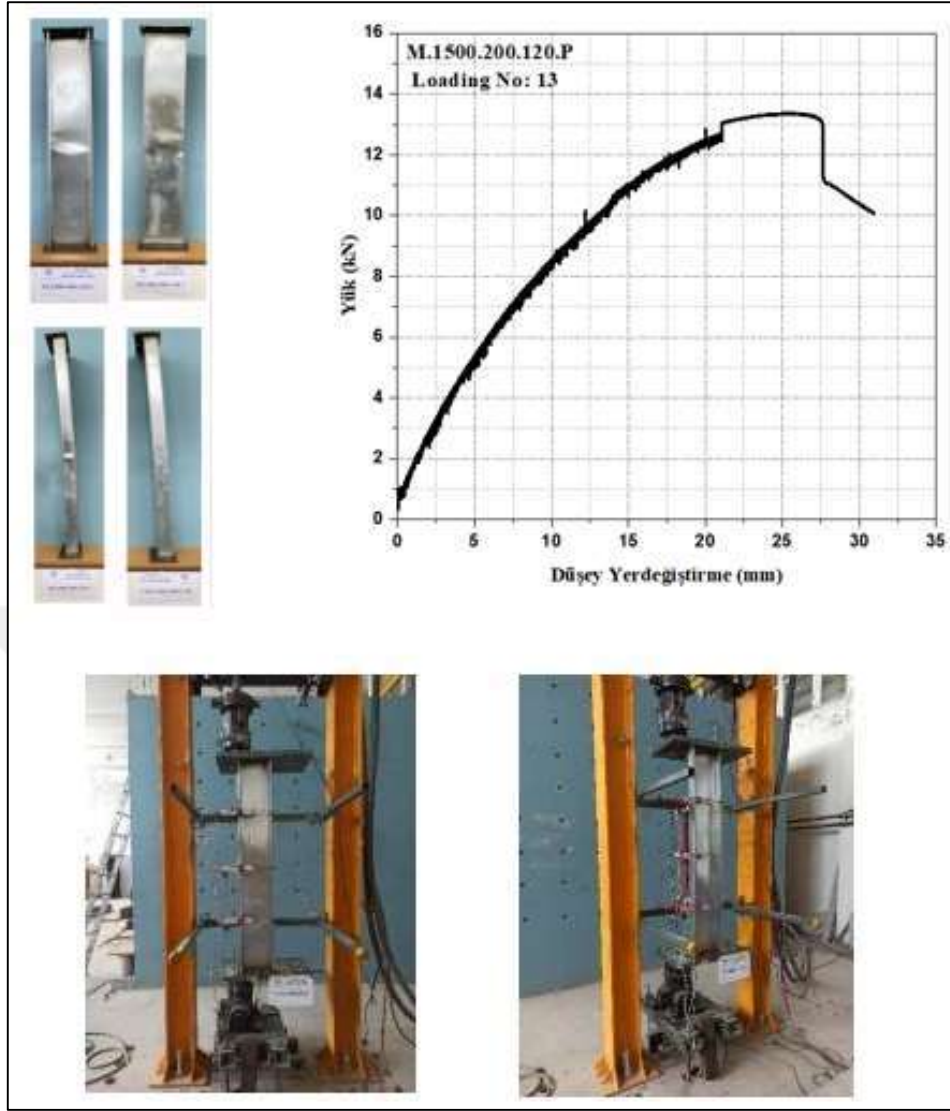
Şekil 50. M.1500.200.0.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneydeden görüntüler

M.1500.200.0.P kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 50’de verilmiştir. M.1500.200.0.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar gövdede genel burkulma olarak başlamış, yükleme devam ettirildikçe numunenin ortasında ve alt taban plakasından 50 cm uzaklıkta gövdede ve flanşa da yerel burkulmalar oluşmuştur. Numunenin uzunluğu boyunca gövdede dalgalanma meydana gelmiş ve gövdedeki ilk yerel burkulma ile yükte ani azalma meydana gelmiştir. Eğride meydana gelen ani yük artışının alt mafsalsın dönme kapasitesine ulaşmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir. Maksimum yük 13.235 kN, düşey yerdeğiştirme 14.265 mm’dir.



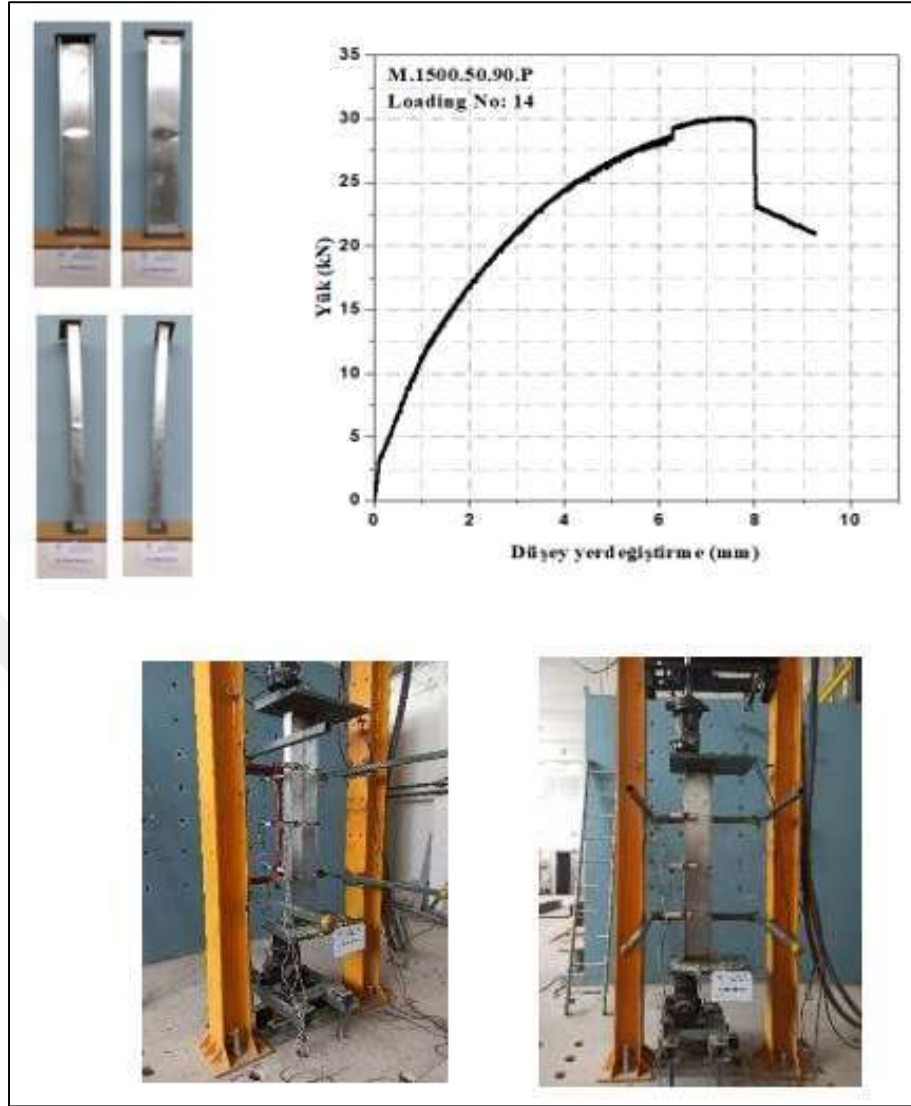
Şekil 51. M.1500.100.60.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.60.P koldu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 51’de verilmiştir. M.1500.100.60.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulma alt taban plakasından yaklaşık olarak 60 cm uzaklıkta gövdede yerel burkulma şeklinde meydana gelmiştir. Gövdedeki yerel burkulma bölgesine yakın flanşın açılmasıyla çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. İlk burkulmanın ardından yükte ani bir azalma olmuştur. Maksimum yük 22.316 kN, düşey yerdeğiştirme 12.590 mm’dir.



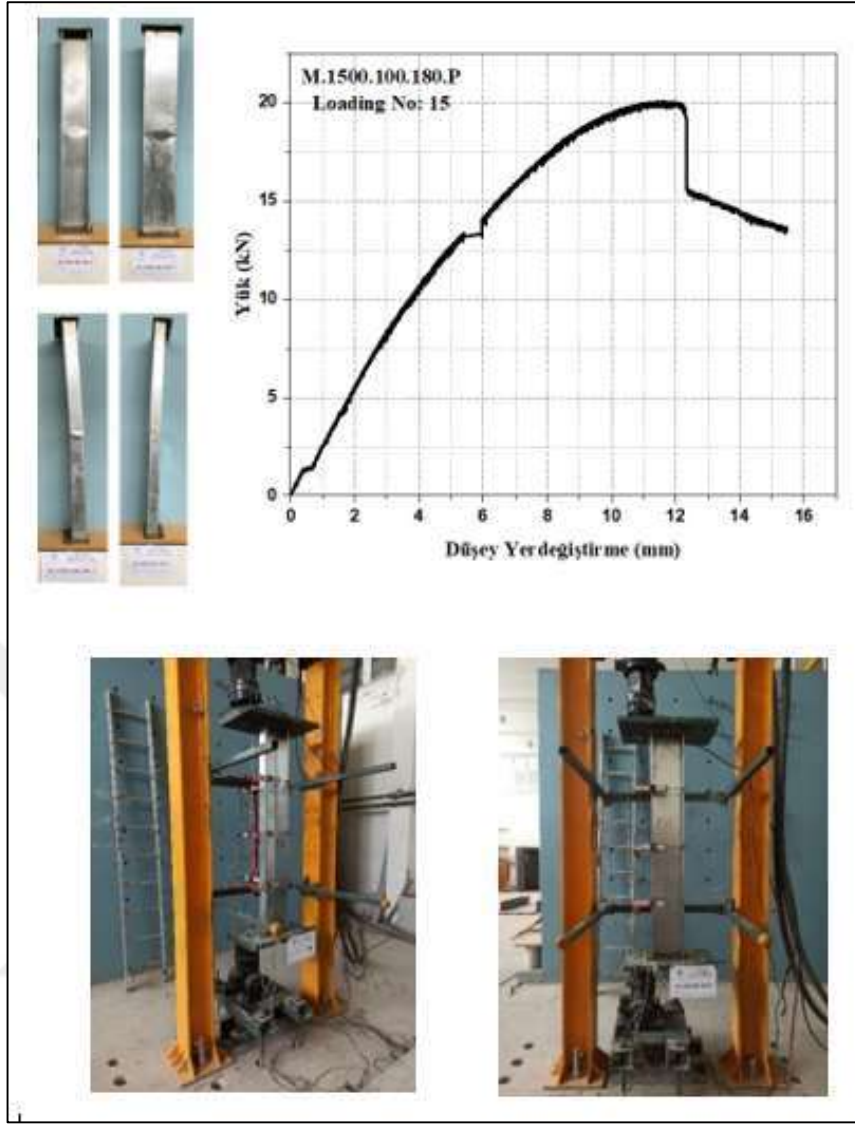
Şekil 52. M.1500.200.120.P deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.200.120.P koldu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 52’de verilmiştir. M.1500.200.120.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar yüklemenin yakın olduğu flanş-gövde birleşim bölgesinde ve gövdede yerel burkulma şeklinde oluşmuştur. Burkulma ile yükte ani bir azalma olmuştur. Maksimum yük 13.351 kN, düşey yerdeğiştirme 24.985 mm’dir.



Şekil 53. M.1500.50.90.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.50.90.P koldu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 53'te verilmiştir. M.1500.50.90.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar numunenin ortasında ve alt taban plakasından yaklaşık 50 cm uzaklıkta gövdede ve flanşta yerel burkulma şeklinde oluşmuştur. Yerel burkulma ile yükte ani bir azalma olmuş ve numunenin uzunluğu boyunca gövdede dalgalanma meydana gelmiştir. Maksimum yük 30.132 kN, düşey yerdeğiştirme 7.499 mm'dir.



Şekil 54. M.1500.100.180.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

M.1500.100.180.P koldu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 54’te verilmiştir. M.1500.100.180.P kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar numune gövdesinin orta bölgesinde ve alt taban plakasından yaklaşık olarak 60 cm uzaklıkta yerel burkulma şeklinde oluşmuştur. Alt bölgede gerçekleşen yerel burkulmanın olduğu flanşın yükleme devam ettirildikçe açılmasıyla çarpımalı burkulma meydana gelmiştir. Gövdedeki ilk burkulma ile yükte keskin bir azalma olmuştur. Maksimum yük 20.053 kN, düşey yerdeğiştirme 11.563 mm’dir.

3.2.1. Monotonik Yükleme Etkisinde Dudakların Gerilme Durumuna Göre Elemanların Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Deneyisel çalışma sonucunda, Şekil 40-Şekil 54'te verilen yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilmiştir. Yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak deney numunelerine ait yük taşıma kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik ve süneklik değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3.2). Deney elemanların flanşlarının gerilme durumlarına göre yük taşıma kapasitesi, enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik ve süneklik değerleri farklılık göstermektedir. Dudakların basınç etkisinde olduğu (N) numuneler ile dudakların çekme etkileri etkisinde (P) olduğu numuneler arasındaki ilişkiler Şekil 55'te verilmiştir. Dudakların çekme gerilmeleri (P) etkisinde olduğu numunelerin yük taşıma kapasiteleri eksantrisiteye bakılmaksızın dudakların basınç gerilmeleri (N) etkisinde olduğu numunelerden daha fazladır. Aynı doğrultuda eksantrisite 2 kat artırıldığında taşıma güçleri arasındaki fark ortalama %26.5 artmaktadır. Dudakların gerilme durumu numunelerin enerji tüketmesini önemli ölçüde etkilemektedir. Dudakların çekme gerilmeleri (P) etkisinde olduğu numunelerin enerji tüketme kapasiteleri dudakların basınç gerilmeleri (N) etkisinde olduğu numunelerin ortalama 20 katıdır. Bu fark özellikle yüksek eksantrisiteli eğik eğilmeli ve zayıf eksen doğrultusundaki eğilmelerde oluşmaktadır. Dudakların basınç etkisinde olduğu numunelerin süneklik değeri M.1500.100.180 yüklemeleri dışındaki tüm yüklemelerde dudakların çekme gerilmeleri etkisinde olanlara göre azdır. Eğik eğilme etkisinde elemanlarda bu ortalama %14 civarında iken zayıf eksen doğrultusundaki eğilen elemanlarda %45 civarındadır. Dudakların basınç etkisinde olduğu numunelerin rijitlik değeri tüm yüklemelerde dudakların çekme gerilmeleri etkisinde olanlara göre fazladır. Aynı yükleme doğrultularında eksantrisite arttıkça rijitlikler arasında önemli bir fark olmamıştır.



Şekil 55. Monotonik yüklemelerde dudakların gerilme durumuna göre numunelerin karakteristik özellikleri

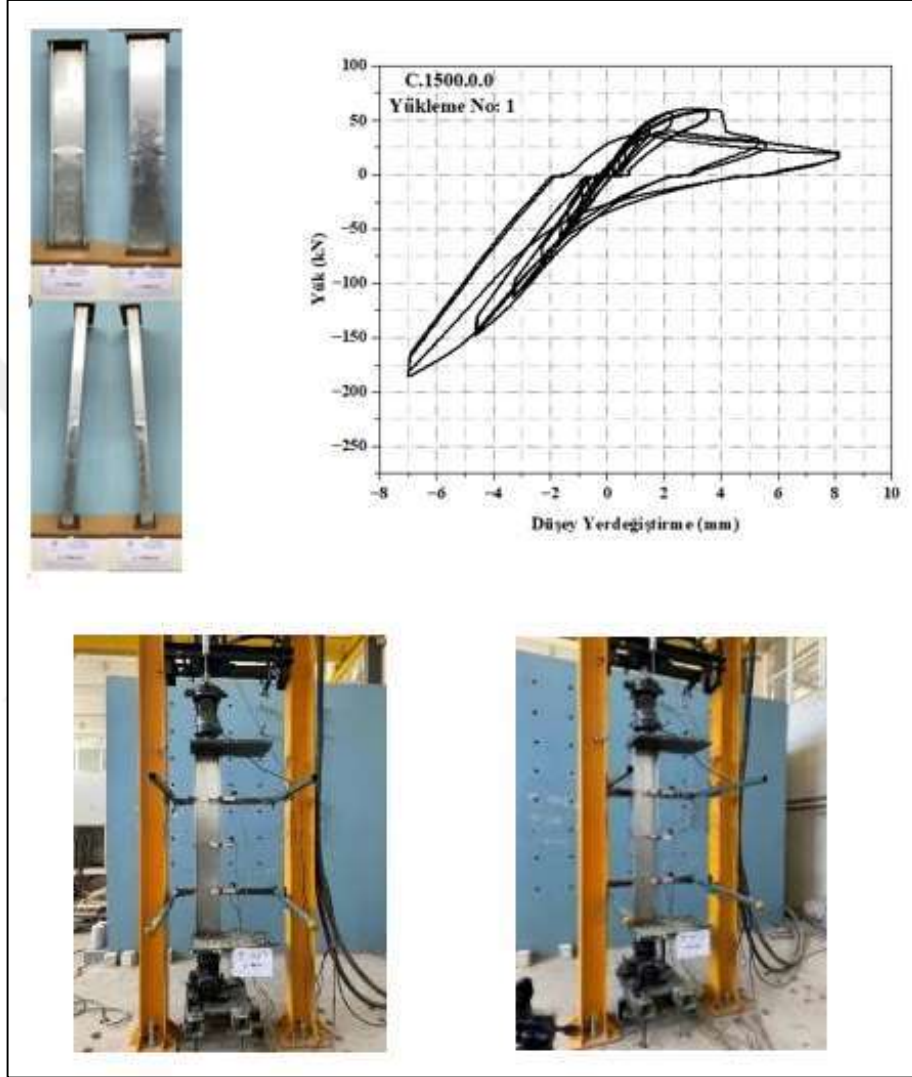
Tablo 5. Monotonik yüklemeye ait deney sonuçları ve burkulma şekilleri

Elemanlar	M1500.0.0	M1500.0.180	M1500.0.360	M1500.50.90.N	M1500.100.180.N
					
$P_{\text{maks}} (kN)$	69.489	39.357	21.028	25.54	13.978
Enerji (J)	165.501	103.430	153.309	94.976	97.061
Rijitlik(kN/mm)	24.55	9.524	2.779	6.985	2.457
Süneklik	1.680	1.832	1.640	2.079	1.953
Burkulma Modu	GB/WLB	GB/FLB	GB/DB/LLB	GB/DB/LLB	GB/DB
Elemanlar	M1500.100.60.N	M1500.200.120.N	M1500.100.0.N	M1500.200.0.N	M1500.100.0.P
					
$P_{\text{maks}} (kN)$	17.599	14.639	22.751	8.843	13.235
Enerji (J)	77.009	71.28	66.980	268.387	319.070
Rijitlik(kN/mm)	2.753	0.805	2.899	0.9482	1.7112
Süneklik	2.002	2.102	1.265	1.393	2.743
Burkulma Modu	GB/DB	GB/DB/LLB	GB/DB	GB/DB/FLB	GB/WLB
Elemanlar	M1500.200.0.P	M1500.100.60.P	M1500.200.120.P	M1500.50.90.P	M1500.100.180.P
					
$P_{\text{maks}} (kN)$	13.235	22.316	13.351	30.132	20.053
Enerji (J)	319.070	232.199	258.801	175.114	161.240
Rijitlik(kN/mm)	0.5274	1.1773	0.5343	4.0181	1.1734
Süneklik	2.917	2.309	2.141	2.847	1.669
Burkulma Modu	GB/WLB/FLB	GB/WLB/FLB	GB/WLB/FLB	GB/WLB/FLB	GB/WLB/FLB/DB



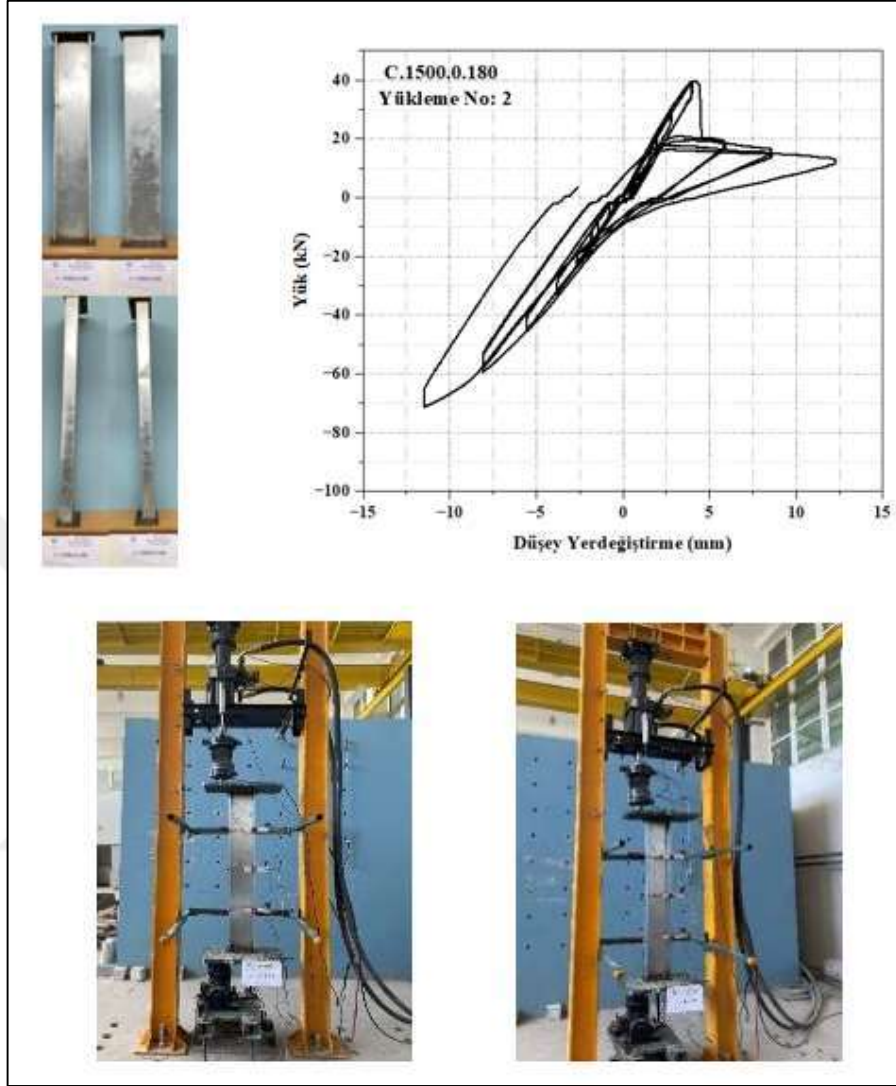
Şekil 56. Monotonik yüklemeye ait deney elemanların deney sonu yandan görünüşleri

3.3. Tersinir-Tekrarlı Yükleme Deney Sonuçları



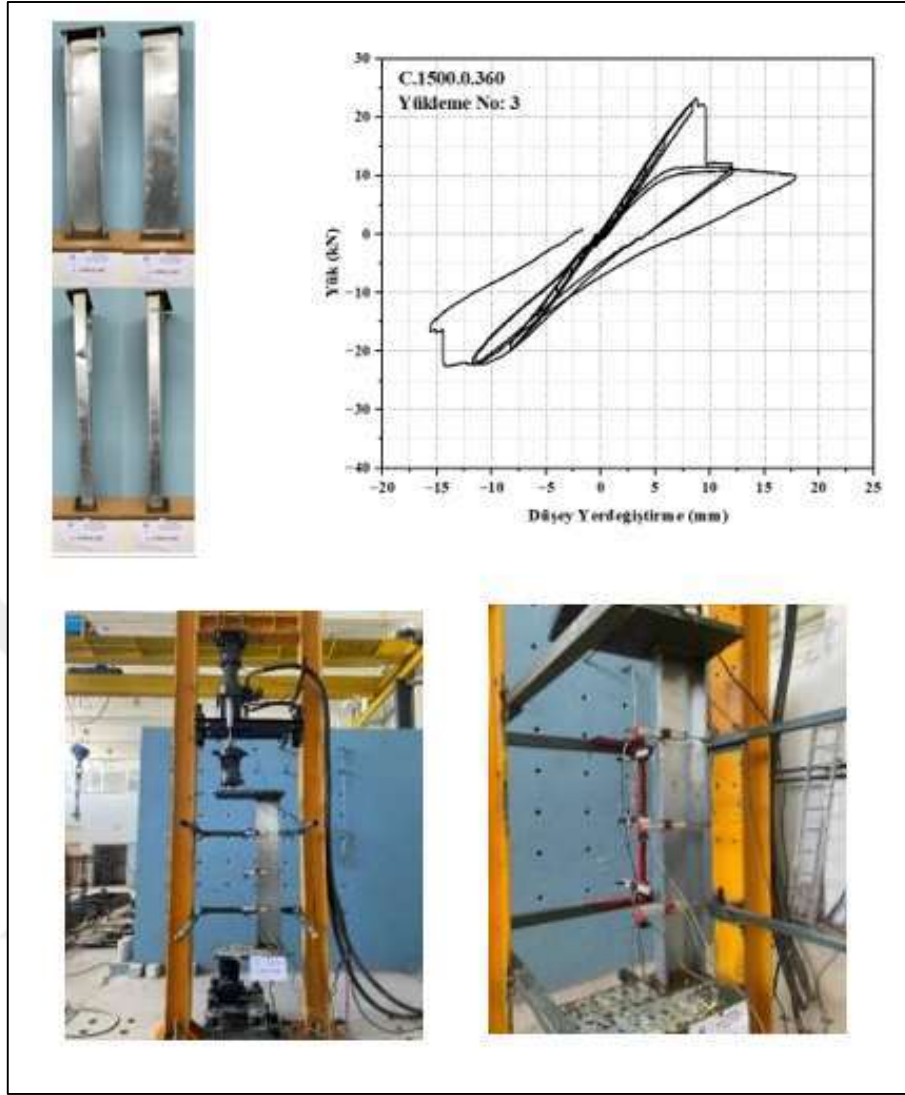
Şekil 57. C.1500.0.0 deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

Eksenel yük etkisinde test edilen C.1500.0.0 kodlu deney elemanının deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 57’de verilmiştir. C.1500.0.0 kodlu numune incelendiğinde, burkulmalar ilk olarak numune gövdesinin orta bölgesinde genel burkulma şeklinde oluşmuştur. Yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi incelendiğinde basınç bölgesinde burkulmayla birlikte rijitlik ve dayanımda azalmalar meydana gelirken çekme bölgesinde yük artışları meydana gelmiş ve asimetrik bir davranış ortaya çıkmıştır.



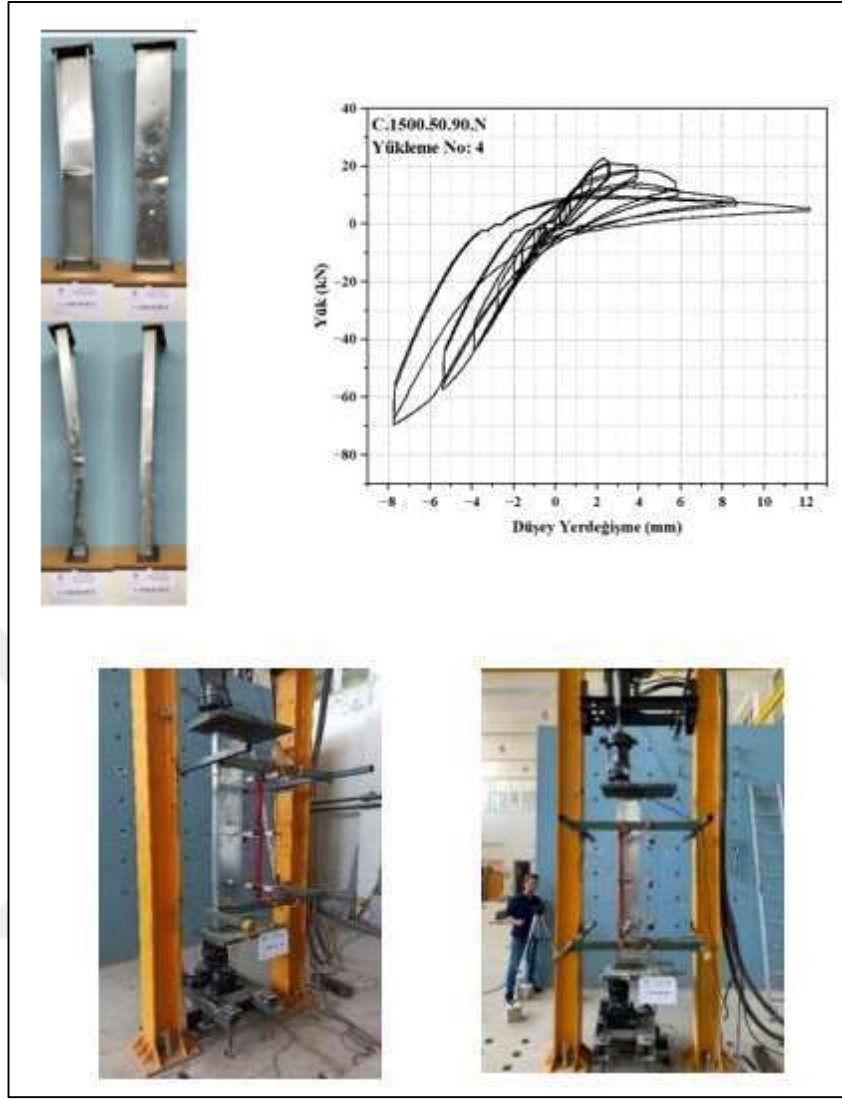
Şekil 58. C.1500.0.180 deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.0.180 kodlu deney numunesi asal ekseninde (x) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 58’de verilmiştir. C.1500.0.180 kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulma numunenin üst taban plakasından yaklaşık 50 cm uzaklıkta basınç bölgesindeki flanşta yerel burkulma şeklinde oluşmuştur. İlk burkulmayla birlikte dayanımda ve rijitlikte azalmalar meydana gelirken çekme bölgesinde yük artışları meydana gelmiştir. Bu durum, Şekil 58’deki basınç bölgesinde eğrilerin eğiminin azalmasından ve çekme bölgesindeki yük artışlarından tespit edilmiştir.



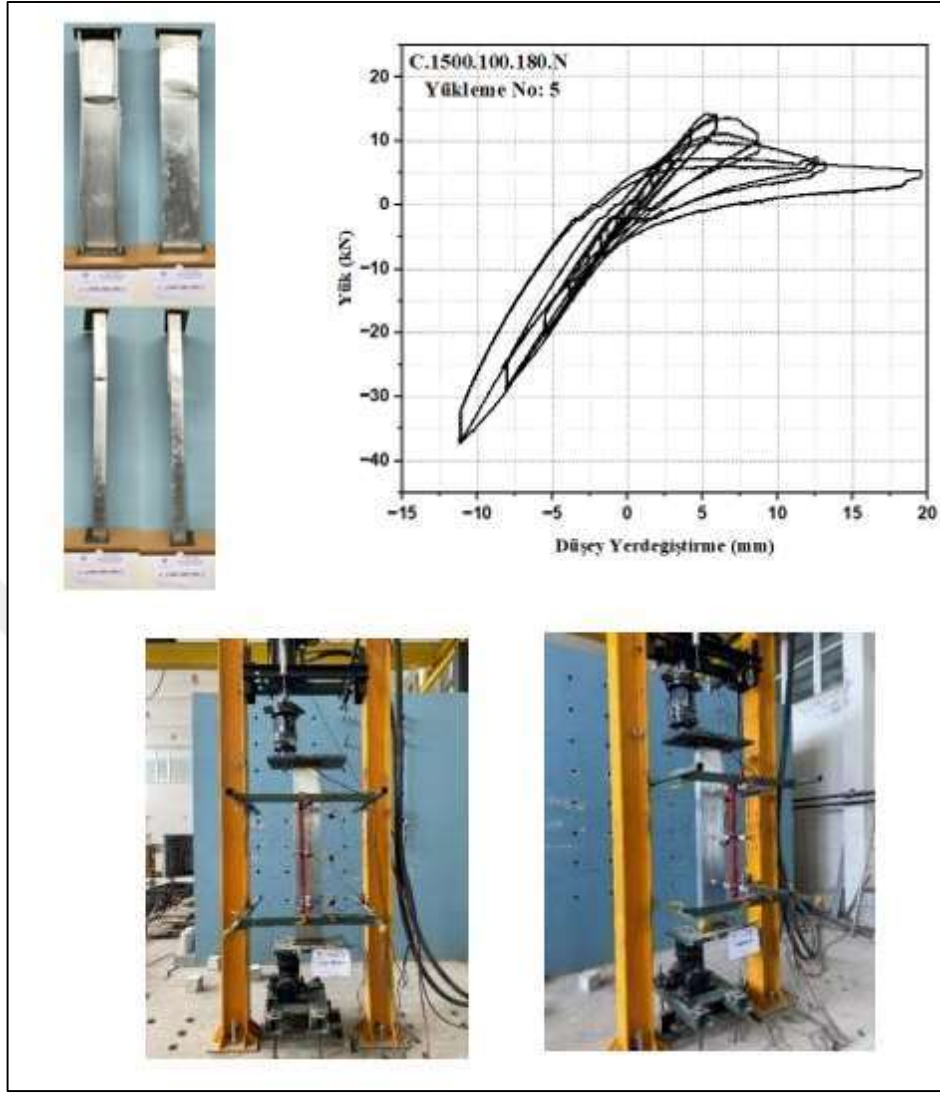
Şekil 59. C.1500.0.360 deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.0.360 kodlu deney numunesi asal ekseninde (x) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 59’da verilmiştir. C.1500.0.360 kodlu numune incelendiğinde, basınç etkisinde kesitin üst taban plakasından yaklaşık 50 cm uzaklıkta basınç bölgesinde yerel burkulma meydana gelirken çekme durumunda kesitin yine üst taban plakasına yakın bölgede yerel burkulma meydana gelmiştir. Yaklaşık 21.00 kN’ lük basınç yükü etkisinde meydana gelen ilk burkulma ile yükte ani bir azalma olmuştur. Çekme ve basınç etkilerinden dolayı rijitlik ve dayanım kaybı meydana geldiği Şekil 59’daki eğrinin eğiminin azalmasından hesaplanmıştır.



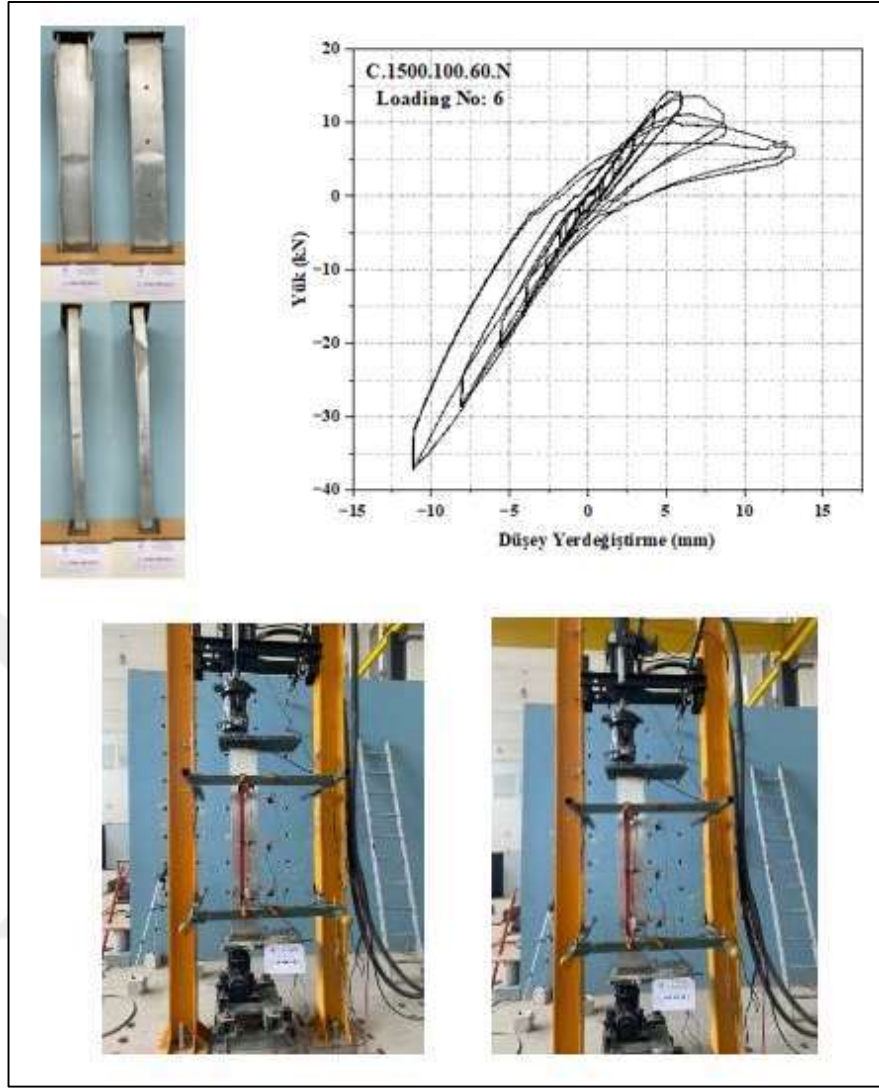
Şekil 60. C.1500.50.90.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.50.90.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 60'ta verilmiştir. C.1500.50.90.N kodlu numune incelediğinde, ilk burkulmalar basınç etkisinde numunenin orta bölgesinde karşılıklı iki flanş ve dudakların açılmasıyla çarpımalı burkulma şeklinde oluşmuştur. Artan yerdeğiştirmeler neticesinde numunede burulmalı burkulma meydana gelmiş, çekme ve basınç etkisinde rijitlik ve dayanım kayıpları olmuştur.



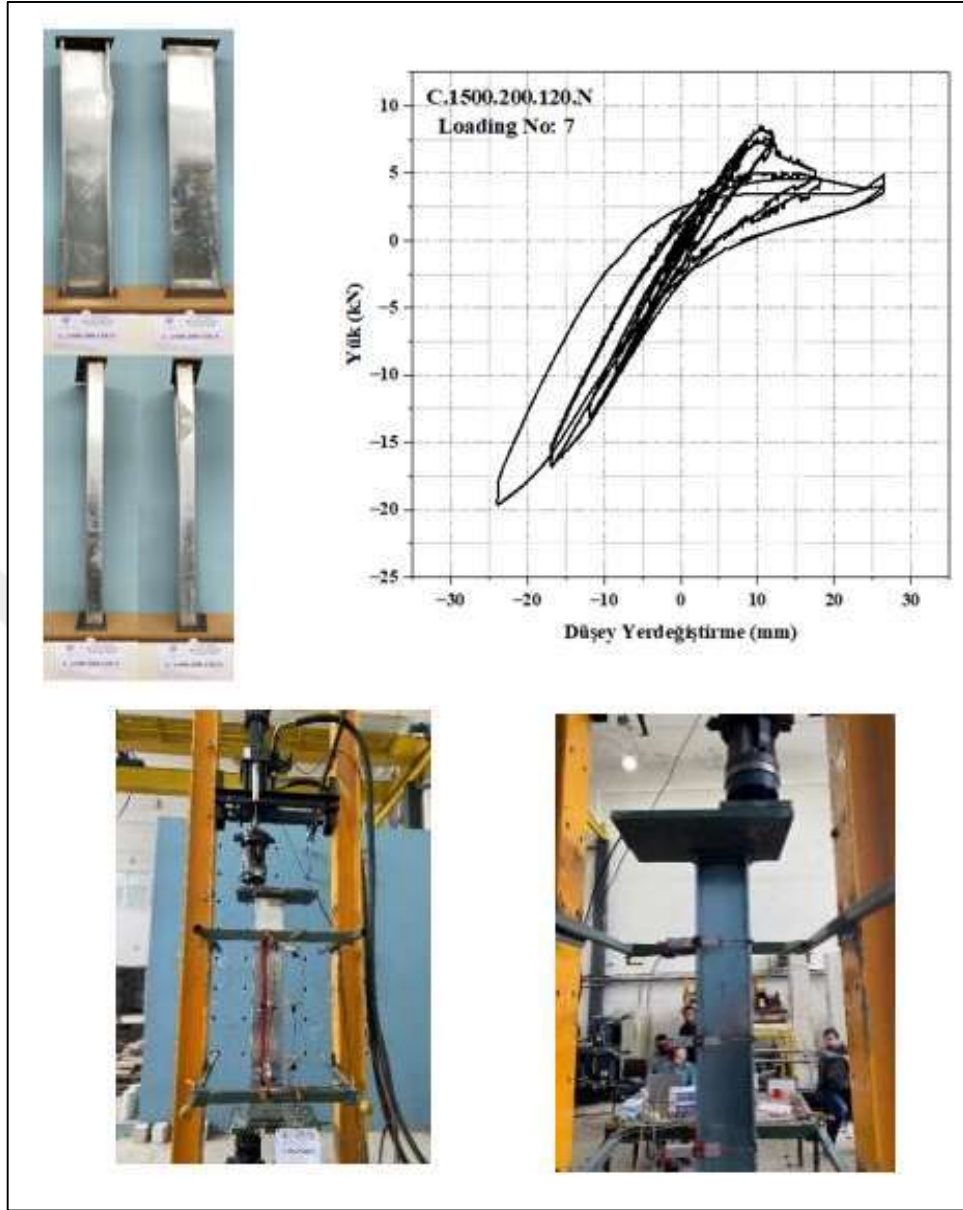
Şekil 61. C.1500.100.180.N deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.100.180.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 61’da verilmiştir. C.1500.100.180.N kodlu numune incelediğinde, itme etkisinde ilk burkulma üst plakaya yakın bölgede basınca maruz flanşa, çekme etkisinde ise alt plakaya yakın bölgede yine basınca maruz flanşa yerel olarak meydana gelmiştir. Tersinir-tekrarlı yükleme etkisinde numunede burulmalı burkulma meydana gelirken çekme ve basınç yüklemelerinden dolayı rijitlik ve dayanım kaybı meydana gelmiştir.



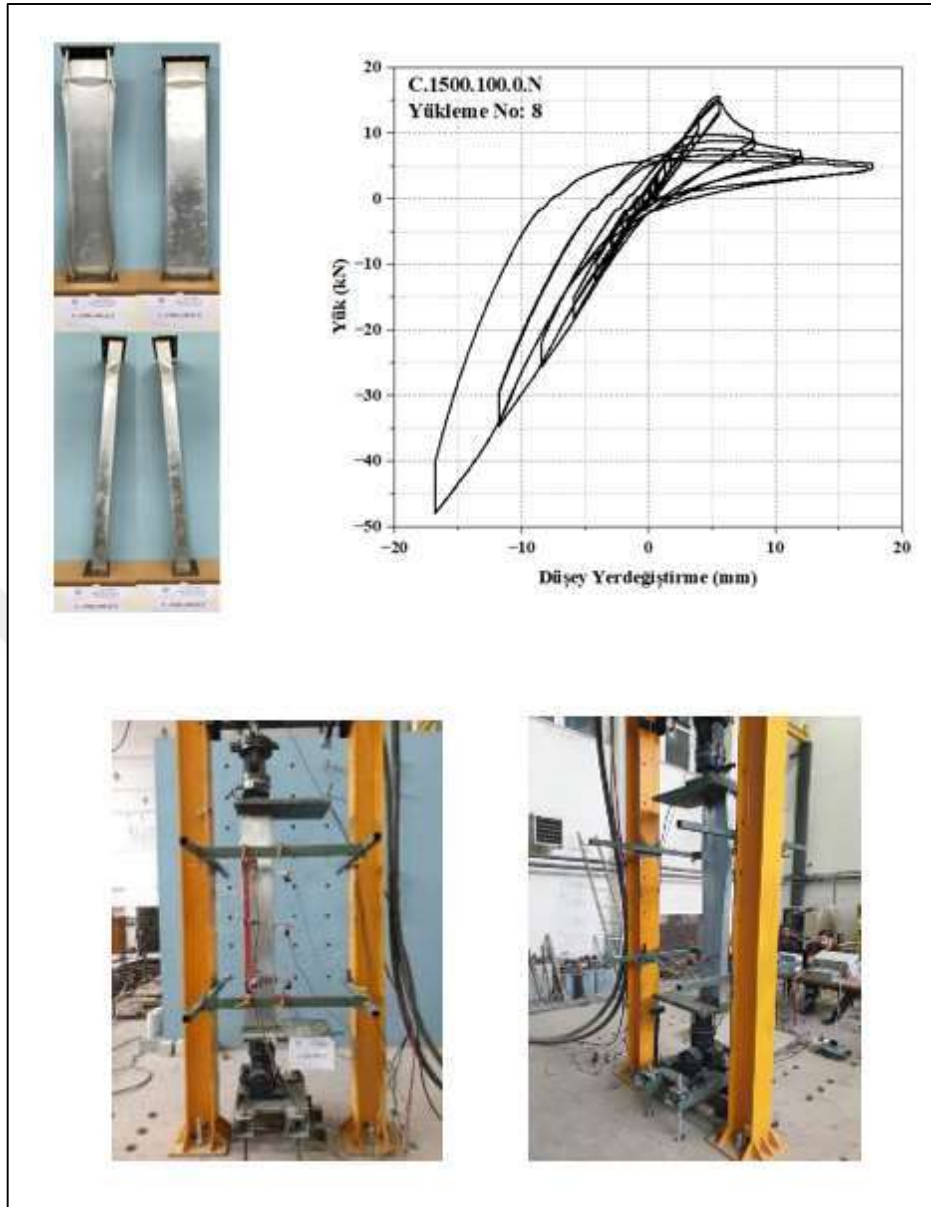
Şekil 62. C.1500.100.60.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.100.60.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 62’de verilmiştir. C.1500.100.60.N kodlu numune incelediğinde, ilk burkulma basınç ekseninde numunesinin alt ve üst taban plakasından yaklaşık 30 cm uzaklıkta flanş ve dudaklarda yerel olarak meydana gelmiştir. İtme çekme çevrimleri sırasında numune burulurken burkulmuştur. Basınç yüklemesi sırasında deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir. Bu kayıplar ve artışlar Şekil 62’de verilen eğriden hesaplanmıştır.



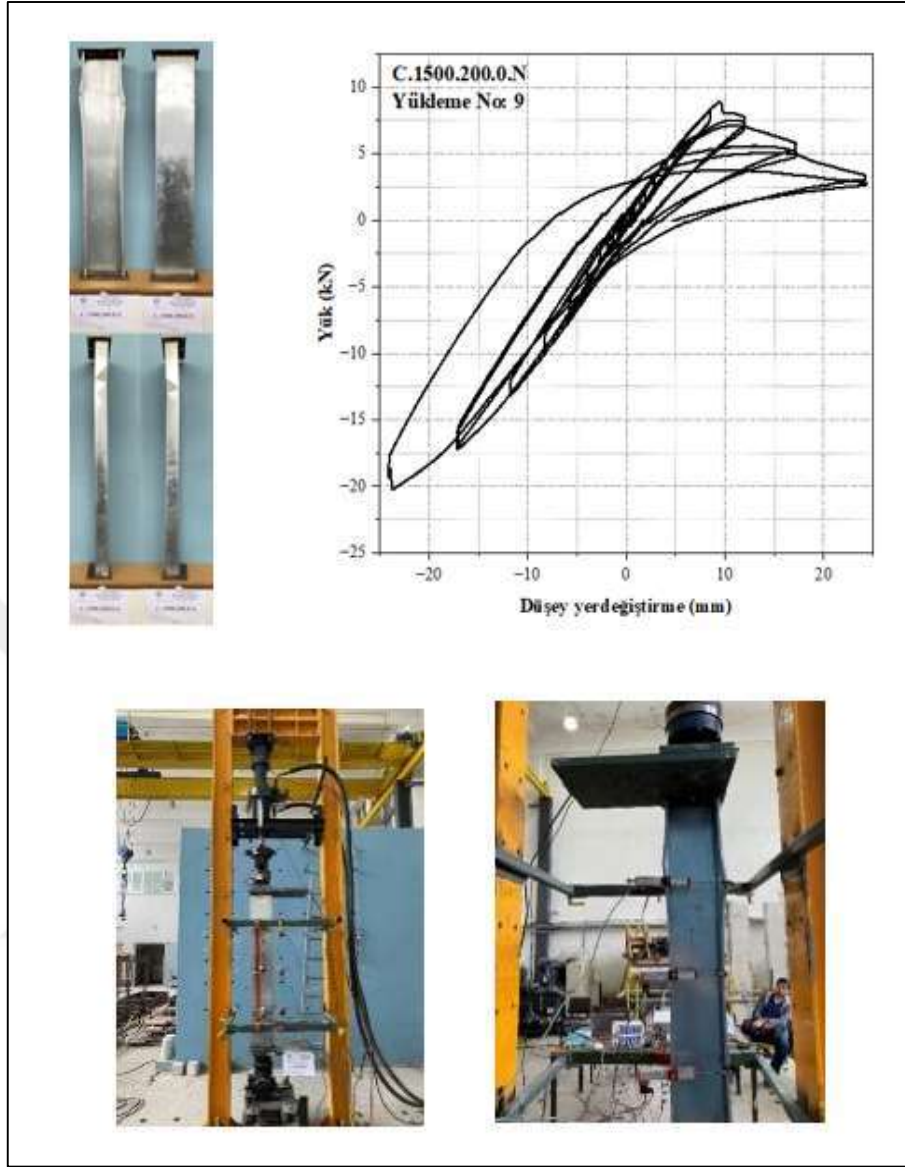
Şekil 63. C.1500.200.120.N deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.200.120.N kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 63'te verilmiştir. C.1500.200.120.N kodlu numune incelediğinde, ilk burkulmalar alt ve üst taban plakalarına yakın bölgelerde flanş ve dudakların açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde meydana gelmiştir. Basınç etkisinde numunede dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme etkisinde yük artışları meydana gelmiş ve bu kayıp ve artışlar Şekil 63'teki eğriden hesaplanmıştır.



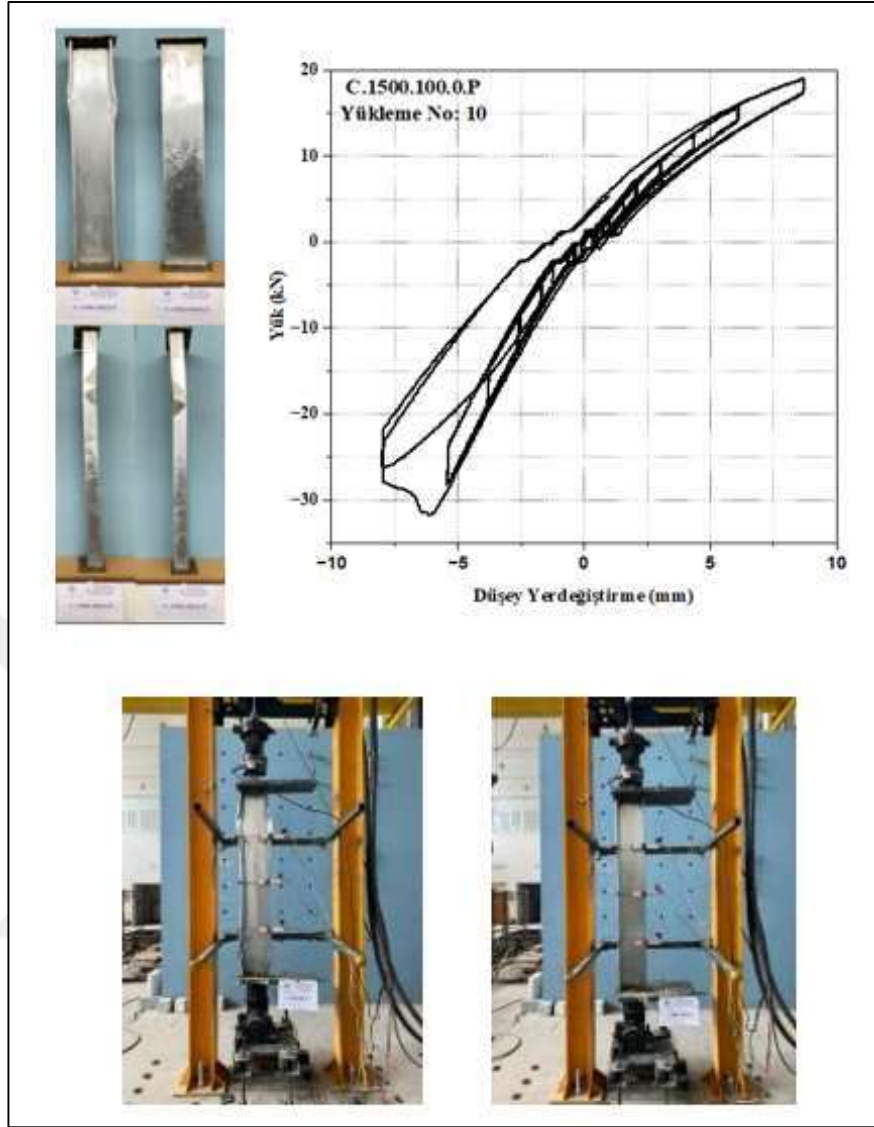
Şekil 64. C.1500.100.0.N deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.100.0.N kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 64'te verilmiştir. C.1500.100.0.N kodlu numune incelendiğinde, ilk burkulmalar üst taban plakasından yaklaşık 15 cm altında flanşların açılmasıyla çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. Basınç etkisinde deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir. Bu kayıp ve artışlar Şekil 64'teki eğriden görülebilir.



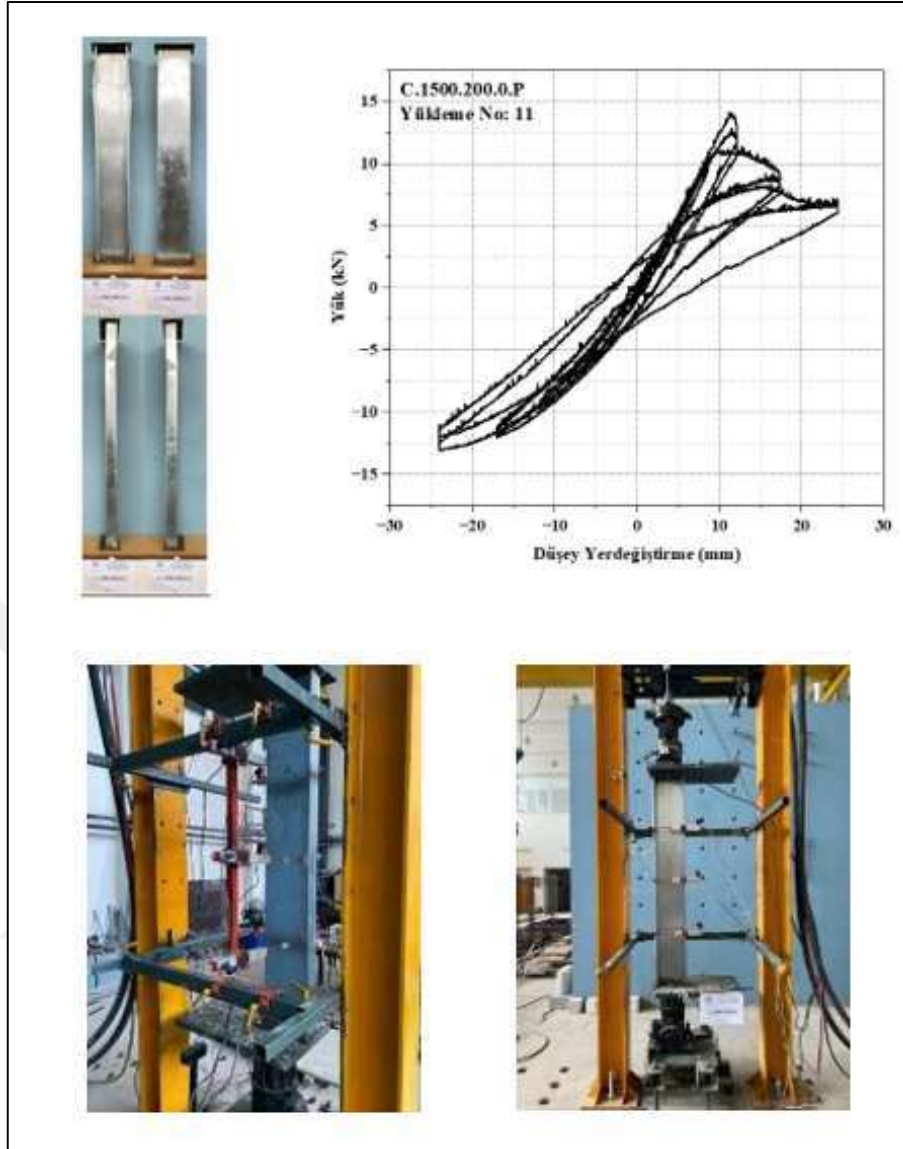
Şekil 65. C.1500.200.0.N deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.200.0.N kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 65'te verilmiştir. C.1500.200.0.N kodlu numune incelendiğinde, itme etkisinde ilk burkulma üst taban plakasına yakın bölgedeki flanşların dışa doğru açıldığı esnada orta bölgedeki flanşların içe doğru kapanması şeklinde meydana gelmiştir. Bu gözlem kesit üzerindeki LPDT'lerin flanşlar arası mesafe ölçümünden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. Basınç yüklemesi sırasında deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir.



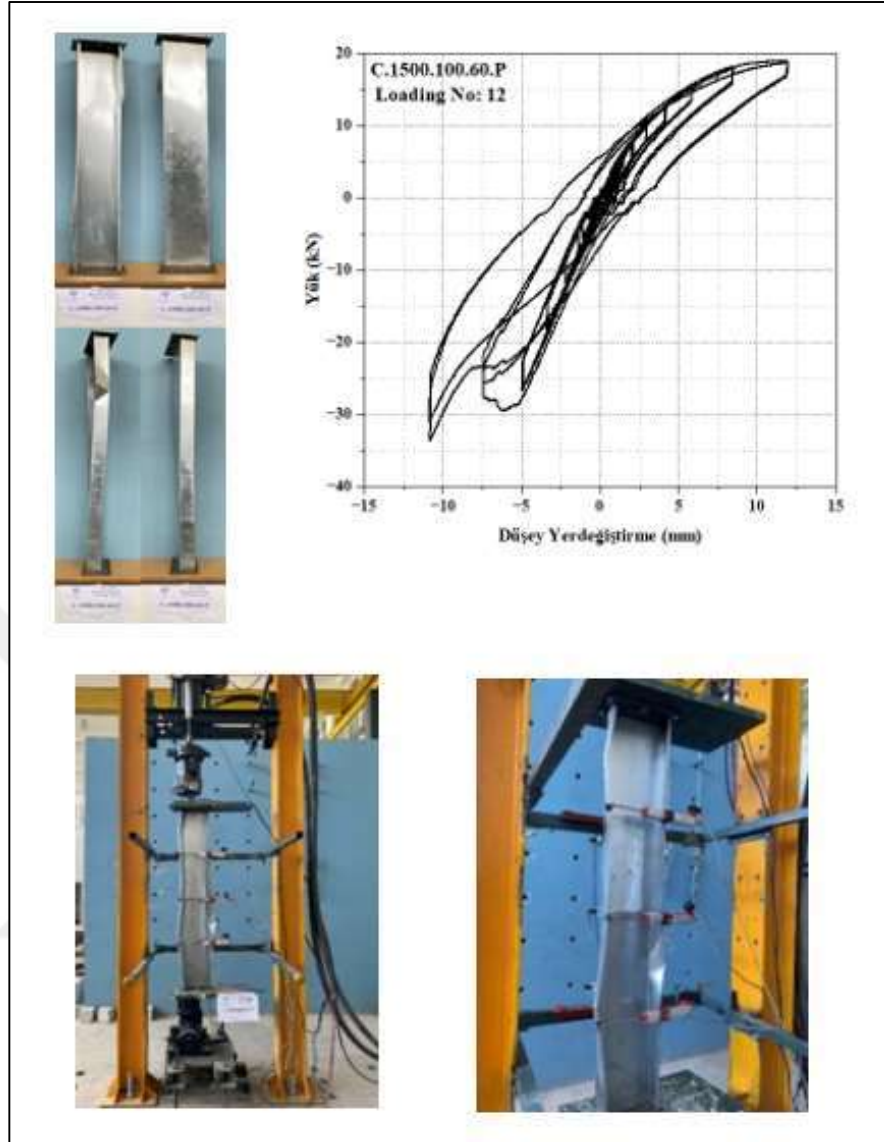
Şekil 66. C.1500.100.0.P deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.100.0.P kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 66’da verilmiştir. C.1500.100.0.P kodlu numune incelendiğinde, Burkulmalar, üst başlık levhasının yaklaşık 35cm altında ve alt başlık levhasının yaklaşık 10 cm yukarısında flanşların açılıp dudakların burkulması şeklinde olmuştur. Flanşlar arasına yerleştirilen LPDT’lerden numunenin orta bölgesinde flanşlar arası mesafenin basınç ve çekme yüklemeleri sırasında azaldığı tespit edilmiştir. Basınç yüklemesi sırasında deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir.



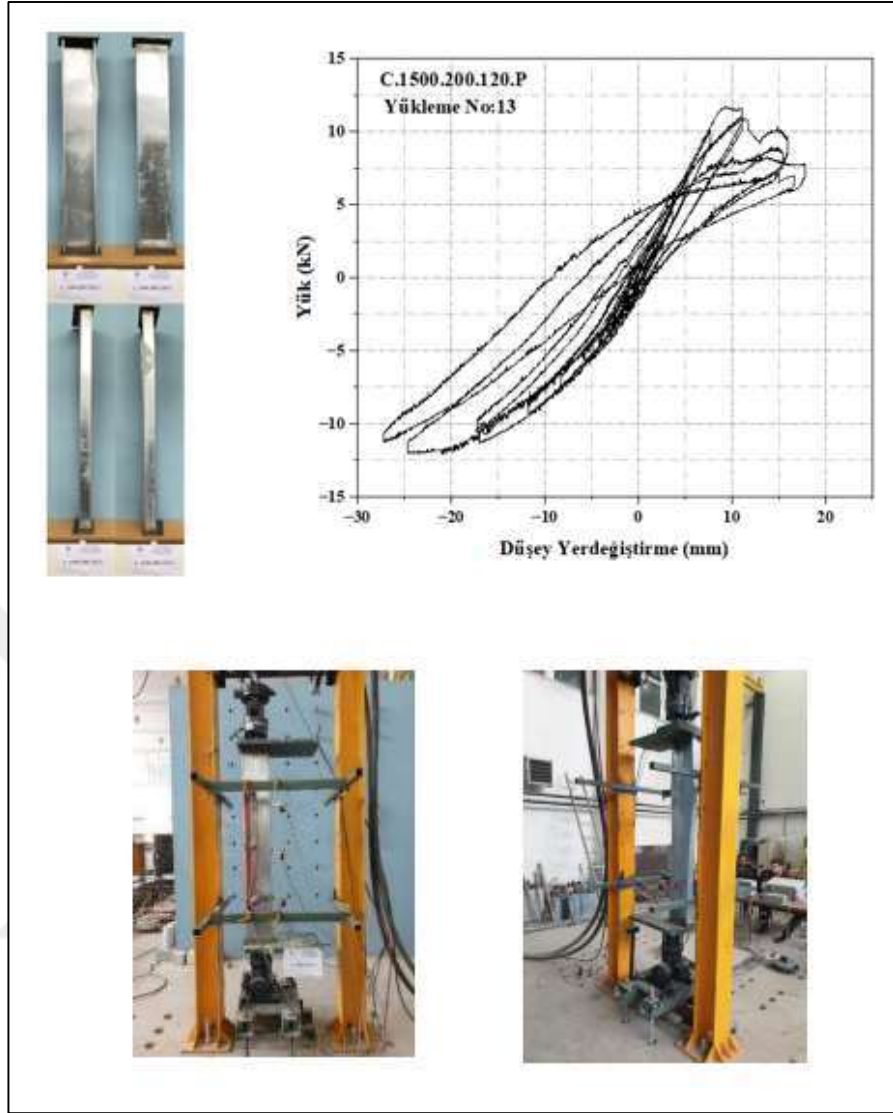
Şekil 67. C.1500.200.0.P deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.200.0.P kodlu deney numunesi asal ekseninde (y) bir doğrultuda bileşik eğilme etkisinde test edilmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 67’de verilmiştir. C.1500.200.0.P kodlu numune incelendiğinde, burkulmalar üst taban plakasından yaklaşık 35 cm uzaklıkta flanşların ve dudakların açılmasıyla çarpımalı burkulma meydana gelmiştir. Flanşlar arasına yerleştirilen LPDT’den, numunenin orta bölgesinde flanşlar arası mesafenin basınç ve çekme yüklemesinde azaldığı tespit edilmiştir. Numunenin gövdesinde basınç ve çekme yüklemesi etkisinde dalgalanmalar oluşmuştur.



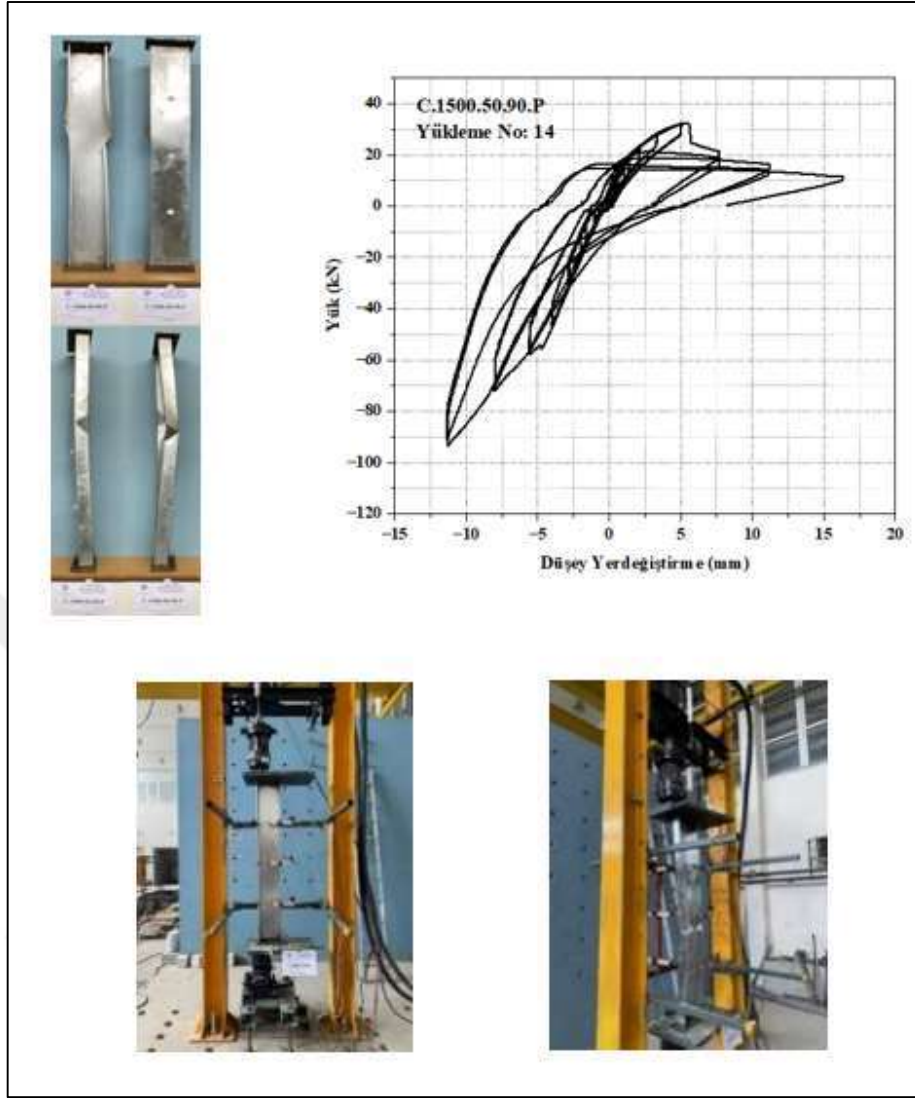
Şekil 68. C.1500.100.60.P deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.100.60.P kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 68’de verilmiştir. C.1500.100.60.P kodlu numune incelediğinde, basınç etkisinde numunenin alt taban plakasından yaklaşık 50 cm uzaklıkta ve üst taban plakasından yaklaşık 10 cm uzaklıkta flanşların açılması ile çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. İlerleyen çevrimlerde çekme ve basınç etkisinde numunede burulmalı burkulma meydana gelmiştir. Basınç yüklemesi sırasında deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir.



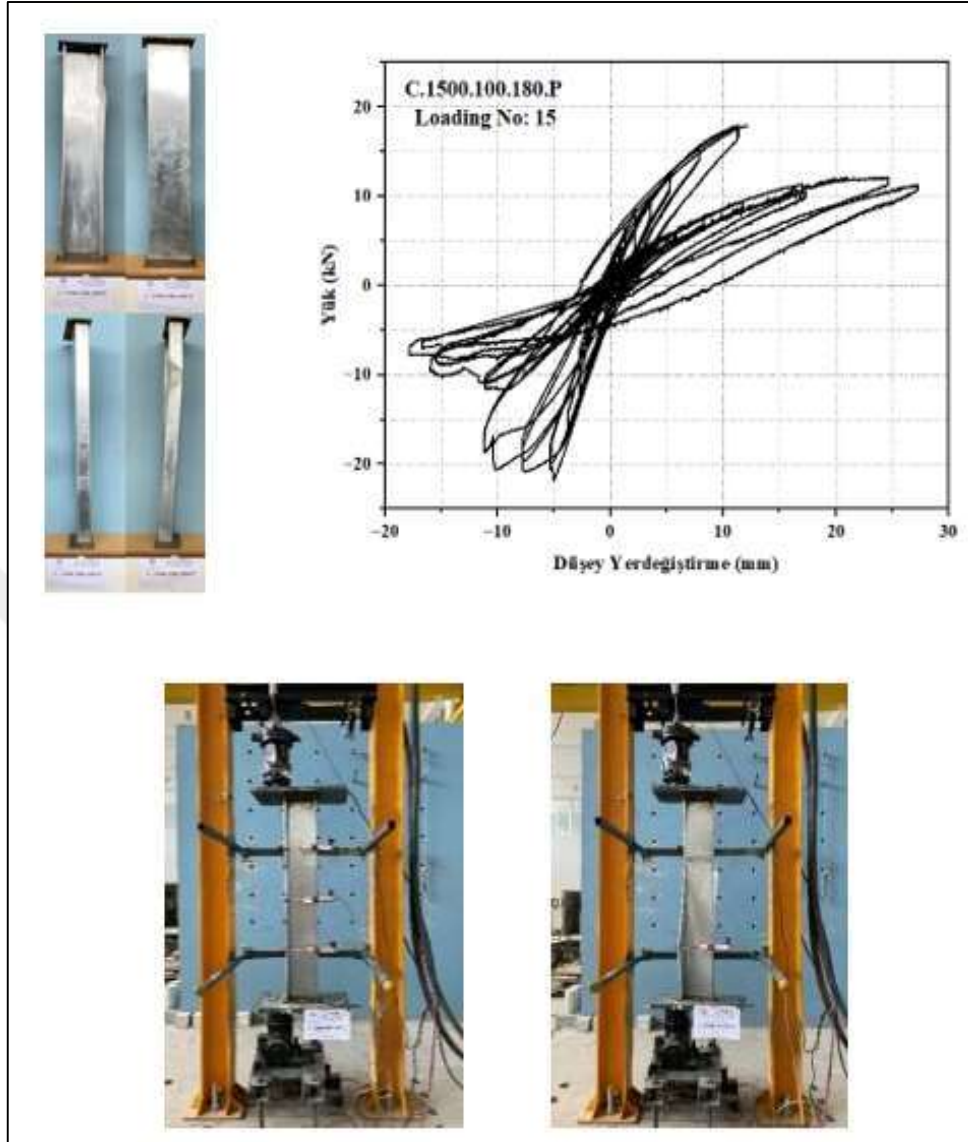
Şekil 69. C.1500.200.120.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.200.120.P kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 69'da verilmiştir. C.1500.200.120.P kodlu numune incelediğinde, basınç etkisinde numunenin alt ve üst taban plakasından yaklaşık 30 cm uzaklıkta flanşların açılmasıyla çarpımalı burkulma meydana gelmiştir. İlerleyen çevrimlerde çekme ve basınç etkisinde numunede burulmalı burkulma meydana gelmiştir. Basınç yüklemesi sırasında deney numunesinde dayanım ve rijitlik kaybı olurken çekme yüklemesi sırasında yük artışları meydana gelmiştir



Şekil 70. C.1500.50.90.P deney numunesine ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

C.1500.50.90.P kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düsey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 70’te verilmiştir. C.1500.50.90.P kodlu numune incelediğinde, basınç etkisinde numunenin orta bölgesinde karşılıklı iki flanşın açılmasıyla çarpımalı burkulma ve numunenin gövdesinde yerel burkulma oluşmuştur. Basınç etkisinde deney numunesinde genel burkulma görülmüş ve bu gözlem arka ölçüm sisteminden alınan verilerle doğrulanmıştır. Çekme ve basınç yüklemelerinden dolayı rijitlik ve dayanım kaybı meydana gelmiştir.

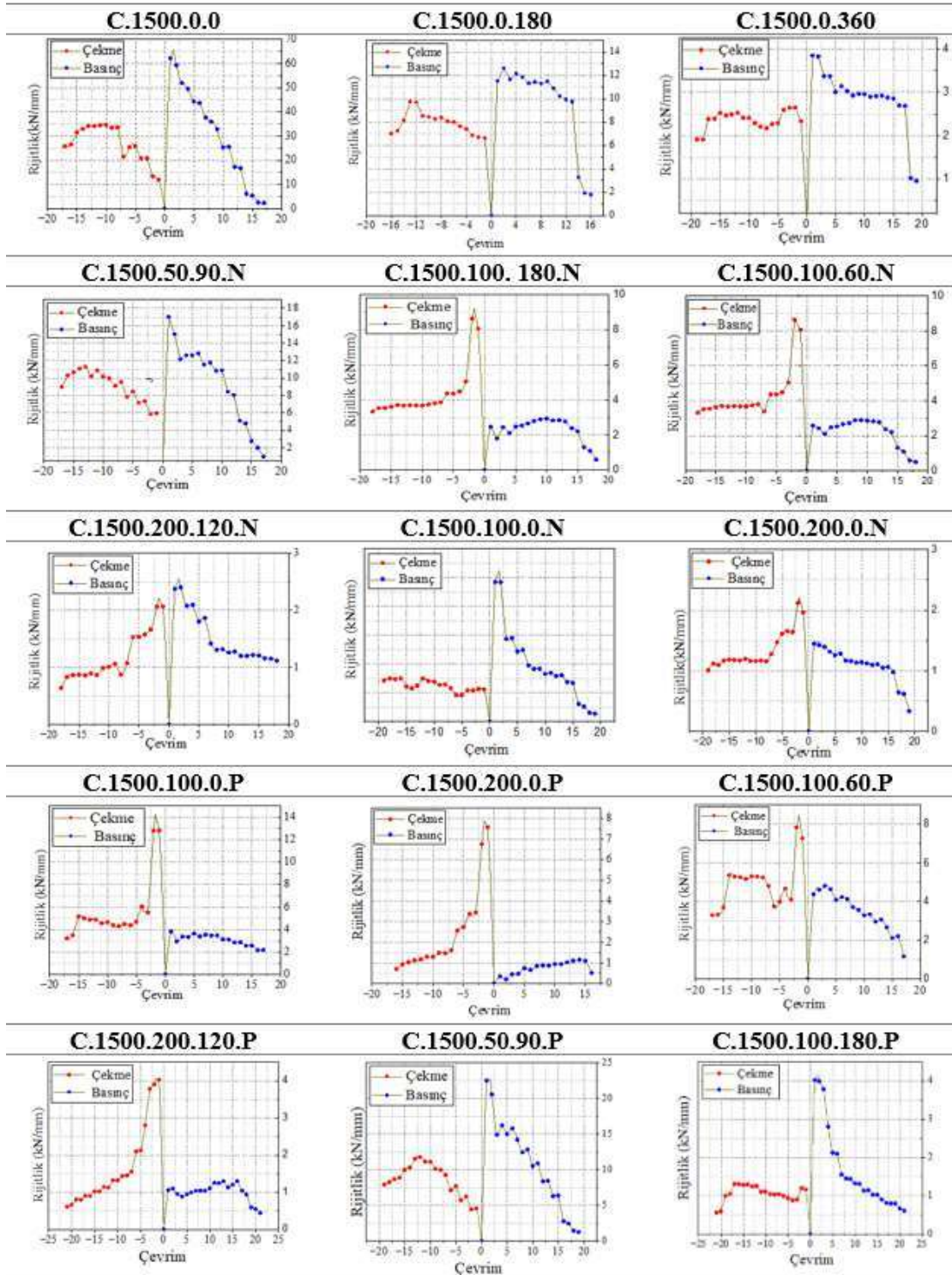


Şekil 71. C.1500.100.180.P deney numunesine ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi ve deneyden görüntüler

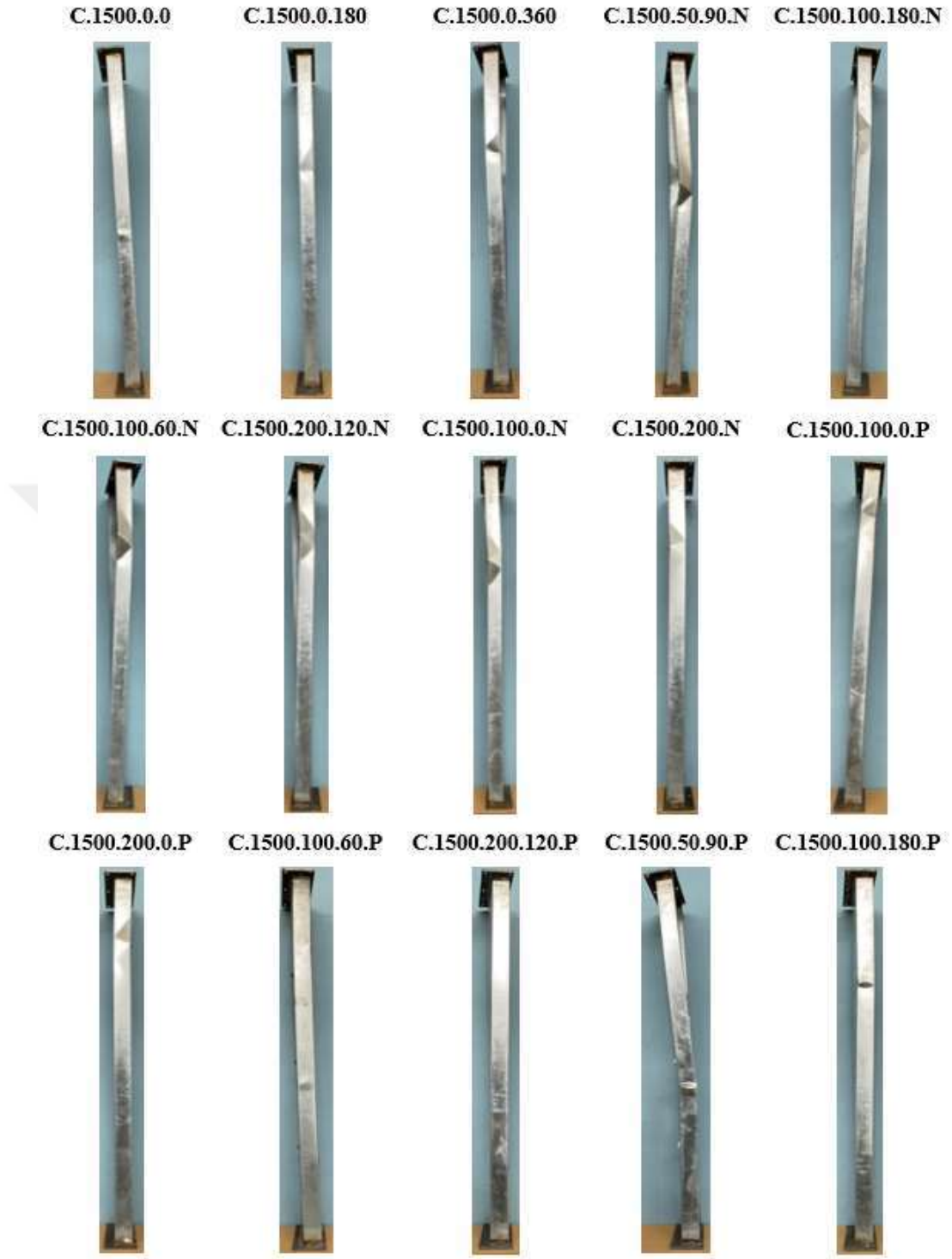
C.1500.100.180.P kodlu deney numunesi iki doğrultuda bileşik eğilme etkisinde yüklenmiştir. Numuneye ait deney sonundaki burkulma şekli ve yük- düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 71’de verilmiştir. C.1500.100.180.P kodlu numune incelediğinde, burkulmalar basınç etkisinde numunenin alt taban plakasından yaklaşık 35 cm uzaklıkta ve numunenin orta bölgesinde flanşların dışa doğru açılarak çarpılmalı burkulması şeklinde meydana gelmiştir. Çekme ve basınç yüklemelerinden dolayı rijitlik ve dayanım kaybı meydana geldiği Şekil 71’deki eğrinin eğimin azalmasından anlaşılabılır.

3.3.1. Tersinir-Tekrarlı Yükleme Etkisinde Dudakların Gerilme Durumuna Göre Elemanların Karakteristik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

15 adet C-enkesitli deney elemanı üzerinde gerçekleştirilen yüklemelerde, eksantrisitenin değişimi elemanların rijitlik, süneklik ve enerji tutma kapasitelerini değiştirmiştir. Yüklemelerde C.1500.100.180.P elemanının sünekliği C.1500.100.180.N elemanından %36 az, C.1500.200.0.P elemanının sünekliği C.1500.200.0.N elemanının 4 katı, C.1500.200.120.P elemanının sünekliği C.1500.200.120.N elemanından %36 fazla olmuştur. C.1500.0.360 elemanının enerji tutması C.1500.0.0 elemanından %22 daha fazla, C.1500.200.0.P elemanının enerji tüketmesi C.1500.200.0.N elemanının 2,6 katı, C.1500.50.90.P elemanının sünekliği C.1500.50.90.N elemanından %45 fazla olmuştur. Deney çalışmada maksimum enerji tutma C.1500.200.120.P elemanında gerçekleşmiştir. Eksantriste arttıkça tüketilen enerji miktarları artmaktadır. Dudakların çekme gerilmeleri etkisinde olan elemanlar basınç gerilmelerine maruz kalan elemanlara göre daha sünek bir davranış sergilemiştir. Her bir çevrim için tüm elemanların rijitlikleri hesaplanmıştır (Şekil 72). Elemanlarda oluşan yerel burkulmadan dolayı rijitlikte ortalama %45'lik bir azalma olmuştur. Eksantriste arttıkça bir sonraki çevrimde rijitlikteki azalma düşmektedir. Dudakların basınç gerilmeleri etkisinde olan elemanlar, çekme gerilmelerine maruz kalan elemanlara göre daha rijit bir davranış sergilemiştir. Aynı genlikte ikinci çevrimde elemanların rijitliğinde ortalama %15'lik bir azalma meydana gelmektedir. Elemanların her bir çevrimdeki başlangıç rijitliklerindeki değişimler Şekil 72'de verilmiştir. Çevrimsel yükleme altında elemanların deney sonundaki burkulma şekilleri Şekil 73'te verilmiştir.



Şekil 72. Çevrimlere göre elemanların rijitliklerinin değişimi



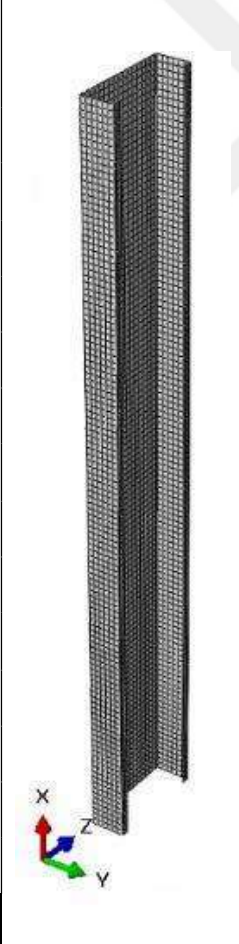
Şekil 73. Tersinir-tekrarlı yüklemeler altında deney elemanlarının deney sonundaki burkulma şekilleri

3.4. Monotonik Yükleme Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

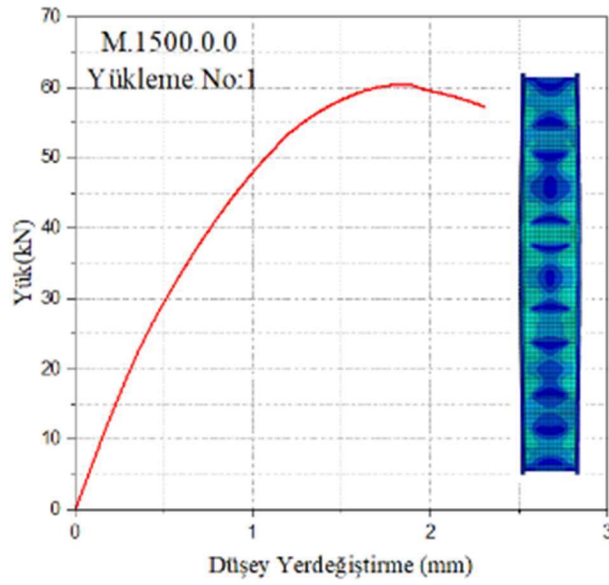
Bu tez kapsamında, 15 farklı noktadan monotonik olarak yüklenen elemanların sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 15 farklı noktanın bir tanesi eksenal olarak diğerleri tek veya çift eksende eksantrik olarak yüklenmiştir. Analiz yapılmadan önce elemanın görünümü ve yükleme koordinatları Tablo 3.3'te verilmiştir. Tablo 3.3'te M.1500.0.0 adlı yüklemesindeki Y ve Z koordinatları orijin (0,0)'e göre ağırlık merkezinin koordinatlarıdır.

Monotonik yüklemeler sonucunda sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri ve deney sonundaki burkulma şekilleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 6. Analiz yapılacak elemanın görünümü ve Abaqus programına girilen yükleme koordinatları

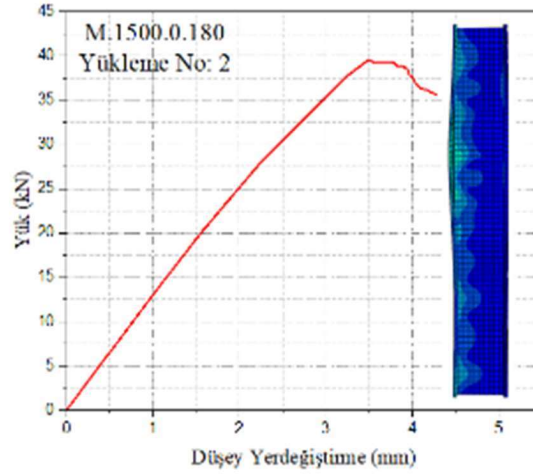
	Deney Elemanı Etiket Adı	Y Koordinatları	Z Koordinatları
	M.1500.0.0	19.08	109.25
	M.1500.0.180	19.08	289.25
	M.1500.0.360	19.08	469.25
	M.1500.50.90.N	69.08	199.25
	M.1500.100.180.N	119.08	289.25
	M.1500.100.60.N	119.08	169.25
	M.1500.200.120.N	219.08	229.25
	M.1500.100.0.N	119.08	109.25
	M.1500.200.N	219.08	109.25
	M.1500.100.0.P	-80.92	109.25
	M.1500.200.0.P	-180.92	109.25
	M.1500.100.60.P	-80.92	169.25
	M.1500.200.120.P	-180.92	229.25
	M.1500.50.90.P	-30.92	199.25
	M.1500.100.180.P	-80.92	289.25

M.1500.0.0 kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 74'te gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmaların gövdedeki dalgalanmalar sonucunda yerel burkulma şeklinde gerçekleştiğı tespit edilmiştir. İlk yerel burkulmadan sonra yükte kademeli azalma meydana gelmiştir. Elemanın maksimum yük değeri 60.41 kN, maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 1.84 mm olarak hesaplanmıştır.



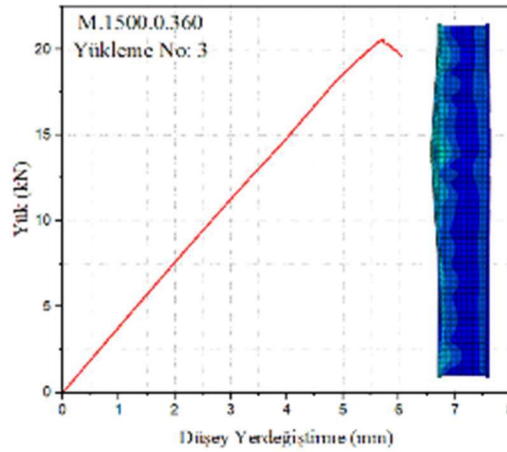
Şekil 74. M.1500.0.0 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiğı ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

M.1500.0.180 kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 75'te gösterilmiştir. M.1500.0.180 kodlu eleman, birleşik eksenel yük ve kuvvetli eksen (x) etrafında eğilme momenti etkisindedir. Numunenin burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar yükleme noktasına daha yakın olan flanşa yerel burkulma şeklinde gerçekleştiğı belirlenmiştir. İlk burkulma ile yükte kademeli azalma gözlenmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 39.54 kN olarak belirlenmiş ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 3.51 mm olarak hesaplanmıştır.



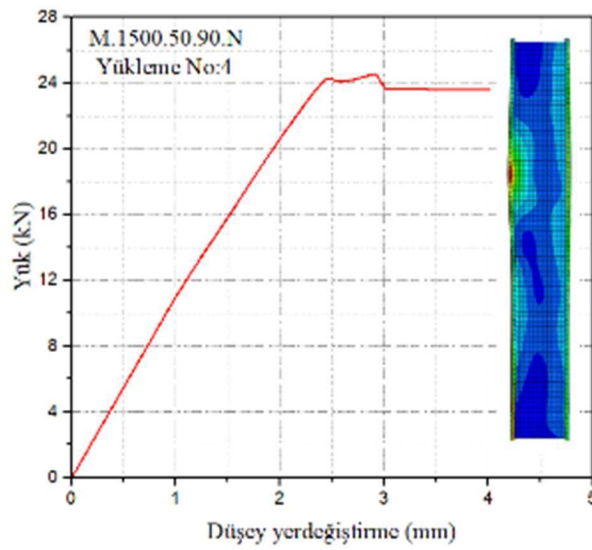
Şekil 75. M.1500.0.180 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

M.1500.0.360 kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 76’da gösterilmiştir. M.1500.0.360 kodlu eleman, birleşik eksenel yük ve kuvvetli eksen (x) etrafında eğilme momenti etkisindedir. Numunenin burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmanın yükleme noktasına daha yakın olan flanşta yerel burkulma şeklinde gerçekleştiği belirlenmiştir. İlk burkulma ile yükte keskin bir azalma gözlenmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 20.55 kN olarak belirlenmiş ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 5.75 mm olarak hesaplanmıştır.



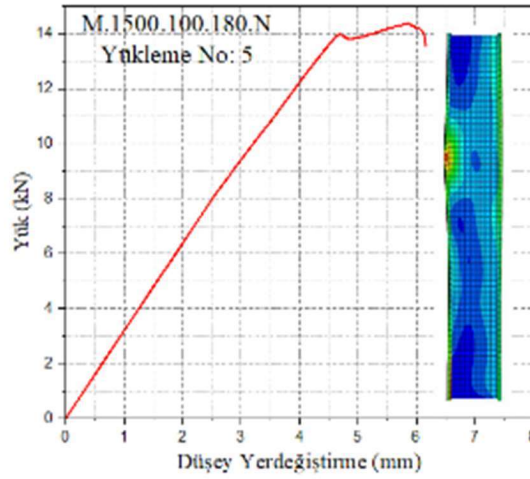
Şekil 76. M.1500.0.360 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

M.1500.50.90.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.77’de gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar üst mesnette yakın bölgede flanşın dışa doğru açılması sonucunda çarpılmalı burkulma şeklinde oluşmuştur. Yerel burkulma sonucunda yükte ani alma olmuştur. Yükleme devam ettikçe maksimum noktada flanşta yerel burkulma meydana geldikten sonra yükte keskin bir azalma gözlenmiştir. Analiz süresince, numunenin maksimum yük değeri 24.53 kN olarak belirlenmiş ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 2.91 mm olarak hesaplanmıştır.



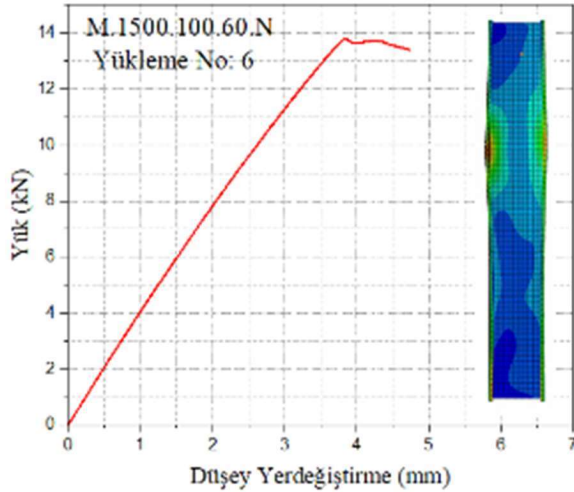
Şekil 77. M.1500.50.90.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiğı ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

M.1500.100.180.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 78’de gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, elemanın üst mesnete yakın bölgede dudak ve flanşın dışa doğru açılmasıyla çarpılmalı burkulma meydana gelmiştir. İlk burkulma ile yükte azalma gözlenmiş, daha sonra yükte artış devam etmiştir. Yükleme devam ettikçe, flanşta yerel burkulma gerçekleşmiş ve yükte keskin bir azalma olmuştur. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 14.35 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirme 5.92 mm olarak hesaplanmıştır.



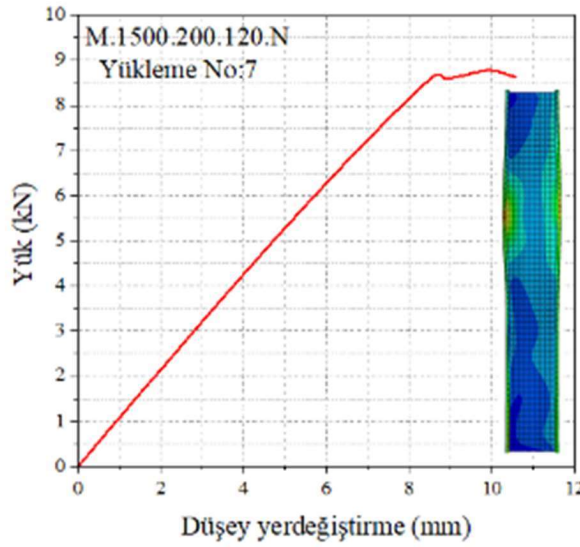
Şekil 78. M.1500.100.180.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

M.1500.100.60.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 79'da gösterilmiştir. Numunenin burkulma şekli incelendiğinde, profil dudakları basınç gerilmesi altında olduğu ve burkulmanın üst mesnette, yakın bölgede flanşların dışa doğru açılarak çarpımalı burkulma şeklinde olduğu belirlenmiştir. Maksimum yükten sonra yükte kademeli bir azalma meydana gelmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 13.77 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 3.95 mm olarak hesaplanmıştır.



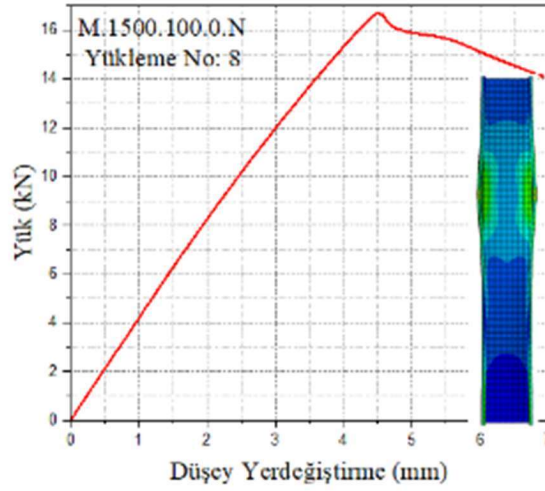
Şekil 79. M.1500.100.60.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

M.1500.200.120.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 80'de gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmanın üst mesnete yakın bölgede flanşların dışa doğru açılarak çarpılmalı burkulma şeklinde meydana geldiği belirlenmiştir. Maksimum yükten sonra yük kademeli olarak azalmış ve analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 8.76 kN olarak belirlenmiş ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirme 10.48 mm olarak hesaplanmıştır.



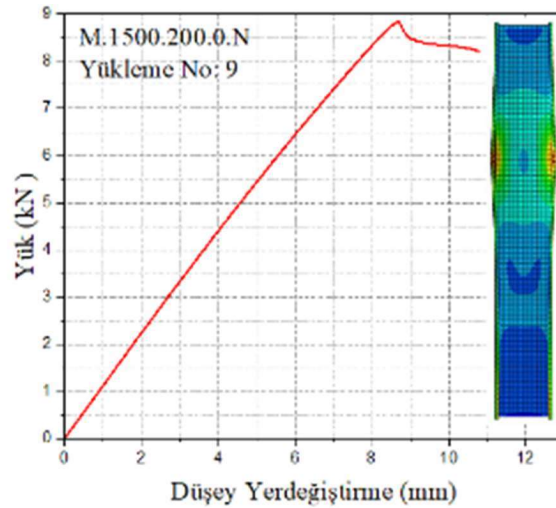
Şekil 80. M.1500.200.120.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiğı ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

M.1500.100.0.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 81'de gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar, flanşlarda çarpılmalı burkulma şeklinde oluşmuştur. İlk burkulma ile yükte keskin bir azalma meydana gelmiş ve analiz süresince elemanın maksimum yük değeri 16.70 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 4.52 mm olarak hesaplanmıştır.



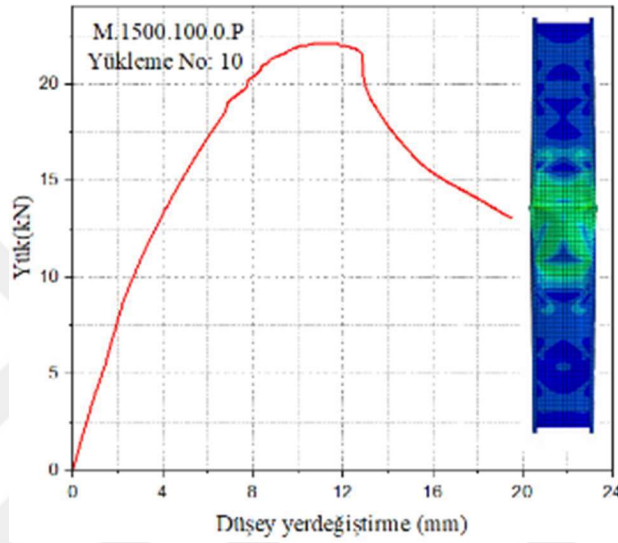
Şekil 81. M.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

M.1500.200.0.N kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 82'de gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar elemanın orta bölgesinin 100 mm üzerinde flanşların açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde oluşmuştur. İlk burkulma ile yükte keskin bir azalma meydana gelmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 8.84 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 8.65 mm olarak hesaplanmıştır.



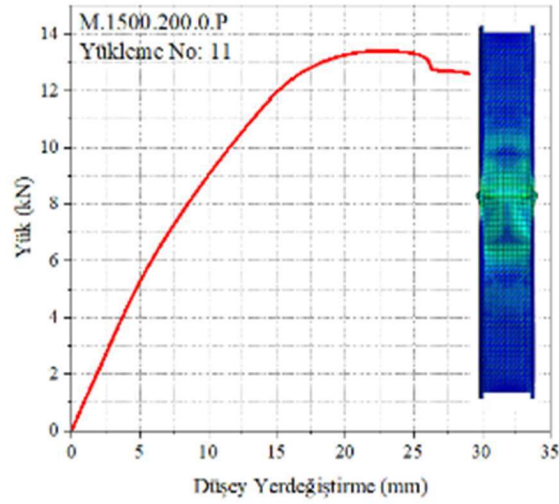
Şekil 82. M.1500.200.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

M.1500.100.0.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 83'te gösterilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar profilin gövdesinde genel burkulma olarak görülmüş ve yükleme devam ettikçe gövde ve flanşlarda yerel burkulma meydana gelmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 22.10 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmesi 10.50 mm olarak hesaplanmıştır.



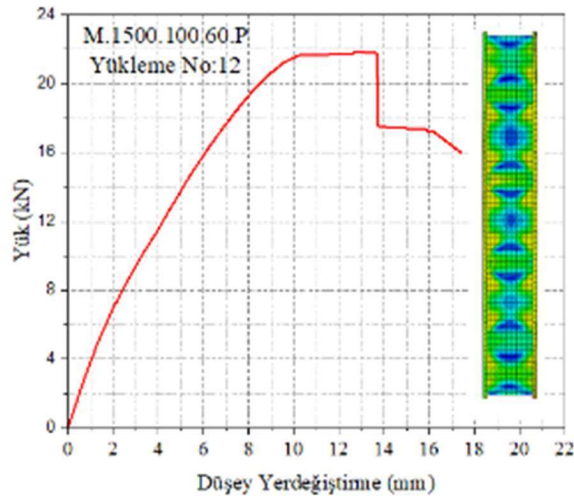
Şekil 83. M.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiğı ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

M.1500.200.0.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 84'te verilmiştir. Elemanın burkulma şekli incelendiğinde, ilk burkulmalar profilin gövdesinde genel burkulma meydana gelmiş ve yükleme devam ettikçe gövde orta bölgesinde, özellikle flanş-gövde bölgesine yakın alanda flanşların dışa doğru açılarak yerel burkulmalar oluşmuştur. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 13.42 kN olarak hesaplanmış ve bu maksimum yük anında düşey yer değiştirmesi 22.60 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 84. M.1500.200.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

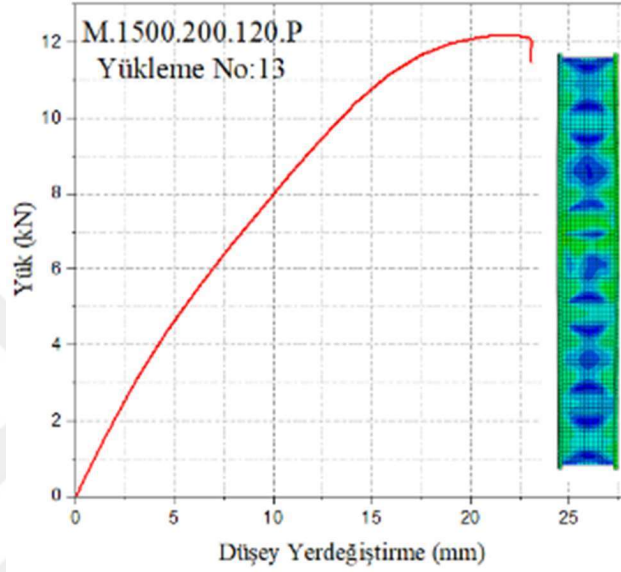
M.1500.100.60.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 85’te verilmiştir. Elemanın burkulma şekline bakıldığında, ilk burkulmalar gövdede yerel burkulma ve flanşların dışa doğru açılmasıyla çarpımalı burkulmanın olduğu gözlenmiştir. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 21.85 kN ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmenin 10.95 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 85. M.1500.100.60.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

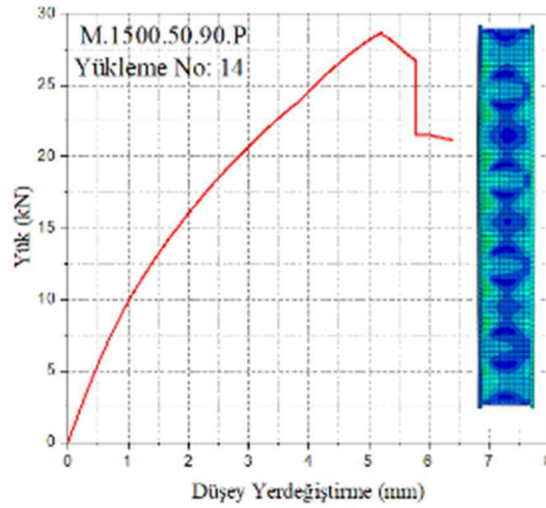
M.1500.200.120.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 86’da verilmiştir. Elemanın burkulma şekline bakıldığında,

kuvvetli eksen (x) etrafında genel bir burkulma meydana geldiği ve zayıf eksen (y) doğrultusunda ise gövdede ve yükün uygulandığı noktaya yakın flanşa yerel burkulmanın olduğu gözlenmiştir. Flanştaki yerel burkulma ile yükte keskin bir azalma meydana gelmiş ve analiz süresince elemanın maksimum yük değeri 12.19 kN olarak hesaplanmış ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmenin 20.69 mm olduğu tespit edilmiştir.



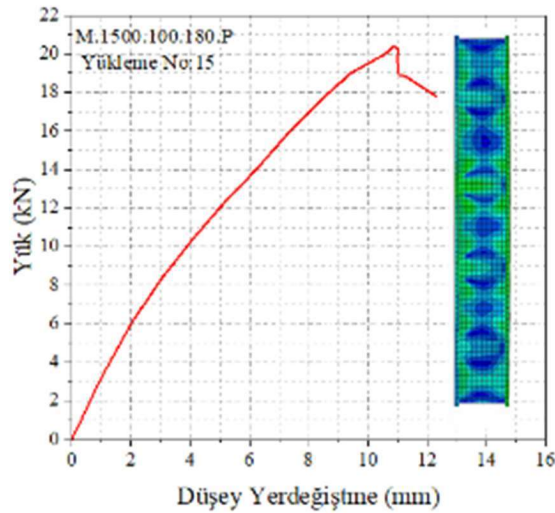
Şekil 86. M.1500.200.120.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

M.1500.50.90.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 87'de verilmiştir. Elemanın burkulma şekline bakıldığında, ilk burkulmalar, gövdede yerel burkulmaların meydana geldiği ve yükleme devam ettikçe üstte yakın bölgede flanşların açılarak çarpılmalı burkulma oluşmuştur. Analiz süresince, elemanın maksimum yük değeri 28.68 kN olarak hesaplanmış ve bu maksimum yük anında düşey yerdeğiştirmenin 6.25 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 87. M.1500.50.90.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

M.1500.100.180.P kodlu sonlu eleman modelinin burkulma şekli ve yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi Şekil 88'de gösterilmektedir. Elemanın burkulma şekline bakıldığında, ilk burkulmalar gövdede yerel burkulmaların meydana geldiği ve yükleme devam ettikçe orta bölgede flanşların dışa açılarak çarpımalı burkulma oluşmuştur. Analiz süresince, numunenin maksimum yük değeri 20.30 kN ve bu maksimum yük anındaki düşey yer değiştirme miktarı 10.97 mm olarak hesaplanmıştır.

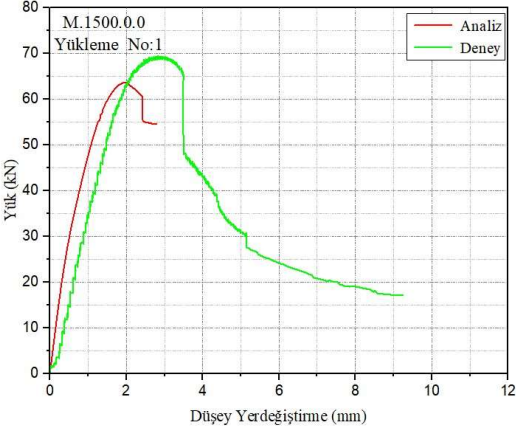
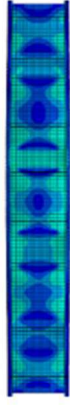


Şekil 88. M.1500.100.180.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

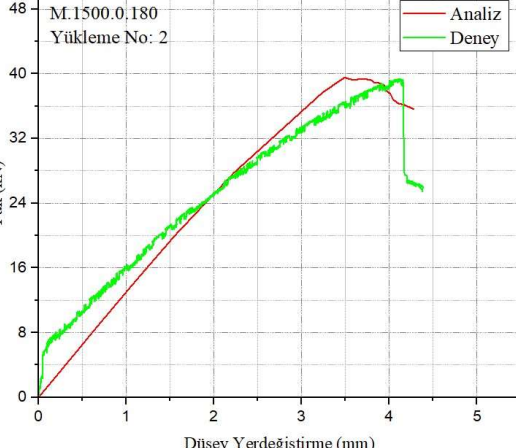
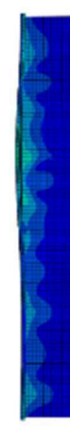
3.4.1. Monotonik Yükleme Etkisindeki Elemanların Deney ve Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Farklı eksantrisitelerde monotonik yüklemeler 15 elemanın deney ve sonlu eleman analiz sonuçlarına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırmak amacıyla koordinat düzleminde çizdirilmiş ve yapılan karşılaştırmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Monotonik yükleme etkisindeki 15 elemanın deney ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında, deney ve analiz sonuçları arasında belirgin bir rijitlik farkı bulunmamıştır. Monotonik yükleme etkisindeki 15 elemanın deney ve analiz sonuçlarına incelendiğinde, deneysel çalışma sonucundaki yük taşıma kapasiteleri, analiz elde edilen yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, maksimum yük anındaki düşey yerdeğiştirme değeri de deneysel çalışmalarda daha yüksektir. Deney ve analiz sonuçları arasında maksimum yük/düşey yerdeğiştirme (başlangıç rijitliğı) değeri birbirine oldukça yakındır. Monotonik yükleme etkisindeki 15 elemanın deney ve analiz sonuçlarına incelendiğinde, aynı eksantrisite değeriinde yüklenmiş olan flanşların çekme gerilmeleri altında kaldığı P elemanların durumlarda yük taşıma kapasiteleri, flanşların basınç altında kaldığı N elemanlara göre daha yüksektir. Monotonik yükleme etkisindeki 15 elemanın deney ve analiz sonuçlarına bakıldığında, eksantrisite değeri arttıkça yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Bu azalma zayıf eksen doğrultusunda, kuvvetli eksen doğrultusuna göre daha fazladır.

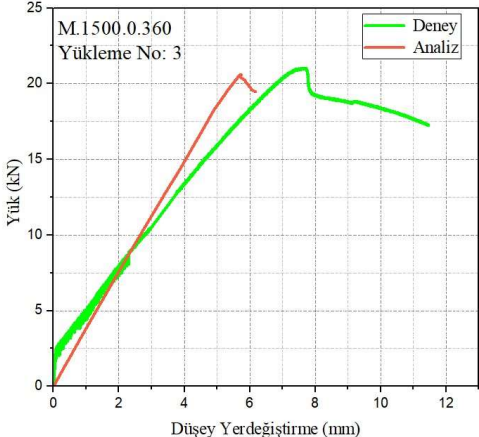
Tablo 7. M.1500.0.0 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney			Analiz
	M.1500.0.0		
Yük(kN)	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
69.48	69.48	65.56	0.943
Tüketilen Enerji (J)	165.50	130.52	0.789

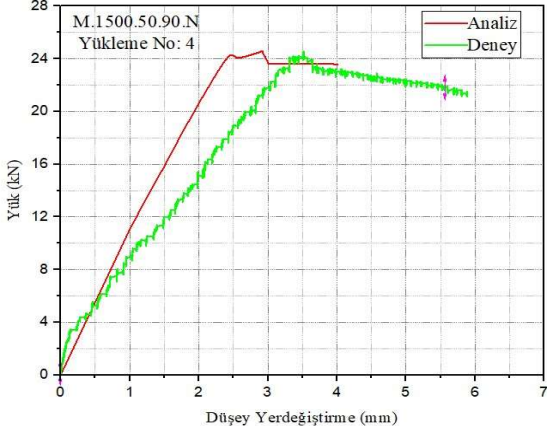
Tablo 8. M.1500.0.180 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney			Analiz
	M.1500.0.180		
Yük(kN)	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
39.36	39.36	39.53	1.005
Tüketilen Enerji (J)	103.43	100.82	0.971

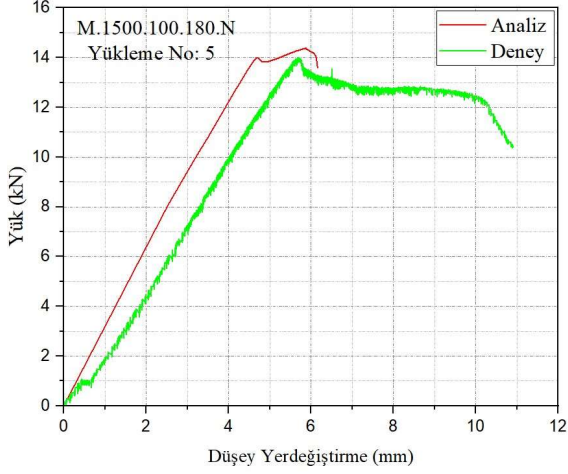
Tablo 9. M.1500.0.360 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.0.360	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	21.02	20.55	0.977
Tüketilen Enerji (J)	153.30	69.98	0.457

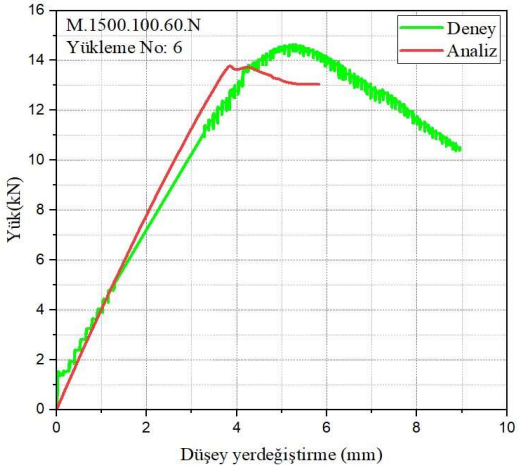
Tablo 10. M.1500.50.90.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.50.90.N	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük	25.54	24.53	0.960
Tüketilen Enerji (J)	94.97	68.63	0.726

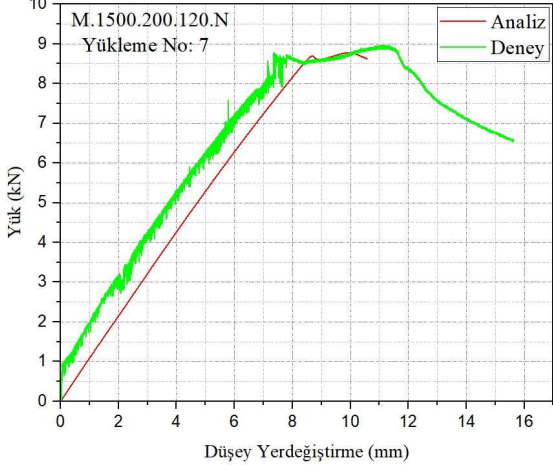
Tablo 11. M.1500.100.180.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	Analiz	
		
M.1500.100.180.N	Deney	Analiz
Yük	13.97	14.35
Tüketilen Enerji (J)	97.06	54.94
		Analiz/ Deney
		1.028
		0.567

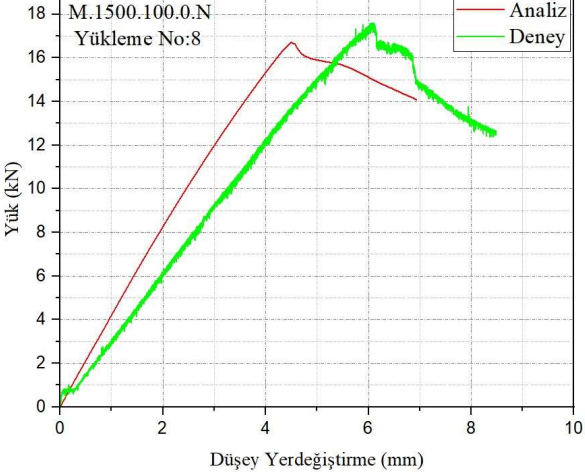
Tablo 12. M.1500.100.60.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	Analiz	
		
M.1500.100.60.N	Deney	Analiz
Yük(kN)	14.63	13.76
Tüketilen Enerji (J)	77.00	54.12
		Analiz/ Deney
		0.941
		0.707

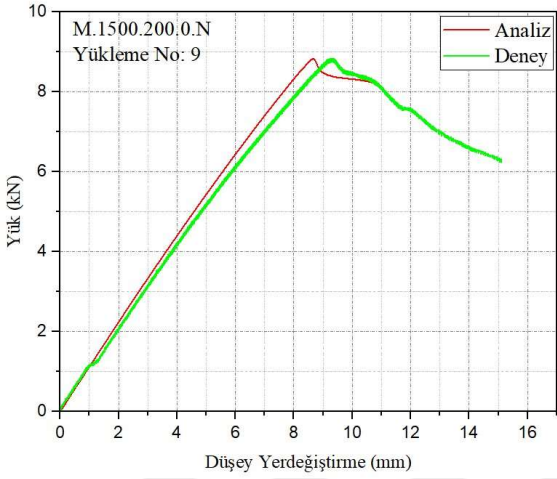
Tablo 13. M.1500.200.120.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	 		Analiz
M.1500.200.120.N	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	8.87	8.75	0.999
Tüketilen Enerji (J)	83.09	55.54	0.675

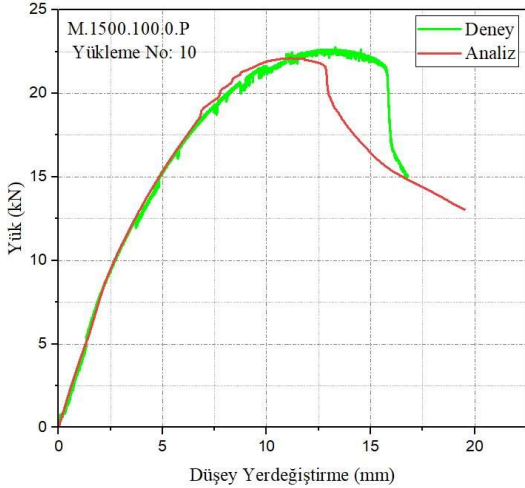
Tablo 14. M.1500.100.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	 		Analiz
M.1500.100.0.N	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	17.59	16.70	0.971
Tüketilen Enerji (J)	71.28	64.17	0.901

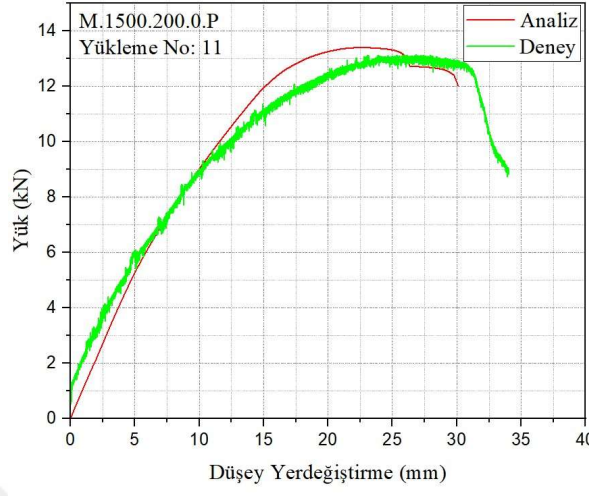
Tablo 15. M.1500.200.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.200.0.N	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	8.84	8.83	0.999
Tüketilen Enerji (J)	66.98	51.63	0.788

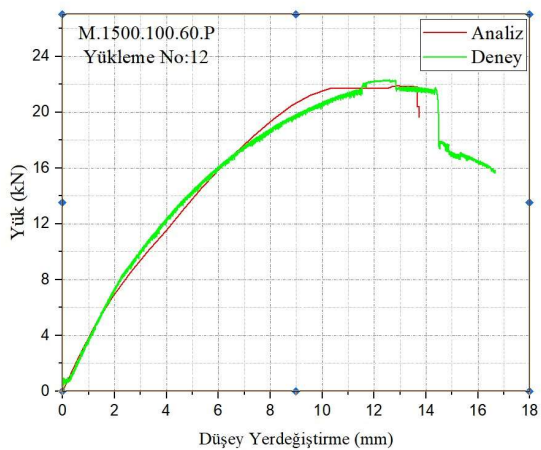
Tablo 16. M.1500.100.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.100.0.P	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	22.75	22.09	0.971
Tüketilen Enerji (J)	268.38	253.89	0.944

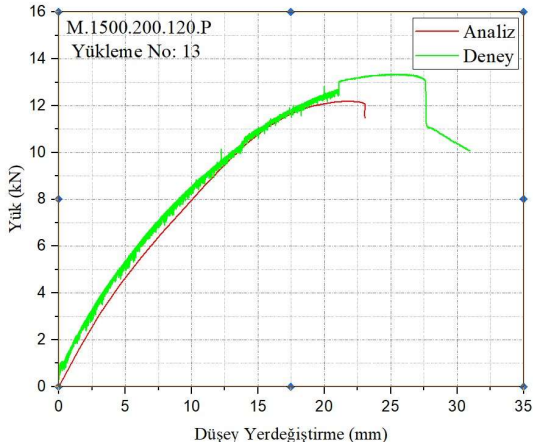
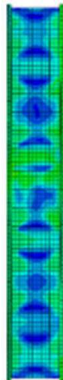
Tablo 17. M.1500.200.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	Analiz	
		
M.1500.200.0.P	Deney	Analiz
Yük(kN)	13.23	13.40
Tüketilen Enerji (J)	319.07	271.65
		Analiz/ Deney
		1.020
		0.850

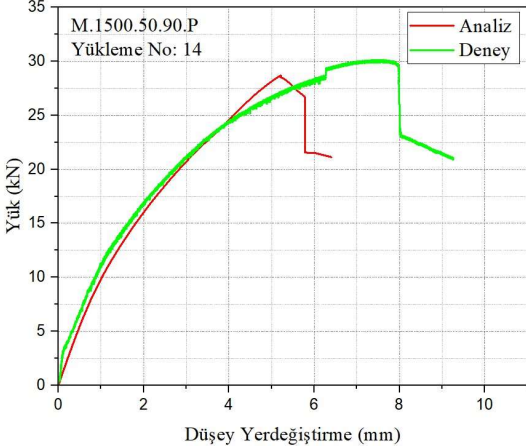
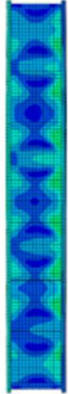
Tablo 18. M.1500.100.60.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney	Analiz	
		
M.1500.100.60.P	Deney	Analiz
Yük(kN)	22.31	21.84
Tüketilen Enerji (J)	232.19	211.06
		Analiz/ Deney
		0.979
		0.909

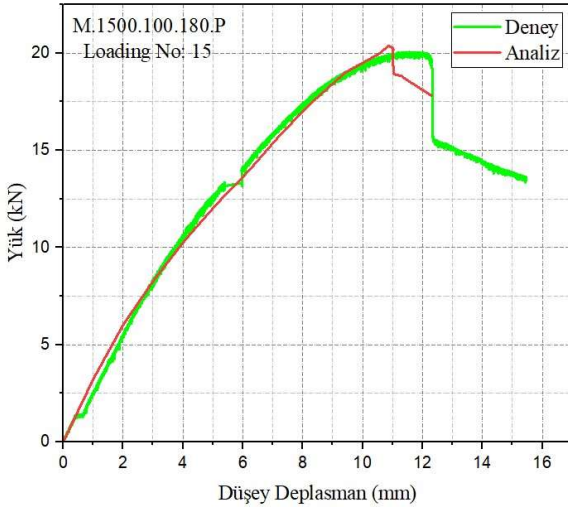
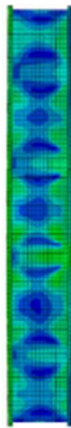
Tablo 19. M.1500.200.120.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.200.120.P	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	13.35	12.18	0.913
Tüketilen Enerji (J)	258.80	186.72	0.724

Tablo 20. M.1500.50.90.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

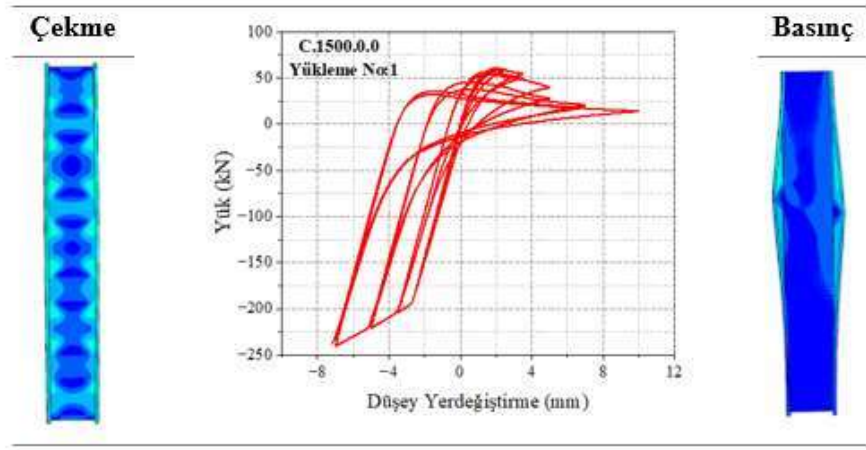
Deney	Analiz		
			
M.1500.50.90.P	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	30.13	28.67	0.946
Tüketilen Enerji (J)	175.11	109.86	0.628

Tablo 21. M.1500.100.180.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
M.1500.100.180.P	Deney	Analiz	Analiz/ Deney
Yük(kN)	20.05	20.29	1.012
Tüketilen Enerji (J)	161.24	150.07	0.931

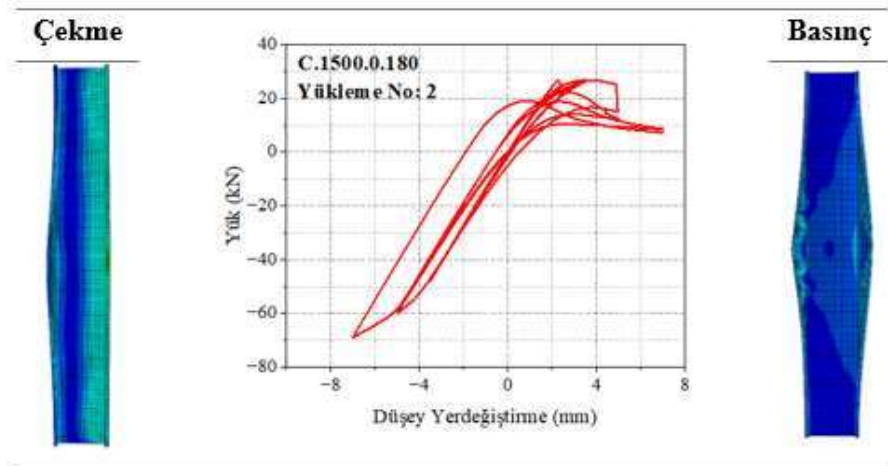
3.5. Tersinir-Tekrarlı Yüklemelerin Sonlu Eleman Analiz Sonuçları

Bu tez kapsamında, tersinir-tekrarlı etkisindeki 15 farklı elemanın sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 15 farklı eleman farklı eksantrisitelerde yüklenmiştir. Yükleme noktaları Tablo 3.3'te verilen monotonik yüklemelerin yapıldığı noktalarla aynıdır. C.1500.0.0 adlı yüklemesindeki Y ve Z koordinatları orijin (0,0)'e göre ağırlık merkezinin koordinatlarıdır. Tersinir-Tekrarlı yüklemeler sonucunda sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri ve deney sonundaki burkulma şekilleri aşağıda verilmiştir.



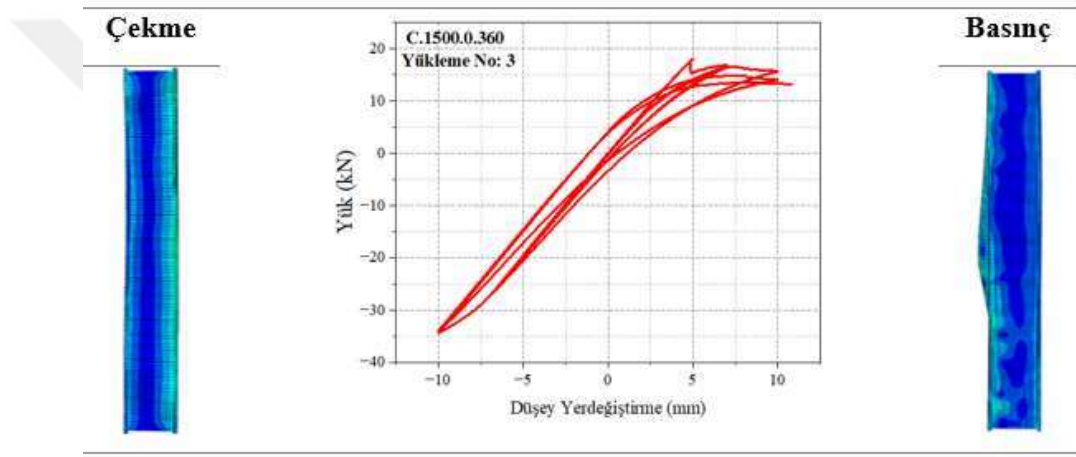
Şekil 89. C.1500.0.0 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.0.0 kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri Şekil 89'da görülmektedir. Şekil 89'da görüldüğü üzere, ilk burkulmalar gövdede yerel burkulma şeklinde oluşmuş ve yükleme ilerledikçe flanşların açılmasıyla çarpılmalı burkulma oluşur. Bu burkulmalar nedeniyle, elemanın basınç yüklemesi sırasında rijitliği azalırken çekme yüklemesi sırasında taşıma kapasitesi artmaktadır. Elemanın basınç yüklemesine ait taşıma kapasitesi 60.67 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 240.36 kN'dir.



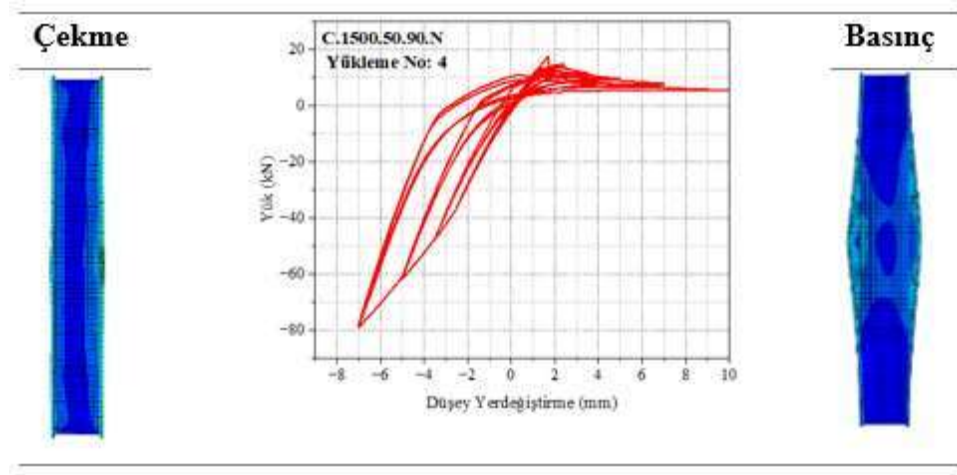
Şekil 90. C.1500.0.180 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.0.180 kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri, ve burkulma şekilleri Şekil 90'da görülmektedir. Şekil 90'da görüldüğü üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemesi sırasında flanşların dışa doğru açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde oluşmuştur. Çekme yüklemesi durumunda ise flanşlar içe eğilmiştir. Hem çekme hem de basınç yüklemeleri sırasında gövdede genel bir burkulma görülmüştür. Bu burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanın rijitliği azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesine ait taşıma kapasitesi 26.89 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 68.97 kN'dir.



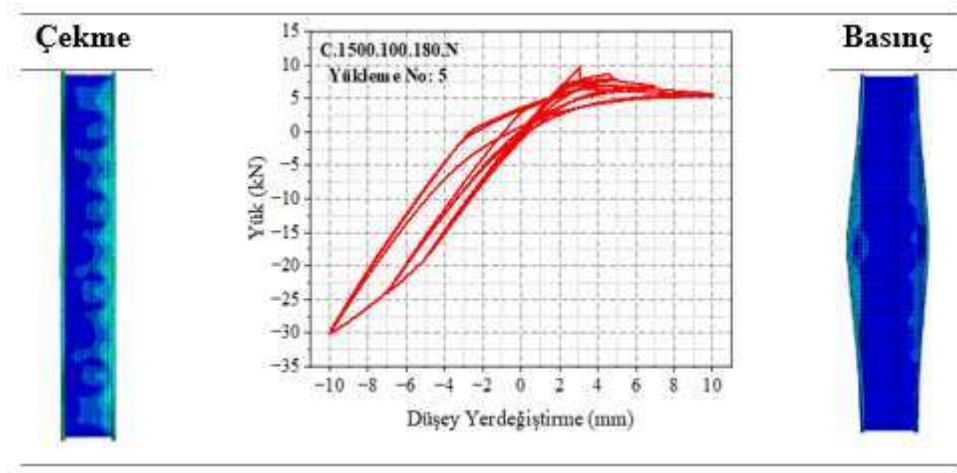
Şekil 91. C.1500.0.360 analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildegıştirmiş hali

C.1500.0.360 kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri Şekil 91'de görülmektedir. Şekil 91'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemesi sırasında gövdede genel bir burkulma şeklinde ve yüklemenin yapıldığı noktaya yakın olan flanşın açılıp dönmesi şeklinde oluşmuştur. Çekme yüklemeleri esnasında ise burkulmalar, yüklemenin yapıldığı noktaya yakın flanşın içe doğru dönmesi şeklinde gerçekleşmiştir. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ait taşıma kapasitesi 18.067 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 34.349 kN'dir.



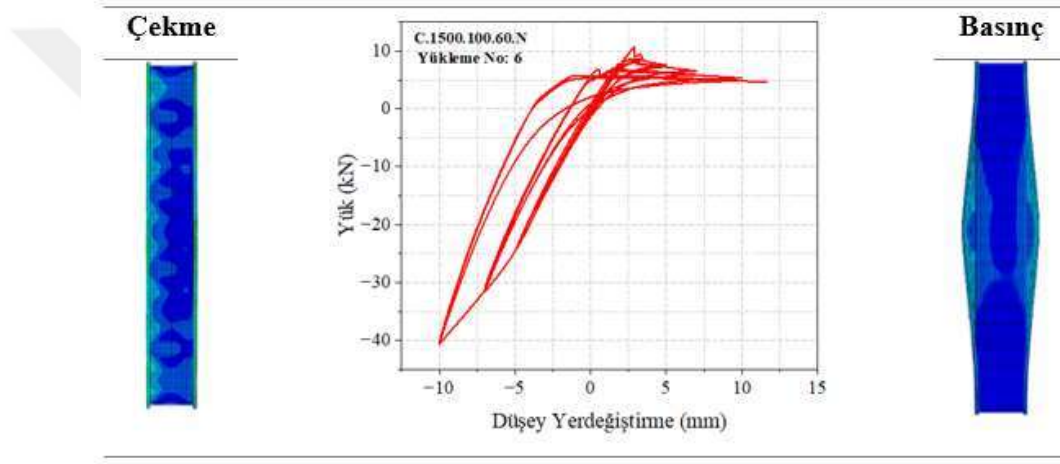
Şekil 92. C.1500.50.90.N analizine ait yük-düsey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

C.1500.50.90.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düsey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri Şekil 92'de görülmektedir. Şekil 92'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemeleri sırasında yüklemenin yapıldığı noktaya yakın noktadaki flanşın açılarak dudağın yerel burkulması ve uzak flanşın dışa dönmesi sonucunda çarpımalı burkulma oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesine ait taşıma kapasitesi 17.40 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 79.12 kN'dir



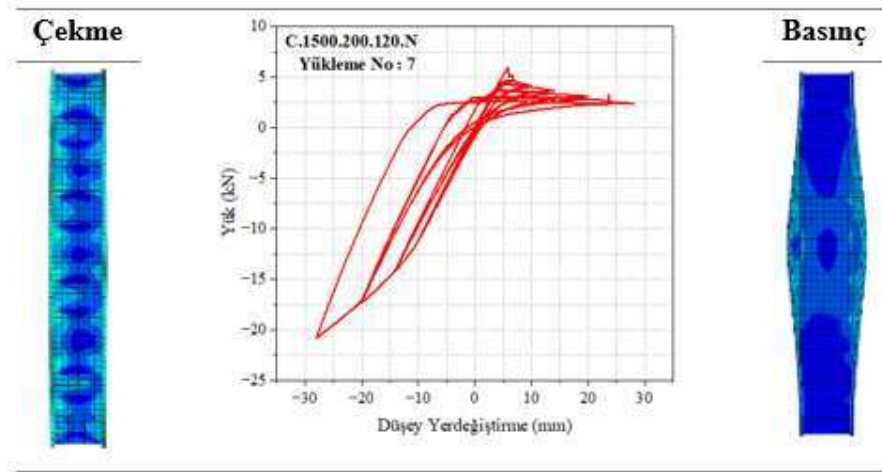
Şekil 93. C.1500.100.180.N analizine ait yük-düsey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

C.1500.100.180.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri şekil 93'te görölmektedir. şekil 93'te gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemeleri sırasında gövdenin genel burkulma ve flanşların dışa açılması ile çarpılmalı burkulma şeklinde oluşurken, çekme yüklemeleri sırasında ise gövdede genel bir burkulma şeklinde oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 9.60 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 30.19 kN'dir.



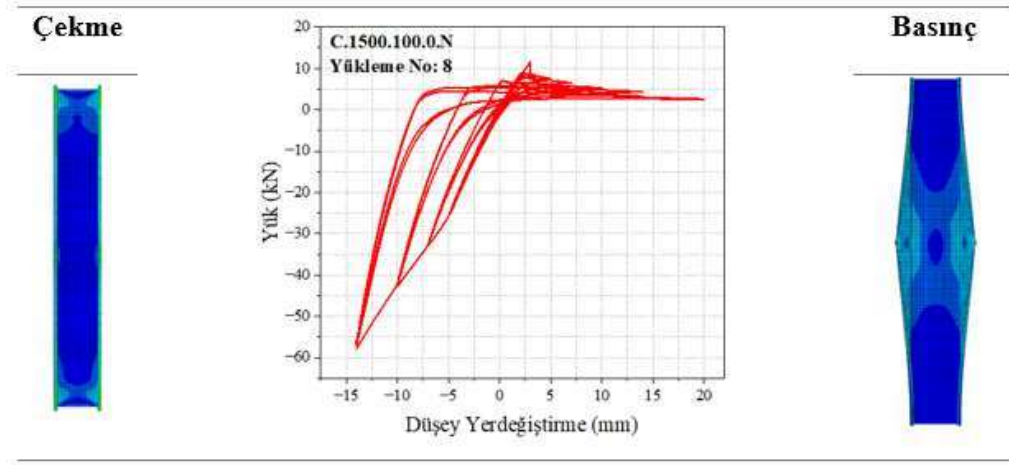
şekil 94. C.1500.100.60.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.100.60.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri şekil 94'te görölmektedir. şekil 94'te gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemeleri sırasında gövdede genel burkulma ve flanşların dışa açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde oluşurken, çekme yüklemeleri sırasında ise gövdede genel burkulma şeklinde oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 10.74 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 40.63 kN'dir.



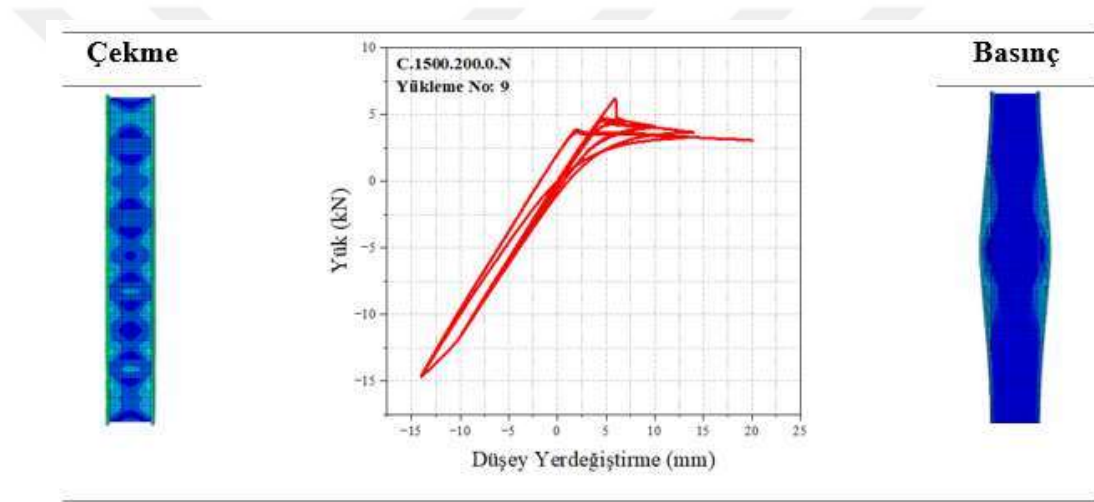
Şekil 95. C.1500.200.120.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

C.1500.200.120.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri Şekil 95'te görülmektedir. Şekil 95'te gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemesinde gövdede genel burkulma ve flanşların dışa açılmasıyla çarpımalı burkulma oluşurken çekme yüklemesinde, yüklemeye yakın flanşın içe dönmesiyle çarpımalı şeklinde oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalırken çekme yüklemesi sırasında elemanın taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 5.90 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük 20.79 kN'dir.



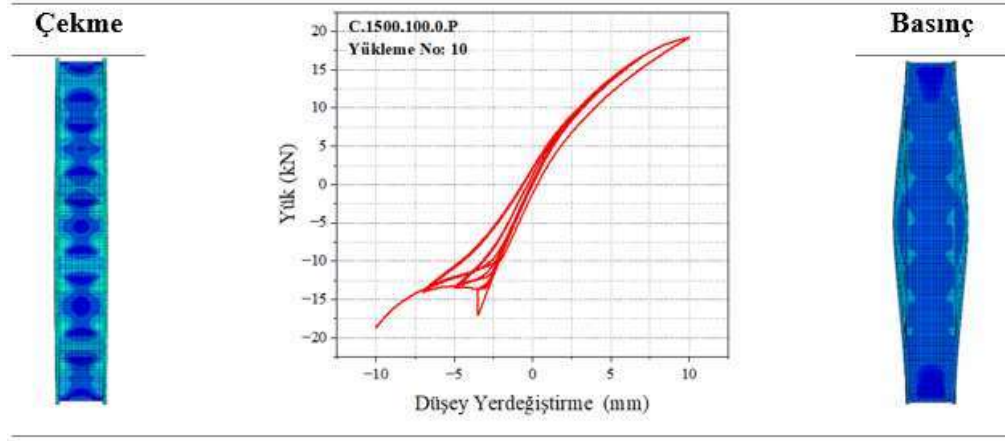
Şekil 96. C.1500.100.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeği hali

C.1500.100.0.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve burkulma şekilleri şekil 96'da görölmektedir. şekil 96'da gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar gövdede genel burkulma şeklinde ve flanşların dışa açılmasıyla birlikte dudakların çarpılmalı burkulması şeklinde oluşmuştur. Çekme yüklemesi sırasında, basınç yüklemesindeki burkulmaya ters yönde genel burkulma gerçekteşmiştir. Burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanın rijitliği azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 11.37 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 57.96 kN'dir.



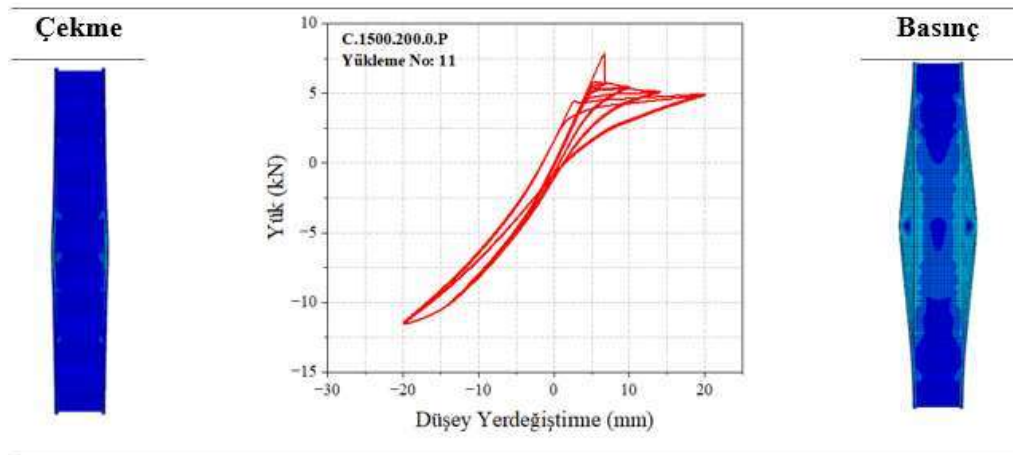
şekil 97. C.1500.200.0.N analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.200.0.N kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirme değerleri ve ulaşılan burkulma şekilleri şekil 97'de görölmektedir. şekil 97'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar gövdede genel burkulma şeklinde ve flanşların dışa açılmasıyla birlikte dudakların çarpılmalı burkulması şeklinde oluşmuştur. Çekme yüklemesi esnasında basınç yüklemesindeki burkulmaya ters yönde genel burkulma oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanın rijitliği azalmış, çekme yüklemesi sırasında ise taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde taşıma kapasitesi 6.199 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 14.68 kN'dir.



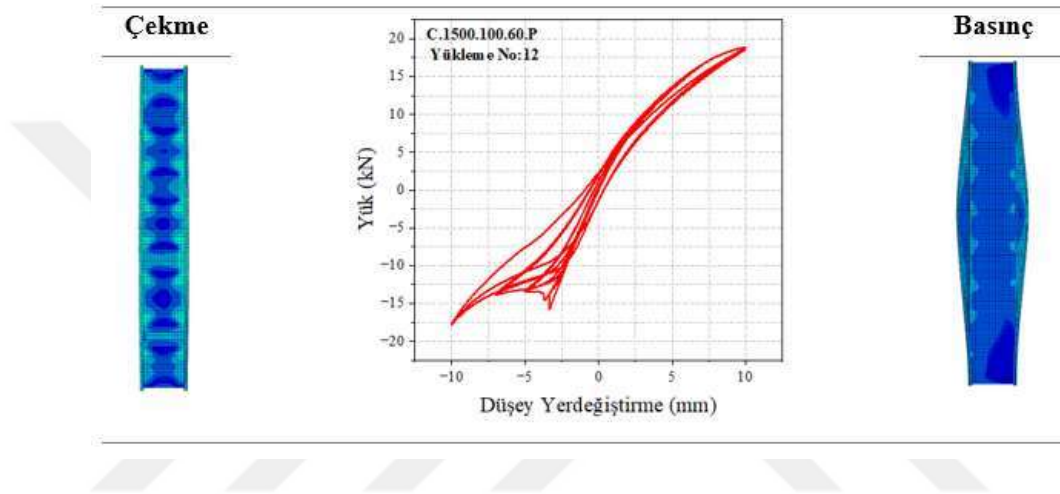
Şekil 98. C.1500.100.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

C.1500.100.0.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri ve burkulma şekilleri Şekil 98'de görülmektedir. Şekil 98'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemeleri sırasında flanşların açılmasıyla çarpımalı burkulma şeklinde olurken, çekme yüklemeleri sırasında flanşlar içe dönerek burkulmuştur. Burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik artarken, çekme yüklemeleri sırasında rijitlik azalmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 19.01 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 18.74 kN'dir.



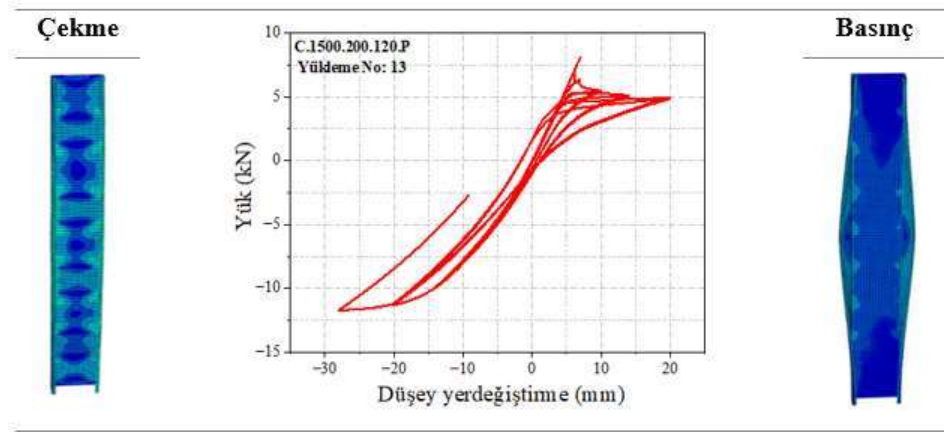
Şekil 99. C.1500.200.0.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirilmiş hali

C.1500.200.0.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri ve burkulma şekilleri Şekil 99'da görölmektedir. Şekil 99'da gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar flanşların dışa açılmasıyla çarpılmalı burkulma şeklinde ve gövdede genel burkulma şeklinde oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanın rijitliği azalırken, çekme yüklemesi sırasında elemanın taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 7.86 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 11.94 kN'dir.



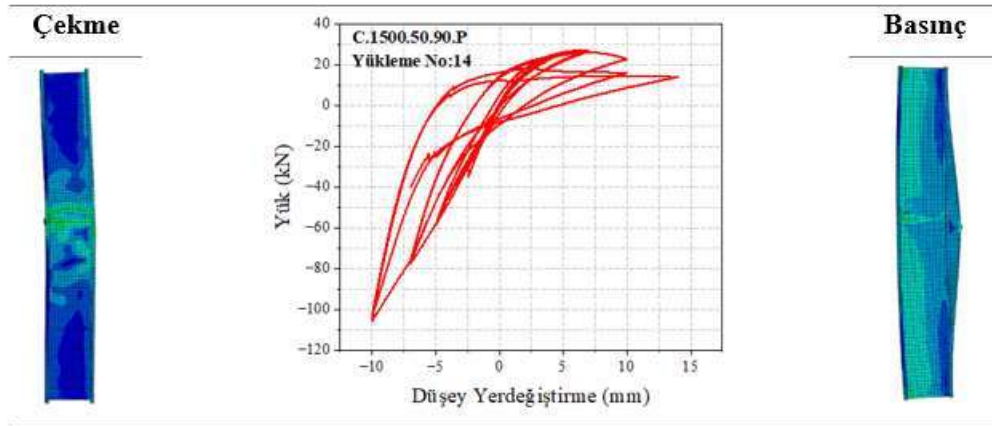
Şekil 100. C.1500.100.60.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.100.60.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri ve ulaşılan burkulma şekilleri Şekil 100'de görölmektedir. Şekil 100'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemelerinde flanşların dışa açılması ile çarpılmalı burkulma şeklinde olurken, çekme yüklemelerinde ise flanşlar içe dönerek burkulmuştur. Burkulmalar nedeniyle, basınç yüklemesi sırasında elemanda artış olmuşken, çekme yüklemesi sırasında rijitlik azalmıştır. Elemanın basınç yüklemesine ait taşıma kapasitesi 34.35 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 18.07 kN'dir.



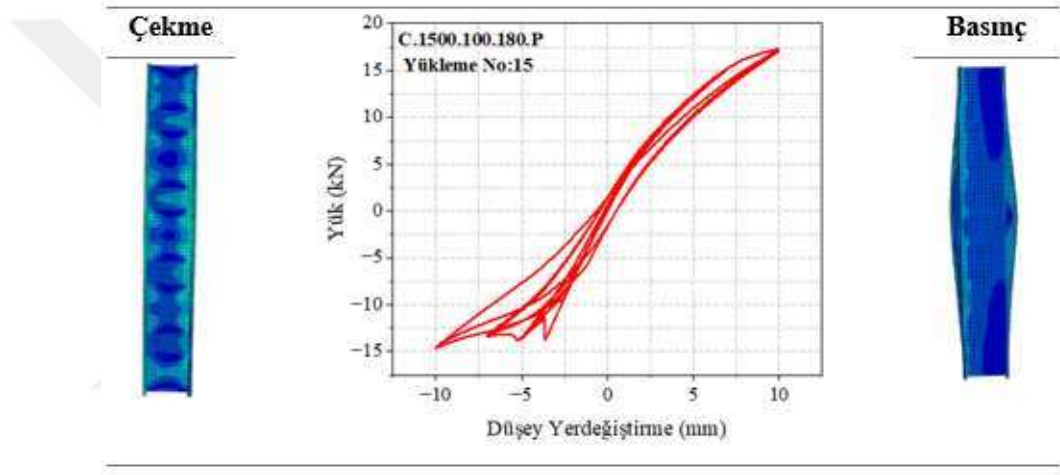
Şekil 101. C.1500.200.120.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.200.120.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrisi, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri ve ulaşılan burkulma şekilleri Şekil 101'de görülmektedir. Şekil 101'de gözlemlendiği üzere, ilk burkulmalar basınç yüklemeleri sırasında gövdede genel burkulma ve flanşların dışa açılmasıyla çarpımalı burkulma şeklinde oluşurken, çekme yüklemeleri sırasında gövdede genel burkulma şeklinde oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle, çekme yüklemesi sırasında elemanda artış olmuşken, basınç yüklemelerinde rijitlik azalmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 8.11 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük değeri 11.72 kN'dir.



Şekil 102. C.1500.50.90.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.50.90.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri , en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri, ve ulaşılan burkulma şekilleri şekil 102’de görölmektedir. şekil 102’de gözlemlendiği üzere, basınç ve çekme yüklemelerinde gövdede genel ve yerel burkulmalar gerçekteşmiştir. Basınç yüklemesi durumunda yükleme noktasına uzak flanş dışa dönerek burkulmuş, çekmede ise yakın flanşta ve dudakta yerel burkulmalar oluşmuştur. Burkulmalar nedeniyle basınç yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalırken çekme yüklemesi sırasında elemanın taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 27.43 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük 105.818 kN’dur.



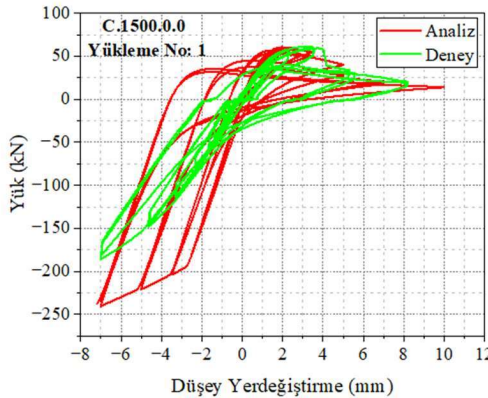
şekil 103. C.1500.100.180.P analizine ait yük-düşey yerdeğiştirme grafiği ve analiz sonunda elemanın şekildeğiştirmiş hali

C.1500.100.180.P kodlu sonlu elemanına ait yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri, en büyük çekme ve basınç yerdeğiştirmeleri, ve ulaşılan burkulma şekilleri şekil 103’de görölmektedir. şekil 103’de gözlemlendiği üzere, basınç ve çekme yüklemelerinde gövdede genel burkulma, flanşlarda ise basınç yüklemesinde dışa açılarak çarpılmalı burkulma gerçekteşmiştir. Burkulmalar nedeniyle çekme yüklemesi sırasında elemanda rijitlik azalırken, basınç yüklemesi sırasında elemanın taşıma kapasitesi artmıştır. Elemanın basınç yüklemesinde ulaşılan taşıma kapasitesi 17.279 kN, çekme yüklemesinde ise ulaşılan yük 14.623 kN’dur.

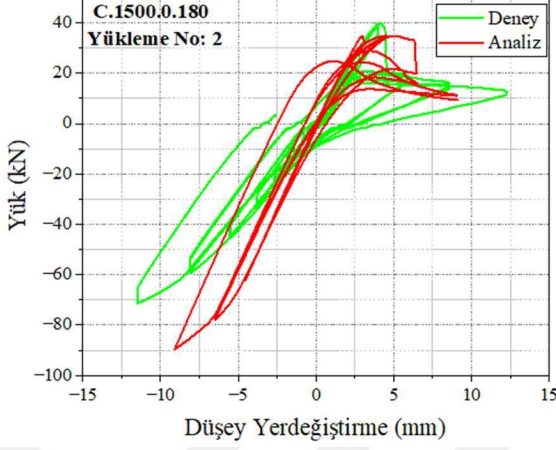
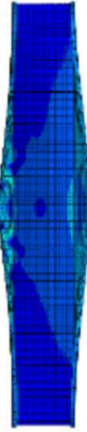
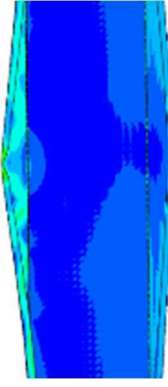
3.5.1. Çevrimsel Yükleme Etkisindeki Elemanların Deney ve Sonlu Eleman Analizlerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deney ve sonlu eleman analizlerine ait çevrimsel yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri ve yük taşıma kapasiteleri Tablo 22–Tablo 3'te verilmiştir. Sonlu eleman analizi sonucunda elemanlara ait genel burkulma şekilleri Tablo 3.34'te verilmiştir. Sonlu eleman analizlerinden alınan değerler, deneyde gövdeye yapıştırılan LPDT'lerden okunan değerlerle büyük oranda benzerdir. Şekil 3.36'da deneysel çalışmadan elde edilen burkulma şekilleri ile Tablo 3.34'te verilen sonlu eleman analizden elde edilen burkulma şekilleri ile büyük oranda benzerlik göstermiştir.

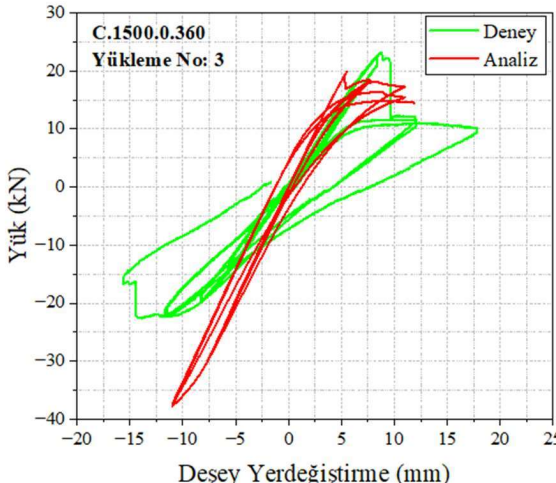
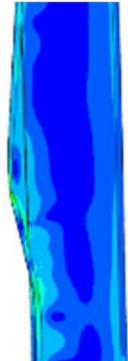
Tablo 22. C.1500.0.0 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz			
					
C.1500.0.0		Deney	Analiz	Analiz / Deney	
Yük(kN)	Basınç	60.73	60.67	0.999	
	Çekme	-185.61	-240.36	1.123	

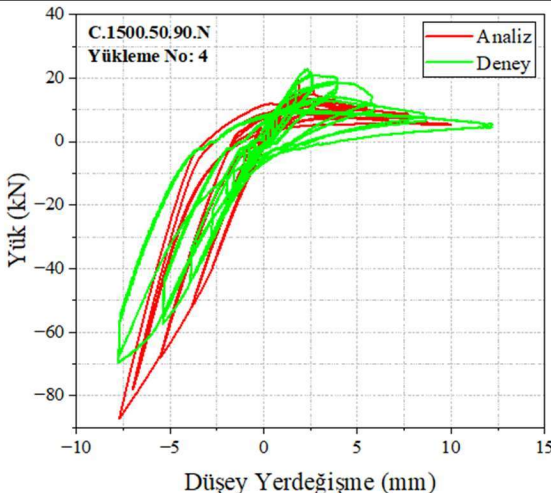
Tablo 23. C.1500.0.180 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			Genel  Bölgesel 
C.1500.0.180		Deney	Analiz
Yük(kN)	Basınç	39.845	26.886
	Çekme	-71.404	-68.967
		Analiz / Deney	
			0.677
			0.966

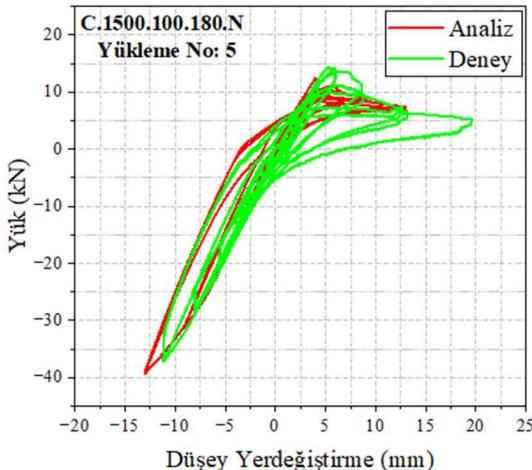
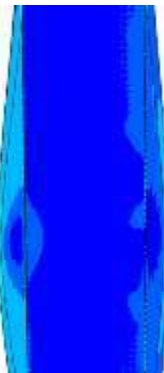
Tablo 24. C.1500.0.360 elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
				
		 		
C.1500.0.360		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	23.221	18.067	0.778
	Çekme	-22.629	-34.349	1.516

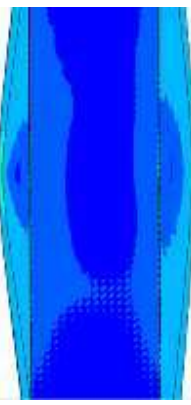
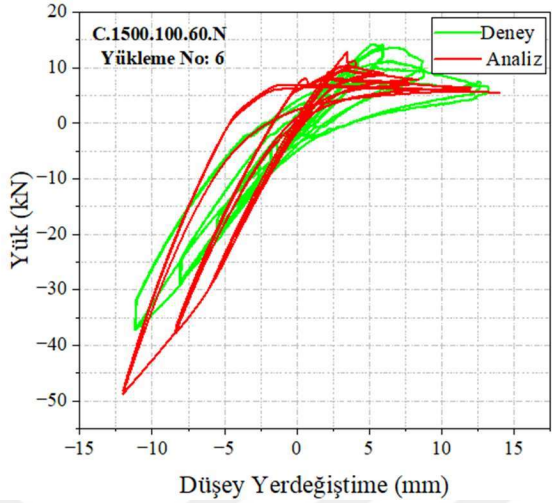
Tablo 25. C.1500.50.90.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
C.1500.50.90.N		Analiz / Deney		
Yük(kN)	Basınç	22.838	17.404	0.762
	Çekme	-69.576	-79.119	1.137

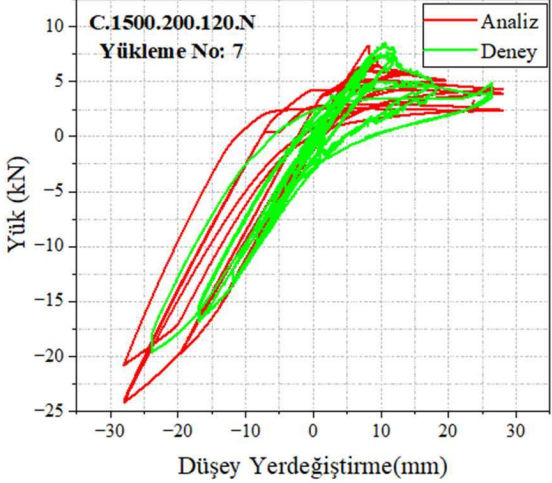
Tablo 26. C.1500.100.180.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			 
C.1500.100.180.N		Deney	Analiz
Yük(kN)	Basınç	14.274	9.599
	Çekme	-37.234	-30.189

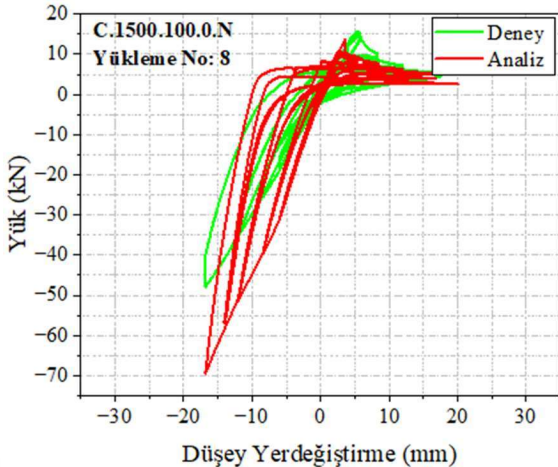
Tablo 27. C.1500.100.60.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
				
C.1500.100.60.N		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	14.135	10.7397	0.760
	Çekme	-37.238	-40.6278	1.091

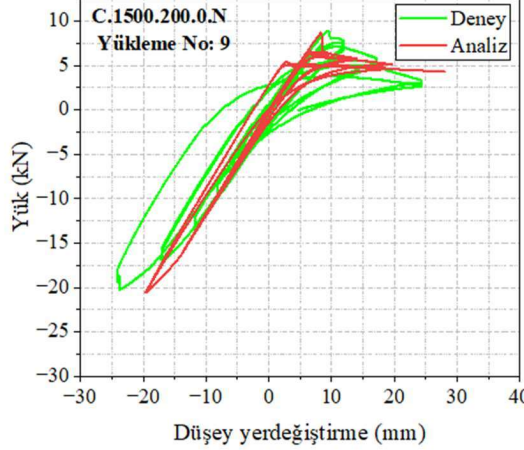
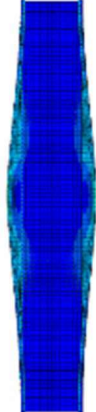
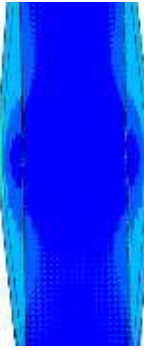
Tablo 28. C.1500.200.120.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
				
C.1500.200.120.N		Analiz / Deney		
Yük(kN)	Basınç	8.512	5.899	0.693
	Çekme	-19.635	-20.787	1.009

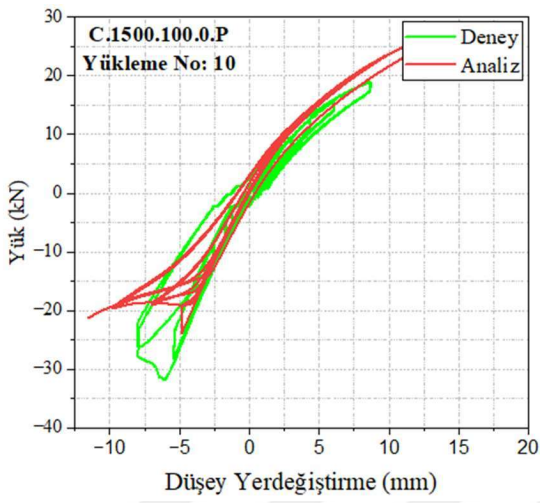
Tablo 29. C.1500.100.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
C.1500.100.0.N		Deney	Analiz
Yük(kN)	Basınç	15.597	11.371
	Çekme	-47.904	-57.955

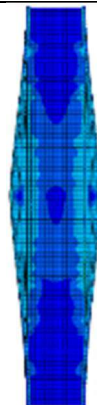
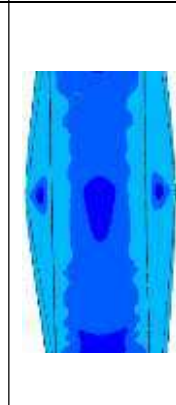
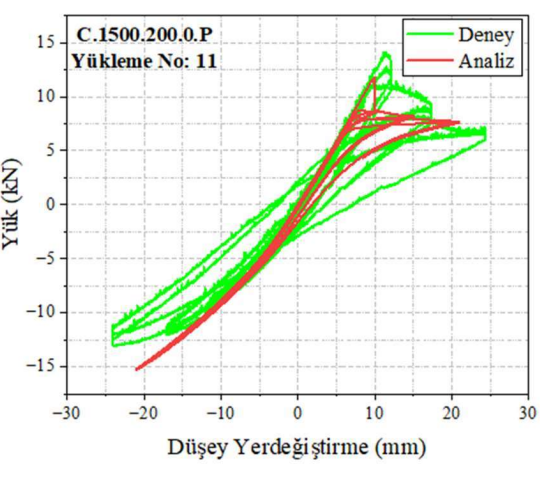
Tablo 30. C.1500.200.0.N elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz			
					
		Genel	Bölgesel		
C.1500.200.0.N		Deney	Analiz	Analiz / Deney	
Yük(kN)	Basınç	8.895	6.199	0.697	
	Çekme	-20.227	-14.682	0.725	

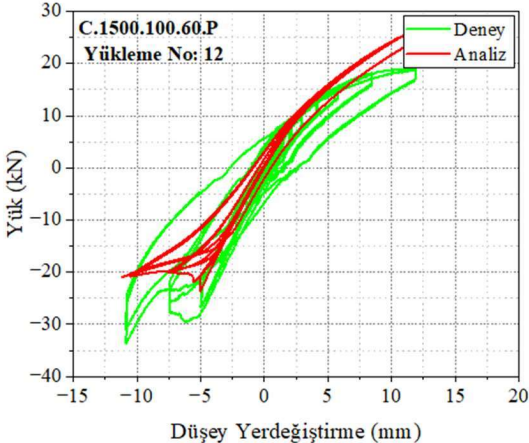
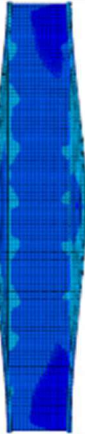
Tablo 31. C.1500.100.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz	
			
C.1500.100.0.P		Deney	Analiz
Yük(kN)	Basınç	19.182	19.008
	Çekme	-31.733	-18.743
		Analiz / Deney	
		0.991	
		0.590	

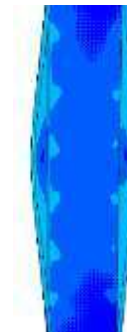
Tablo 32. C.1500.200.0.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
				
C.1500.200.0.P		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	14.065	7.862	0.559
	Çekme	-13.09	-11.944	0.912

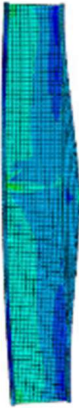
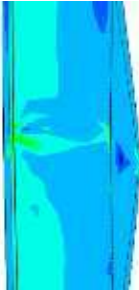
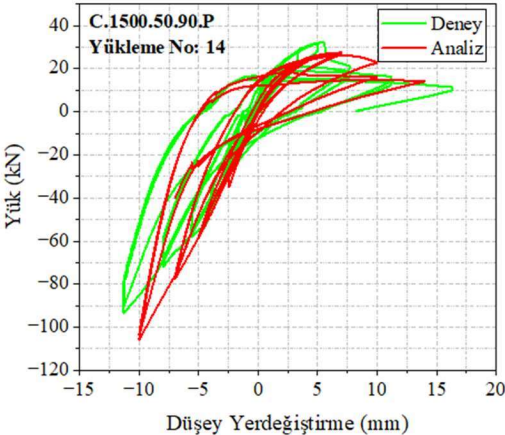
Tablo 33. C.1500.100.60.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz			
					
C.1500.100.60.P		Deney	Analiz	Analiz / Deney	
Yük(kN)	Basınç	18.991	18.877	0.994	
	Çekme	-33.613	-17.772	0.529	

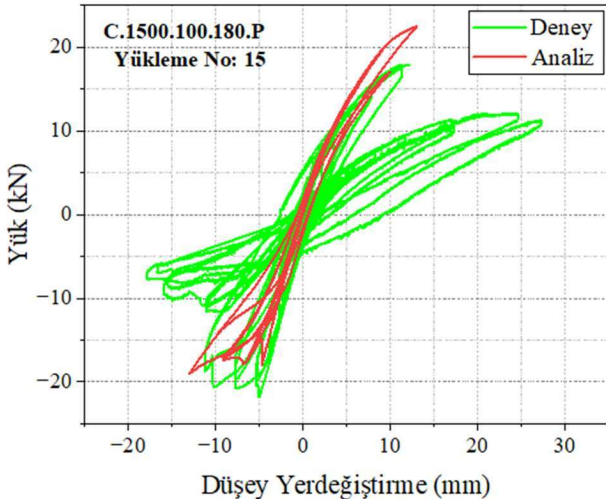
Tablo 34. C.1500.200.120.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
C.1500.200.120.P		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	11.667	8.108	0.695
	Çekme	-12.098	-11.724	0.969

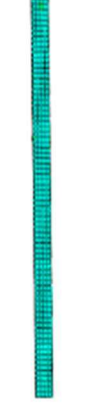
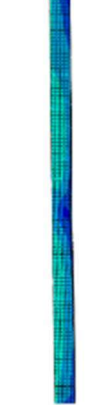
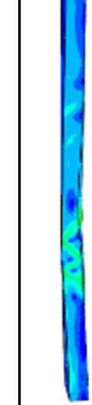
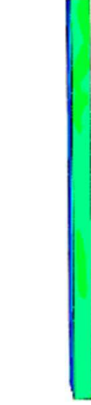
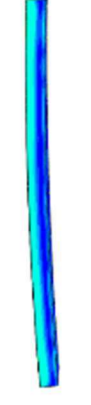
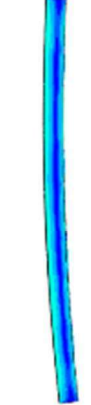
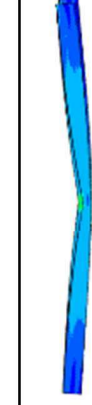
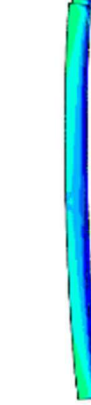
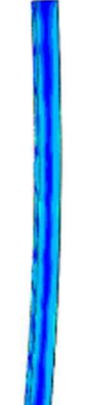
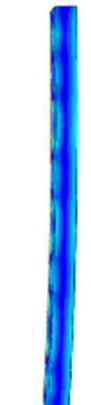
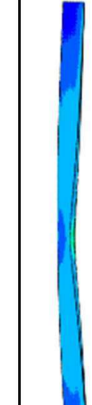
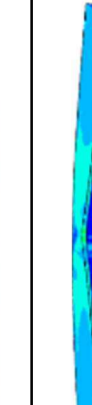
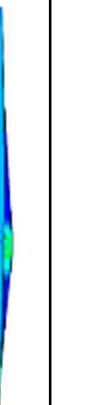
Tablo 35. C.1500.50.90.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
				
C.1500.50.90.P		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	32.203	27.437	0.852
	Çekme	-93.284	-105.818	1.134

Tablo 36. C.1500.100.180.P elemanına ait deney ve analiz sonuçlarının yük ve tüketilen enerji bakımından karşılaştırılması

Deney		Analiz		
		Genel	Bölgesel	
				
				
C.1500.100.180.P		Deney	Analiz	Analiz / Deney
Yük(kN)	Basınç	17.912	17.279	0.965
	Çekme	-21.811	-14.623	0.670

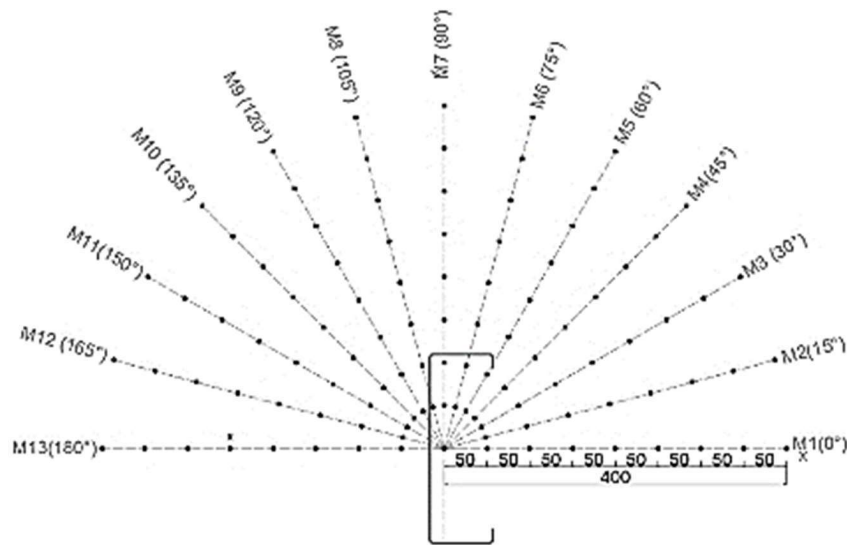
Tablo 37. Sonlu eleman modelinin farklı eksantrisitelerde tersinir-tekrarlı yükleme durumundaki genel burkulma şekilleri

C.1500.0.0		C.1500.0.180		C.1500.0.360		C.1500.50.90.N		C.1500.100.180.N	
Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme
									
C.1500.100.60.N		C.1500.200.120.N		C.1500.100.0.N		C.1500.200.0.N		C.1500.100.0.P	
Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme
									
C.1500.200.0.P		C.1500.100.60.P		C.1500.200.120.P		C.1500.50.90.P		C.1500.100.180.P	
Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme
									

3.6. Parametrik Çalışma

3.6.1. Parametrik Çalışmanın Kapsamı

Eksantrik yüklü hafif çelik dudaklı kanal profillerin aksel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmesi etkilerinin birlikte bulunduğu yükleme durumları altındaki burkulma davranışını incelemek için 1500 mm uzunluğundaki elemanlar üzerinde 15 adet monotonik ve 15 adet tersinir-tekrarlı yükleme olmak üzere toplamda 30 adet deney yapılmıştır. Bu bölümde, deney elemanları ile aynı enkesit uzunluklarına ve 3 farklı uzunluğa sahip (500 mm, 1000 mm ve 1500 mm) hafif çelik dudaklı kanal elemanlar kullanılarak, deneysel çalışmadaki 15 adet yükleme noktası yerine bu defa 105 farklı yükleme noktası kullanılarak geniş kapsamlı bir parametrik çalışma sunulmaktadır (Şekil 104). Parametrik çalışma kapsamında kullanılan sonlu eleman modeline ait yükleme koşulları ve yükleme noktaları aşağıdaki Tablo 38’de görülmektedir. Parametrik çalışmada, elemanın üzerine uygulanan yüklemeler, aksel yük, kuvvetli ve zayıf eksen eğilmesi etkilerini içermektedir. Bu sayede elemanlar, farklı yüklemeler altında farklı yatay ve düşey eğilmelere maruz bırakılarak davranışları daha kapsamlı bir şekilde analiz edilebilecektir. Elde edilecek sonuçlar, deneysel çalışmanın yanı sıra sonlu eleman modellerinin analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak, hafif çelik dudaklı kanal profillerin farklı boyutlardaki ve yükleme koşullarındaki performansı hakkında detaylı bilgiler sağlayacaktır.



Şekil 104. Parametrik çalışmadaki yükleme noktaları

Tablo 38. Parametrik çalışmada için belirlenen yükleme noktaları ve koordinatları

Doğrultu	Açı	Eksantrisite	Koordinat (mm)							
M0	Eksenel Yükleme									
M1	0	e _x	25	50	75	100	125	150	175	180
		e _y	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	5°	e _x	24.15	48.30	72.44	96.59	120.74	144.89	169.04	193.19
		e _y	6.47	2.94	9.41	5.88	32.35	38.82	45.29	51.76
M3	30°	e _x	1.65	3.30	4.95	6.60	108.25	129.90	151.55	173.21
		e _y	12.5	25	7.5	0	62.5	75	87.50	100
M4	45°	e _x	17.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
		e _y	7.68	35.36	53.03	70.71	88.39	106.07	123.74	141.42
M5	60°	e _x	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.50	100
		e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
M6	75°	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	90°	e _x	0	0	0	0	0	0	0	0
		e _y	25	50	75	100	125	150	175	180
M8	105°	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
M9	120°	e _x	-12.5	-25	-37.5	-50	-62.5	-75	-87.50	-100
		e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
M10	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
M11	150°	e _x	-6.47	-12.94	-19.41	-25.88	-32.35	-38.82	-45.29	-51.76
		e _y	21.65	43.30	64.95	86.60	108.25	129.90	151.55	173.21
M12	165°	e _x	-24.15	-48.30	-72.44	-96.59	-120.74	-144.89	-169.04	-193.19
		e _y	6.47	22.94	19.41	25.88	32.35	38.82	45.29	51.76
M13	180°	e _x	-25	-50	-75	-100	-125	-150	-175	-180
		e _y	0	0	0	0	0	0	0	0

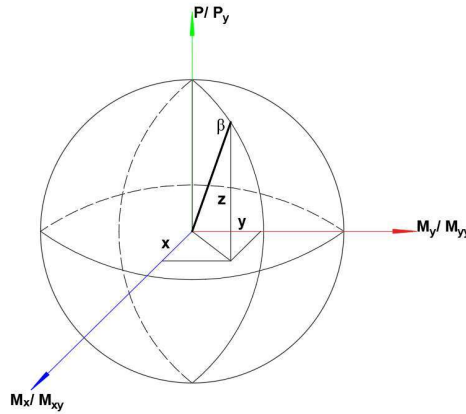
M500, M1000 ve M1500 olmak üzere üç farklı sonlu eleman modeli eksenel yükleme (M0) altında, M1'den M13'e kadar farklı yükler ise birleşik eksenel yük ve eğilme momenti

etkisinde kalacak şekilde monotonik olarak yüklenmiştir. Yük-yerdeğiştirme eğrileri, M ile belirtilen monotonik yüklemeyi, 500 ise eleman boyutunu (500 mm), M1 ise yükleme doğrultusunu ve 0-8 ise ağırlık merkezinden dışa doğru sıralanan yükleme nokta numarasını ifade etmektedir.

Sonlu eleman modeli kullanılarak yapılan analizlerde, malzeme özellikleri daha önceki bölümlerde anlatılan sonlu eleman modeliyle aynıdır. Analiz sonuçlarından elde edilen yük taşıma kapasiteleri, CUFSM yazılımıyla hesaplanan kesiti plastik akma noktasına ulaştıran eksenel yük (P_y), kuvvetli (M_{xy}) ve zayıf eksen (M_{yy}) eğilmelerine göre normalleştirilmiştir. Daha sonra, normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri aşağıdaki 1 nolu bağıntı kullanılarak karekökleri alınarak üç boyutlu uzayda bir β noktası elde edilir:

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{P}{P_y}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{yy}}\right)^2} \quad (1)$$

Her bir analiz sonucunda elde edilen β noktaları birleştirilerek hafif çelik dudaklı kanal profillerin dayanım uzayı oluşturulmuştur. (Şekil 105)



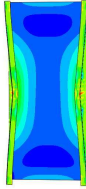
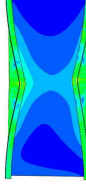
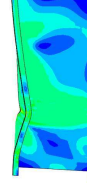
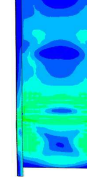
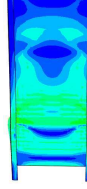
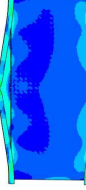
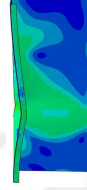
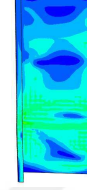
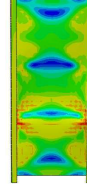
Şekil 105. Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre β_{FEM} 'in hesaplanma yöntemi

3.6.2. Parametrik Çalışma Sonuçları

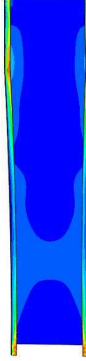
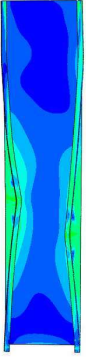
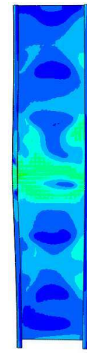
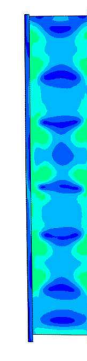
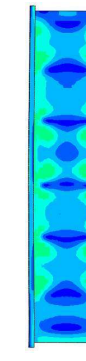
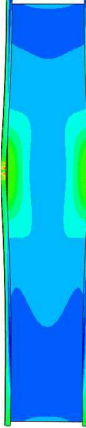
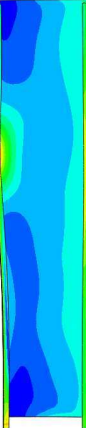
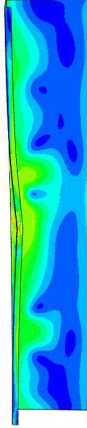
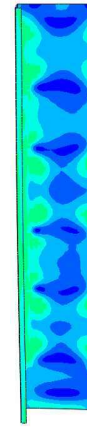
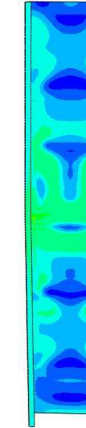
Tablo 38’de verilen eksantrisitelere göre yapılan monotonik yüklemeler etkisindeki sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri, M1-M13 doğrultularındaki tüm yükleme noktaları oluşturulmuştur. 500,1000 ve 1500 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultusundaki yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 106, Şekil 107 ve Şekil 108’de verilmiştir. Şekil 106, Şekil 107 ve Şekil 108’den açıkça görüldüğü üzere, eksantrisitenin artmasıyla birlikte tüm elemanlarda sünekliğin arttığı ve kırışe yakınsayan bir davranışın ortaya çıktığı gözlenmiştir. Ancak, 1000 mm boyundaki elemanlara ait eğrilerin incelenmesi, 500 mm boyundaki profillere göre farklı bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu durumda, 1000 mm boyundaki elemanlarda sünekliğin artışının 500 mm boyundakilere kıyasla daha az olduğu görülmüştür. Benzer şekilde 1500 mm boyundaki elemanlarda ait eğrilerin incelenmesi, 500 mm ve 1000 mm boyundakilerden farklı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durumda, 1500 mm boyundaki elemanlarda sünekliğin artışının 500 mm ve 1000 mm boyundakilere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Parametrik çalışma sonuçlarına göre, eksantrisitedeki küçük artışlar dahi eksenel yük taşıma kapasitesinde önemli düşümlere neden olmaktadır. Eksantrisite 180° ve 90° den 0° ’ye gittikçe eksenel yük taşıma kapasitesi ile eksantrik yük altındaki taşıma kapasitelerin arasındaki fark azalmaktadır. Başka bir deyişle, eksantrik yükleme kuvvetli eksen eğilmesine yaklaştıkça bu fark azalmaktadır. 500,1000 ve 1500 mm boyundaki elemanlar, taşıma kapasitesi bakımından tüm doğrultuların ortalaması alıp karşılaştırıldığında, 500 mm boyundaki elemanların ortalama taşıma kapasiteleri 1000 mm boyundaki elemanların 1.12 katı, 1500 mm boyundaki elemanların ise 1.32 katıdır. 500, 1000 ve 1500 mm boyundaki elemanlarda dudakların çekme veya basınç gerilmeleri etkisinde olması davranışlarında farklılık göstermiştir. 500,1000 ve 1500 mm boyundaki elemanların dudaklarının çekme gerilmeleri etkisinde olanlarda en küçük eksantrisite ile en yüksek eksantrisitedeki elemanlar arasında taşıma kapasitesi bakımından ortalama 3.84 olurken dudaklarının basınç gerilmeleri etkisinde olanlarda bu fark 5.33’tür. Tüm boylarda eksantrisitenin artması başlangıç rijitliğini azalmaktadır. Eksantrisite değerleri arttıkça 500, 1000 ve 1500 mm boyundaki elemanların başlangıç rijitlikleri arasındaki fark artmaktadır. Sonlu eleman analiz sonuçlarında elde edilen toplam enerji tüketme miktarlarının toplam yerdeğiştirmeye göre değişiminin incelendiği eğrilere göre genel olarak eleman boyu arttıkça her yükleme doğrultusunda enerji sönümleme miktarı azalmıştır. Ancak bazı

durumlarda 1000 mm ve 1500 mm'lik elemanların enerji tüketme kapasiteleri birbirine çok yakın olmuştur. P ve N elemanlarının enerji sönümleme davranışları birbirine benzer olmuştur. Bu benzer enerji sönümleme davranışı nedeniyle dudaklı kanal elemanların yapılarda kullanımı göz önüne alındığında, bu elemanların P yükleme durumunda olacakları şekilde konumlandırılmaları hem dayanım hem de enerji sönümleme bakımından faydalı olacaktır. Eleman boyu arttıkça P/P_y oranı azalmaktadır. Boyu 500 mm olan elemanlarda bu değer yaklaşık 0.48, boyu 1000 mm olan elemanlarda 0.44 ve boyu 1500 mm olan elemanlarda 0.34 olmaktadır. Bu da eleman 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. Tablo 39'da verilen 500 mm boyundaki elemanların hepsi yerel burkulmalar ile yük taşıma gücünü yitirmiştir. Flanşların basınç gerilmeleri etkisinde olduğu M1-M6 doğrultularında, elemanlarda ilk burkulmalar flanşların yerel burkulması şeklinde, kuvvetli eksen eğilme etkisinde olan M7 doğrultusundaki elemanlarda yüklemenin yakın olduğu flanşta yerel burkulma şeklinde, flanşların çekme gerilmeleri etkisinde olduğu M8-M13 doğrultularında, gövdenin yerel burkulması şeklinde ortaya çıkmıştır. Tablo 40'ta verilen 1000 mm boyundaki elemanların flanşların basınç gerilmeleri etkisinde olanda ilk burkulmalar flanşların dışa açılarak çarpılmalı burkulması şeklinde oluşurken, flanşların çekme gerilmeleri etkisinde olan elemanlarda ilk burkulmalar gövdede yerel burkulmalar şeklinde olmuştur. Tablo 41'de verilen 1500 mm boyundaki elemanların tümünde ilk burkulmalar genel burkulma ile başlamış yükleme devam ettirildikçe flanşların basınç gerilmeleri etkisinde olan elemanlarda genel burkulmayla birlikte flanşlarda yerel burkulmalar meydana gelirken flanşların çekme gerilmeleri etkisinde olanlarda gövdede yerel burkulmalar oluşmuştur. 500, 1000, 1500 mm boyundaki elemanların toplam 104 yükleme noktadaki yük taşıma kapasiteleri Şekil 109'da verilmiştir. Şekil 109'daki yük taşıma kapasiteleri kullanılarak 1 nolu bağıntı yardımıyla Ek Tablo 1, Ek Tablo 2 ve Ek Tablo 3'teki değerler kullanılarak β değerleri hesaplanıp 500, 1000 ve 1500 mm boylarına ait gerilme uzayları Şekil 110'da çizdirilmiştir. Dayanım uzayına göre eksantrisite arttıkça P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} oranlarındaki değişim azalmıştır.

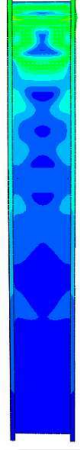
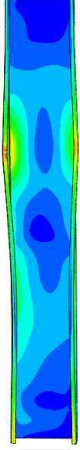
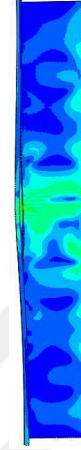
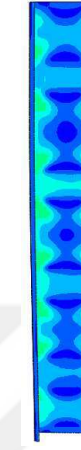
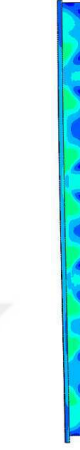
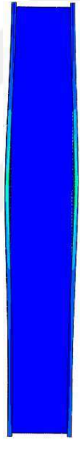
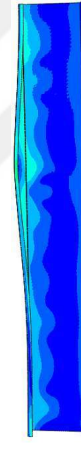
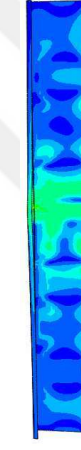
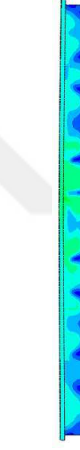
Tablo 39. 500 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri

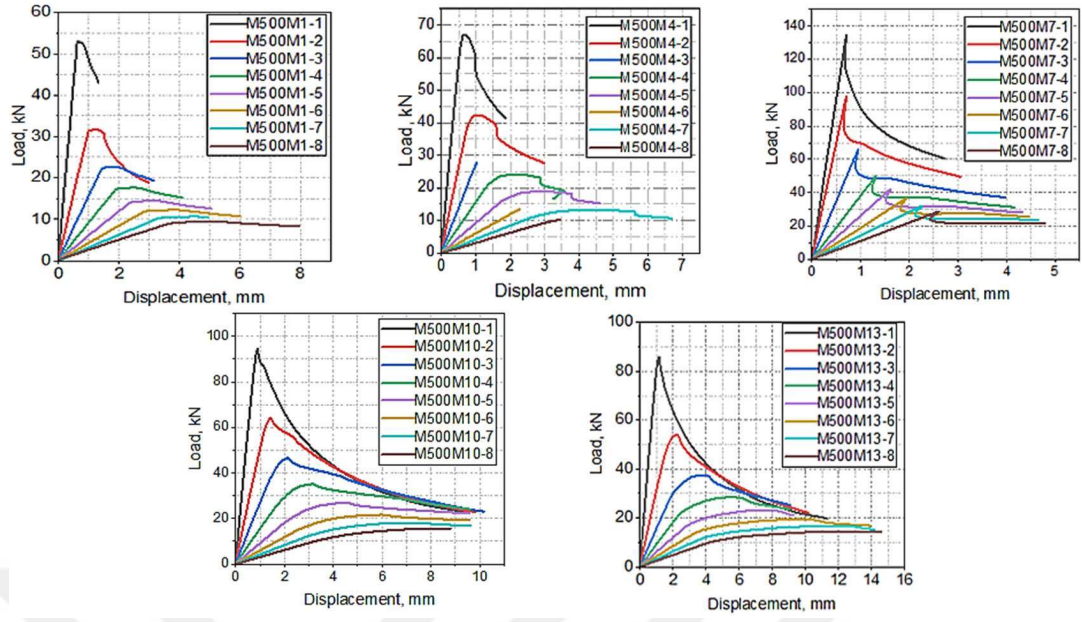
		L=500 mm				
Doğrultu		0°	45°	90°	135°	180°
Eksantrisite	e_{min}					
	e_{max}					

Tablo 40. 1000 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri

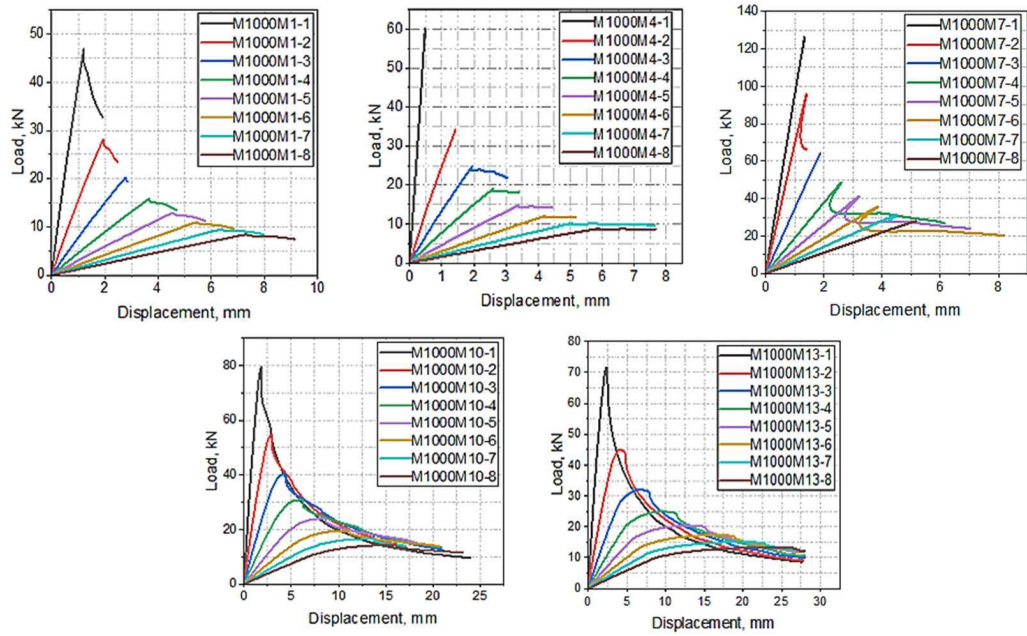
		L=1000 mm				
Doğrultu		0°	45°	90°	135°	180°
Eksantrisite	e_{min}					
	e_{max}					

Tablo 41. 1500 mm'lik dudaklı kanal profillerin eksenel yük altındaki burkulma şekilleri

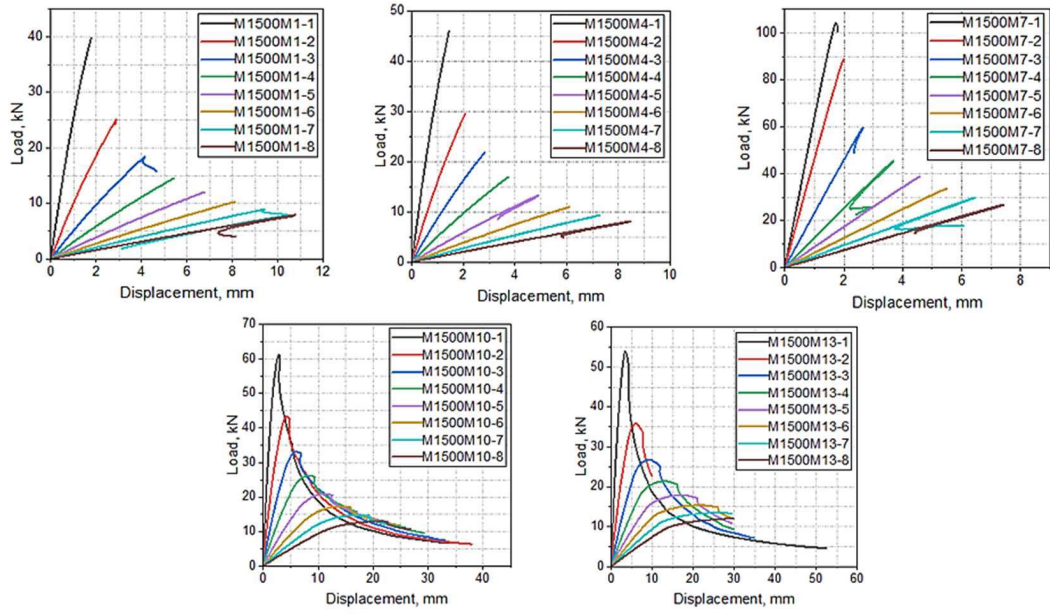
		L=1500 mm					
Doğrultu		0°	45°	90°	135°	180°	
Eksantrisite	e_{min}						
	e_{max}						



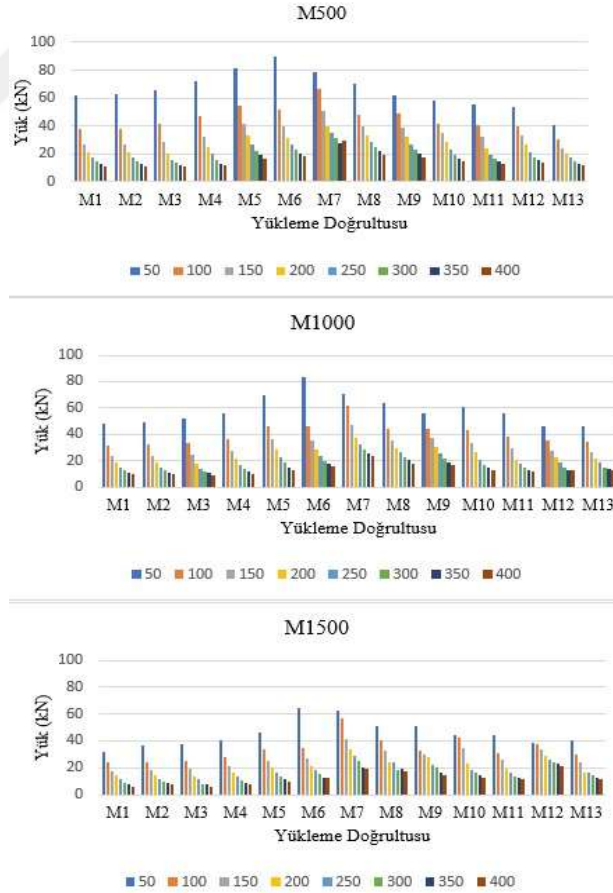
Şekil 106. 500 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 107. 1000 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri

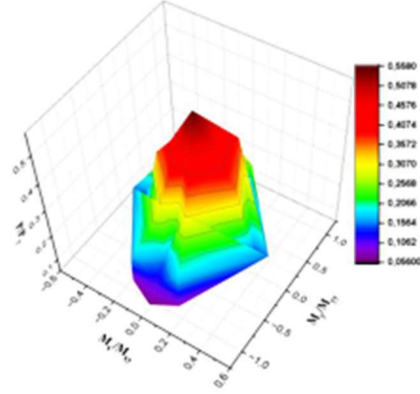


Şekil 108. 1500 mm boyundaki elemanların M1, M4, M7, M10 ve M13 doğrultularındaki yük-yerdeğiştirme eğrileri

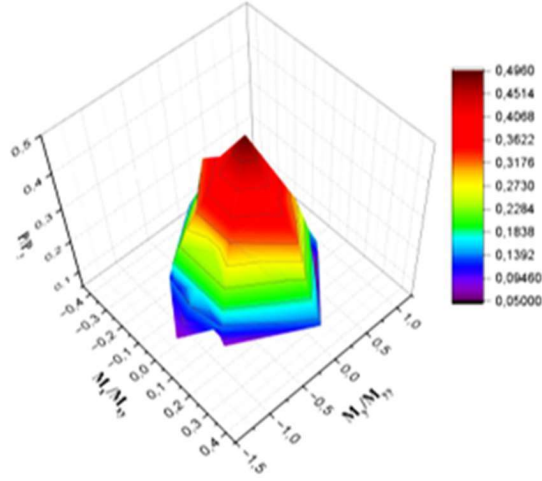


Şekil 109. 500, 1000 ve 1500 mm uzunluğundaki elemanlar için taşıma kapasiteleri

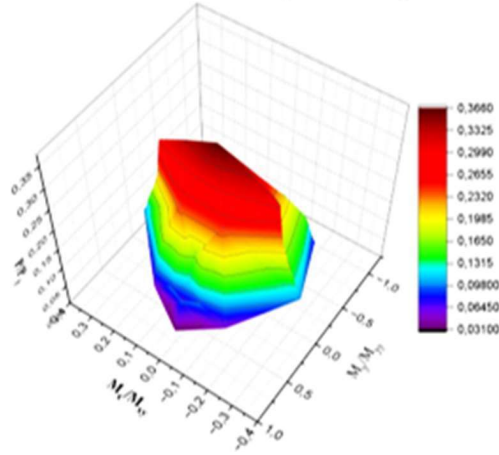
L=500 mm için Dayanım Uzayı



L=1000 mm için Dayanım Uzayı



L=1500 mm için Dayanım Uzayı



Şekil 110. 500, 1000, 1500 mm uzunluğundaki elemanlara ait normalleştirilmiş dayanım uzayları

4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, özellikle sismik etkilerin yoğun olarak yaşandığı bölgelerde hafif çelik kullanımını artırmak için C kesitli hafif çelik profiller üzerinde eksenel yükleme ve iki eksenli eğilme meydana getiren monotonik ve tersinir-tekrarlı eksantrik yüklemeler altında taşıma kapasiteleri, burkulma şekilleri, enerji tüketme gibi davranışsal özellikleri deneysel ve sayısal olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

CUFSM yazılımı kullanılarak C kesit profillerin yerel çarpılmalı ve genel burkulma modlarının gözlemlenebilmesi için genel burkulma moduna ait kritik dalga boynun üç katı olarak 1500 mm profil boyu seçilmiştir. 1500 mm'lik C kesitli profiller üzerine yürütülen deneysel çalışmalarda, 15 adet farklı noktalardan monotonik yüklemeler yapılmış ve yük, düşey yerdeğiştirme, gövdeye dik doğrultudaki yerdeğiştirme ve flanşlar arası yerdeğiştirmeler belirlenmiştir. Deney anında oluşan burkulma şekilleri ve oluştukları yük değerleri belirlenmiştir. Monotonik yükleme deneylerin ardından aynı boy ve kesite sahip C profiller üzerine monotonik yükleme deneyler ile aynı noktalardan 15 adet tersinir-tekrarlı yükleme deneyleri yapılmış ve yük, düşey yerdeğiştirme, gövdeye dik doğrultudaki yerdeğiştirme ve flanşlar arası yerdeğiştirmeler belirlenmiştir.

Hafif çelik C profiller üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ardından daha önceki çalışmalarda kullanılmış hafif çelik malzemenin, eksenel çekme ve çok düşük çevrimli tersinir-tekrarlı malzeme parametreleri kaydedilmiştir. Daha sonra Abaqus programı yardımıyla ilk olarak deneyde yükleme noktalarıyla aynı noktalara 15 adet monotonik 15 adet tersinir-tekrarlı nonlinear sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde belirlenen yük, düşey yerdeğiştirme, gövdeye dik doğrultudaki yerdeğiştirme ve flanşlar arası yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

Hafif çelik C profillerin monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler altındaki davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelendiği bu çalışmada elde edilen gözlemler, ulaşılan sonuçlar ve gelecek çalışmalara yardımcı olabileceği düşünülen bazı öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Deneysel veya sayısal olarak gerçekleştirilen tüm monotonik ve tersinir tekrarlı yüklemelerde tek veya çift yönlü eksantrisite durumunda, eksantrisite değeri arttıkça basınç yüklemesi altında profil taşıma kapasitesi azalmıştır.

- Deneysel veya sayısal olarak gerçekleştirilen tüm monotonik yüklemelerde, elemanlar genel burkulma yapmıştır. Yükleme durumuna bağlı olarak değerleri değişmekle birlikte tüm yüklemelerde maksimum yerdeğiştirme elemanın orta bölgesinde olmuştur. Deney profilin arkasından alınan verilerden bu sonuca ulaşılmıştır.
- Monotonik yüklemelerde, deney ile sayısal analiz arasında taşıma kapasitesinde ortalama %26'lık olurken deneyden elde edilen taşıma kapasitelerinin tümü analizden elde edilen değerden fazla çıkmıştır.
- Monotonik yüklemelerde, analiz ve deneyin yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerine baktığımızda rijitliklerde önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra da deney ile analiz eğrileri arasında önemli bir fark yoktur.
- Analiz ve deneylerde monotonik yüklemelerin yük-düşey yerdeğiştirme eğrilerine baktığımızda, bazı noktalarda ani düşüşlerin görüldüğü ve daha sonra yükün tekrardan arttığı görülmektedir. Bu noktalarda burkulmanın çok dar bir alanda yerel burkulma şeklinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Aynı doğrudaki noktalardaki genel olarak aynı burkulma şekilleri görülürken eksantrisine arttıkça taşıma kapasitesinde azalmalar görülmüştür. Taşıma kapasitelerindeki bu azalmalar mesafelere bağlı olarak ortalama %54'tür.
- Monotonik yüklemelerde, genel burkulma durumunda yük-düşey yerdeğiştirme eğrisinde sürekli artarak azalmanın meydana geldiği flanşların dışa açılarak gerçekleşen çarpımalı burkulma durumunda ve yerel burkulmalarda azalmanın ani bir şekilde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- Monotonik yüklemelerde, eleman kuvvetli ekseninde yüklendiğinde, burkulmalar yükleme noktasına yakın flanşta yerel burkulma şeklinde, flanşların basınç etkisinde olduğu negatif (N) yüklemelerde burkulmalar flanş ve dudaklarda yerel burkulma şeklinde ve flanşların dışa açılarak çarpımalı burkulma şeklinde, flanşların çekme etkisinde olduğu pozitif (P) yüklemelerde burkulmalar flanş gövde bağlantı doğrultusunda ve gövdede yerel olarak ve flanşların dışa açılması şeklinde çarpımalı burkulma biçiminde oluşmuştur.

- Flanşların basınç etkisinde olduğu negatif yüklemelerin yapıldığı elemanların taşıma kapasiteleri, flanşların çekme etkisinde olduğu pozitif yüklemelere göre ortalama % 18 daha azdır.
- Monotonik yüklemelerde, tüketilen enerji ve süneklik arasında fark vardır. Yüklemelerin hepsinde tüketilen enerji ve süneklik değeri deneyde analizden daha fazladır.
- Tersinir-tekrarlı yüklemelerde, basınç yüklemelerinde taşıma kapasitelerinde ortalama analiz/deney değeri 0.773, çekme yüklemelerinde ise analiz ve deney boyunca ulaşılan maksimum yük değerleri arasındaki ortalama oran 0.964'tür.
- C.1500.100.0.P, C.1500.100.60.P, C.1500.100.180.P, yüklemeleri dışındaki tüm yüklemelerde analiz ve deneylerde tersinir-tekrarlı yükleme adımları devam ettikçe basınç etkisinde elemanlarda taşıma kapasitesine ulaştıktan yükte azalmalar ve rijitlik kayıpları olurken çekme etkisinde elemanlarda yük artışı olmuştur.
- Tersinir tekrarlı yüklemelerin tamamında genel burkulma meydana gelirken flanşların basınç etkisinde olduğu negatif (N) yüklemelerde ve kuvvetli eksen doğrultusunda yüklenen elemanlarda basınç yüklemelerinde flanş ve dudaklarda yerel burkulmalar ve bunlara ek olarak özellikle eğik eğilme etsindeki elemanlarda çarpılmalı burkulma oluşmuştur. Flanşların çekme etkisinde olduğu pozitif (P) yüklemelerde burkulmalar gövdede yerel burkulma ve çarpılmalı burkulma şeklinde oluşmuştur

5. ÖNERİLER

Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, C-kesitli soğuk şekillendirilmiş çelik kiriş-kolon elemanların monotonik ve tersinir-tekrarlı yüklemeler altında burkulma davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu tez konusu ile çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara aktarılacak istenen öneriler aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- Bu çalışma kapsamında yalnızca tek bir C kesit üzerinde inceleme yapılmıştır ancak, daha farklı boyut ve tiplere sahip C kesitli profiller üzerinde yapılacak parametrik çalışmalarla birlikte bu profillerin özellikle sanayide sıklıkla kullanılan sigma ve Z kesitli profillerle karşılaştırılarak, aynı miktarda malzeme kullanılarak üretilen elemanların hangi yükleme durumları altında daha avantajlı olduğunun incelenmesinde fayda olacaktır.
- Bu tezde kapsamında incelen C kesitli kiriş-kolon elemanlar, bir veya iki boyutlu yapı modeli içinde bileşim detayları da dikkate alınarak test edilmesinde ve bu çalışmada uygulanan yarı-statik (monotonik ve tersinir-tekrarlı) yükleme deneylerinin yanı sıra sarsma tablası ile deprem benzeşimi deneylerinin gerçekleştirilmesinde büyük fayda olacaktır.
- Değişen kesit narinlik oranına göre dayanım ve rijitlik kaybının karakterize eden kapsayıcı zarf eğrilerinin ortaya koyulması, hafif çelik elemanların yapılarda enerji sönmüleyen elemanlar olarak kullanılabilmelerine imkân sağlayacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Abaqus/CAE User's Manual, version 6.14-2, USA, 2014
- AISI-S100, 2012. North American Specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington (DC, USA).
- BS 7270, 2006. Metallic materials – Constant amplitude strain controlled axial fatigue –Method of test. British Standards Institution.
- Chen, J., Chen, M.-T., & Young, B. (2019). Compression tests of cold-formed steel C- and Z-sections with different stiffeners. *Journal of Structural Engineering*, 145(5).
- Chung, K. F., & Lau, L. (1999). Experimental investigation on bolted moment connections among cold-formed steel members. *Engineering Structures*, 21(10), 898-911.
- D. A. Padilla-Llano, C. D. Moen, & M. R. Eatherton, (2014). Cyclic axial response and energy dissipation of cold-formed steel framing members, *Thin-Walled Structures*, 78, 95-107.
- Eren, Ö. (2014). Hafif Çelik Yapı Tasarım Konstrüksiyon Uygulama. İstanbul: Arı Sanat Yayınevi.
- 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.
- Hancock, G. J. (1997). Design for distortional buckling of flexural members. *Thin-Walled Structures*, 27(1), 3-12.
- Kang, T. H.-K., Biggs, K. A., & Ramseyer, C. (2013). Buckling modes of cold-formed steel columns. *International Journal of Engineering and Technology*, 5, 477-451.
- Karamanoğlu, M. & Ulay, G. (2017). Deprem Riski Yüksek Bölgelerde İç Mekân Düzenlemelerinin İncelenmesi (Tosya Örneği). *Journal of Forestry Faculty*, 17(1), 186-193.
- Lam, S. S. E., Chung, K. F., & Wang, X. P. (2006). Load-carrying capacities of cold-formed steel cut stub columns with lipped C-section. *Thin-Walled Structures*, 44(10), 1077-1083.

- Li, Y., Li, Y., & Song, Y. (2014). Experimental investigation on ultimate capacity of eccentrically-compressed cold-formed beam-columns with lipped channel sections. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 3.
- Macdonald, M., Heiyantuduwa, M. A., & Rhodes, J. (2008). Recent developments in the design of cold-formed steel members and structures. *Thin-Walled Structures*, 46(7-9), 1047-1053.
- M. Aghoury, M. T. Hanna ve Essam Amoush (2017). Strength of combined sigma cold formed section columns. *ce/papers*, 1, 1802-1811.
- Mahi, I., Djelil, M., Djafour, N., & Djafour, M. (2019). Calculation of critical load for pure distortional buckling of lipped channel columns. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(4), 1016-1029.
- M. H. Serror, E. M. Hassan & S. A. Mourad (2016). Experimental study on the rotation capacity of cold-formed steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 216-228.
- Miller, T. H., & Pekoz, T. (1994). Load-eccentricity effects on cold-formed steel lipped-channel columns. *Journal of Structural Engineering*, 120(3), 805-823.
- Piyawat, K., Ramseyer, C., & Kang, T. H.-K. (2013). Development of an axial load capacity equation for doubly symmetric built-up cold-formed sections. *Journal of Structural Engineering*, 139(12).
- Öztürk, F., Şentürk, M., Pul, S., & Hajirasouliha, I., (2019). Local and Distortional Buckling Behaviour of Cold Formed Steel Sigma Beam-Column Profiles . *SMAR 2019, 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, 1(10). Potsdam, Germany
- Öztürk, F. (2021). Sigma Kesitli Hafif Çelik Profillerin Eksenel ve Eksantrik Yükleme Altındaki Davranışlarının Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon.
- S. Ádány, N. Silvestre, B. W. Schafer, & D. Camotim, (2009). GBT and cFSM: Two modal approaches to the buckling analysis of unbranched. *Thin-Walled Members Advanced Steel Construction*, 5(2), 29-195.

- Schafer, B. W. (2008). The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(7-8), 766-778.
- Schafer, B. W., Li, Z., & Moen, C. D. (2010). Computational modeling of cold-formed steel. *Thin-Walled Structures*, 48(10-11), 752-762.
- Torabian, S., Zheng, B., Shifferaw, Y., & Schafer, B.W. (2016). Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Beam-Columns Final Report to the American Iron and Steel Institute.
- 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.
- URL-1. <https://www.insaatgundemi.com/wp-content/uploads/hafif-celik-yapi.jpg>.
- URL-2. https://insapedia.com/wp-content/uploads/2019/07/2019-07-23_16-15-02.jpg
- URL-3. https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRvQqiGqEAqxPaesMEq3KM-G31Eoy4HB7TFtzc1poi1h_1fbCh_dBCYf18eWrGUH_ojnQg&usqp=CAU
- URL-4. <https://jscholarship.library.jhu.edu/bitstream/handle/1774.2/40575/2000>.
- Whittle, J. & Ramseyer, C. (2009). Buckling capacities of axially loaded, cold-formed, built-up C-channels. *Thin-Walled Structures*, 47(2), 190-201.
- Ye, J., Mojtabaei, S. M., & Hajirasouliha, I. (2018). Local-flexural interactive buckling of standard and optimised cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 106-118.
- Young, B., Asce, M., & Hancock, G. J. (2003). Compression Tests of Channels with Inclined Simple Edge Stiffeners. *Journal of Structural Engineering*, 129(10), 1403-1411.

- Young, B., Asce, M., Silvestre, N., & Camotim, D. (2013). Cold-formed steel lipped channel columns influenced by local-distortional interaction: Strength and DSM Design. *Journal of Structural Engineering*, 139(6), 1059-1074.
- Young, B., & Rasmussen, K. (1999). Behaviour and design of cold-formed channel columns. *In Advances in Steel Structures (ICASS '99)*, 341-348.
- Yu, Cheng & Lokie, Trevor, (2006). Effective Width Method based design for distortional buckling of cold-formed steel beams. *CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (1971- 2018)*, 2.
- Yu, C., & Schafer, B. W. (2002). Local buckling tests on cold-formed steel beams. *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction*, 127-144.
- Zeinoddini, V. M., & Schafer, B. W., (2012). Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*, 60, 105–117.

7. EKLER

Ek Tablo 1. 500 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri

1			2			3			4		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.329	0	0.719	0.332	0.032	0.700	0.341	0.066	0.658	0.380	0.101	0.588
0.198	0	0.867	0.198	0.039	0.841	0.212	0.083	0.823	0.250	0.134	0.775
0.141	0	0.924	0.143	0.041	0.904	0.151	0.086	0.856	0.170	0.137	0.792
0.109	0	0.954	0.111	0.043	0.940	0.107	0.081	0.804	0.129	0.138	0.802
0.089	0	0.978	0.091	0.044	0.962	0.082	0.077	0.769	0.105	0.141	0.816
0.075	0	0.994	0.077	0.045	0.981	0.074	0.084	0.838	0.081	0.131	0.758
0.065	0	1.004	0.067	0.046	0.992	0.064	0.084	0.848	0.068	0.129	0.747
0.057	0	1.012	0.059	0.046	1.001	0.056	0.085	0.856	0.063	0.136	0.789
5			6			7			8		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.433	0.142	0.473	0.477	0.175	0.270	0.418	0.158	0	0.372	0.136	-0.211
0.289	0.189	0.632	0.276	0.201	0.311	0.35	0.266	0	0.255	0.186	-0.288
0.222	0.218	0.727	0.208	0.228	0.353	0.268	0.305	0	0.208	0.228	-0.353
0.175	0.230	0.768	0.168	0.246	0.379	0.212	0.322	0	0.174	0.255	-0.394
0.140	0.230	0.768	0.141	0.257	0.397	0.187	0.351	0	0.149	0.273	-0.422
0.116	0.230	0.767	0.121	0.265	0.410	0.164	0.373	0	0.131	0.287	-0.444
0.100	0.229	0.766	0.105	0.272	0.419	0.157	0.388	0	0.115	0.296	-0.457
0.087	0.230	0.767	0.094	0.276	0.427	0.147	0.476	0	0.103	0.303	-0.468
9			10			11			12		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.328	0.108	-0.358	0.311	0.083	-0.479	0.294	0.056	-0.557	0.286	0.028	-0.603
0.259	0.170	-0.568	0.221	0.118	-0.683	0.215	0.082	-0.816	0.208	0.105	-0.878
0.203	0.200	-0.667	0.188	0.151	-0.870	0.169	0.096	-0.958	0.178	0.041	-1.127
0.169	0.222	-0.742	0.151	0.161	-0.931	0.125	0.095	-0.947	0.142	0.053	-1.197
0.142	0.232	-0.774	0.12	0.161	-0.938	0.109	0.097	-0.974	0.110	0.054	-1.158
0.121	0.238	-0.794	0.101	0.162	-0.937	0.088	0.100	-1.004	0.094	0.056	-1.198
0.105	0.241	-0.804	0.086	0.162	-0.933	0.077	0.102	-1.026	0.082	0.055	-1.217
0.093	0.245	-0.818	0.076	0.163	-0.938	0.068	0.104	-1.042	0.073	0.057	-1.237
13											
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}									
0.216	0	-0.474									
0.161	0	-0.701									
0.129	0	-0.845									
0.106	0	-0.924									
0.089	0	-0.978									
0.078	0	-1.025									
0.069	0	-1.056									
0.062	0	-1.080									

Ek Tablo 2. 1000 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri

1			2			3			4		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.254	0	0.555	0.258	0.025	0.545	0.274	0.051	0.518	0.295	0.079	0.457
0.169	0	0.738	0.170	0.033	0.719	0.178	0.067	0.675	0.192	0.103	0.595
0.126	0	0.830	0.126	0.037	0.800	0.132	0.075	0.752	0.147	0.118	0.684
0.099	0	0.863	0.099	0.039	0.836	0.092	0.070	0.697	0.113	0.121	0.701
0.080	0	0.879	0.081	0.040	0.856	0.075	0.071	0.714	0.089	0.119	0.689
0.068	0	0.889	0.068	0.040	0.867	0.064	0.072	0.725	0.073	0.119	0.681
0.059	0	0.897	0.059	0.040	0.875	0.055	0.073	0.732	0.062	0.117	0.674
0.051	0	0.903	0.052	0.041	0.881	0.049	0.074	0.737	0.054	0.116	0.669
5			6			7			8		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.372	0.122	0.406	0.444	0.163	0.251	0.377	0.143	0	0.336	0.123	-0.190
0.247	0.162	0.539	0.246	0.179	0.278	0.326	0.247	0	0.235	0.172	-0.266
0.190	0.187	0.624	0.189	0.207	0.321	0.249	0.284	0	0.188	0.206	-0.319
0.149	0.196	0.653	0.152	0.222	0.344	0.201	0.303	0	0.158	0.232	-0.358
0.118	0.193	0.644	0.126	0.231	0.357	0.174	0.328	0	0.139	0.254	-0.393
0.098	0.192	0.641	0.106	0.233	0.359	0.153	0.347	0	0.119	0.263	-0.407
0.078	0.179	0.596	0.095	0.243	0.376	0.136	0.362	0	0.107	0.274	-0.424
0.068	0.179	0.596	0.084	0.246	0.381	0.123	0.373	0	0.096	0.281	-0.435
9			10			11			12		
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}	P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}
0.294	0.097	-0.322	0.325	0.087	-0.502	0.299	0.057	-0.566	0.246	0.024	-0.521
0.234	0.153	-0.511	0.229	0.123	-0.709	0.205	0.078	-0.778	0.186	0.037	-0.788
0.196	0.193	-0.644	0.175	0.141	-0.813	0.155	0.088	-0.881	0.144	0.042	-0.913
0.163	0.214	-0.715	0.139	0.148	-0.857	0.110	0.084	-0.836	0.121	0.047	-1.019
0.135	0.222	-0.740	0.110	0.148	-0.853	0.092	0.087	-0.870	0.099	0.049	-1.051
0.114	0.226	-0.752	0.091	0.147	-0.847	0.079	0.089	-0.894	0.079	0.047	-1.008
0.098	0.226	-0.753	0.078	0.146	-0.845	0.069	0.091	-0.912	0.070	0.048	-1.032
0.086	0.227	-0.756	0.068	0.146	-0.844	0.061	0.092	-0.924	0.067	0.053	-1.138
13											
P/P _y	M _x / M _{xy}	M _y / M _{yy}									
0.244	0	-0.533									
0.183	0	-0.800									
0.141	0	-0.926									
0.115	0	-1.007									
0.097	0	-1.061									
0.079	0	-1.033									
0.074	0	-1.128									
0.067	0	-1.174									

Ek Tablo 3. 1500 mm boyundaki elemanlar için normalleştirilmiş P/P_y , M_x/M_{xy} , M_y/M_{yy} değerleri

1			2			3			4		
P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}
0.170	0	0.371	0.192	0.019	0.406	0.201	0.038	0.381	0.216	0.058	0.334
0.114	0	0.499	0.127	0.025	0.537	0.134	0.051	0.507	0.146	0.078	0.452
0.094	0	0.614	0.095	0.028	0.602	0.100	0.057	0.569	0.114	0.091	0.527
0.075	0	0.659	0.076	0.030	0.640	0.071	0.054	0.540	0.087	0.093	0.538
0.063	0	0.684	0.063	0.031	0.665	0.059	0.056	0.561	0.071	0.095	0.550
0.049	0	0.639	0.059	0.035	0.748	0.051	0.058	0.575	0.057	0.092	0.531
0.043	0	0.662	0.047	0.032	0.696	0.044	0.059	0.586	0.049	0.091	0.526
0.031	0	0.542	0.042	0.033	0.703	0.039	0.059	0.595	0.042	0.091	0.524
5			6			7			8		
P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}
0.245	0.081	0.268	0.341	0.125	0.193	0.334	0.126	0	0.273	0.100	-0.154
0.179	0.117	0.391	0.183	0.134	0.207	0.303	0.230	0	0.213	0.156	-0.242
0.135	0.133	0.444	0.141	0.155	0.240	0.218	0.248	0	0.174	0.191	-0.296
0.106	0.140	0.466	0.113	0.166	0.257	0.179	0.270	0	0.147	0.215	-0.332
0.089	0.146	0.488	0.095	0.175	0.270	0.153	0.290	0	0.127	0.233	-0.361
0.073	0.144	0.479	0.082	0.180	0.278	0.133	0.302	0	0.112	0.247	-0.382
0.063	0.144	0.480	0.074	0.188	0.292	0.102	0.270	0	0.101	0.259	-0.401
0.052	0.135	0.451	0.066	0.192	0.297	0.101	0.307	0	0.091	0.265	-0.410
9			10			11			12		
P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}	P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}
0.270	0.088	-0.295	0.233	0.062	-0.360	0.233	0.044	-0.441	0.203	0.020	-0.428
0.215	0.141	-0.470	0.226	0.121	-0.699	0.165	0.062	-0.624	0.201	0.039	-0.848
0.176	0.173	-0.576	0.185	0.149	-0.859	0.139	0.079	-0.788	0.177	0.052	-1.124
0.150	0.197	-0.657	0.120	0.129	-0.745	0.104	0.079	-0.786	0.152	0.059	-1.282
0.117	0.192	-0.639	0.096	0.129	-0.745	0.088	0.083	-0.833	0.137	0.067	-1.452
0.105	0.207	-0.690	0.087	0.139	-0.804	0.073	0.083	-0.826	0.126	0.074	-1.597
0.087	0.199	-0.663	0.078	0.147	-0.850	0.066	0.088	-0.875	0.121	0.083	-1.792
0.078	0.204	-0.679	0.066	0.141	-0.816	0.060	0.091	-0.908	0.111	0.087	-1.877
13											
P/P_y	M_x/M_{xy}	M_y/M_{yy}									
0.216	0	-0.473									
0.160	0	-0.702									
0.129	0	-0.844									
0.090	0	-0.783									
0.089	0	-0.972									
0.078	0	-1.025									
0.065	0	-0.997									
0.062	0	-1.081									

ÖZGEÇMİŞ

Yılmaz YILMAZ, İlköğrenimini Akoluk İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2016 yılında 88.Yıl Cumhuriyet Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2023 yılında, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.

