



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KONİK SİLO ÇATILARINDA KULLANILAN HAFİF ÇELİK
KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ramazan ORUÇ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 192357406 numaralı Doktora öğrencisi Ramazan ORUÇ tarafından hazırlanan “**KONİK SİLO ÇATILARINDA KULLANILAN HAFİF ÇELİK KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Mustafa SÖNMEZ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Abdulkерim İLGÜN

KTO Karatay Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Ali URAL

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Mahmud Sami DÖNDÜREN

Konya Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 02/07/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűsecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűsterilenlerden oluřtuđunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve her tűrlű intihalden uzak olduđunu beyan ederim.

Enstitű tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tűm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Ramazan ORUÇ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Mehmet Emin KARA'ya, değerli yorumları ve katkılarıyla tez çalışmama yön veren tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mustafa SÖNMEZ ve Doç. Dr. Abdulkerim İLGÜN'e, nümerik çalışmalarda sunduğu yardımlar için Prof. Dr. Babür DEMİRTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney elemanlarının üretilmesi, temin edilmesi ve diğer tüm süreçlerde ihtiyaç duyduğumuz desteği sağlayan OBİAL ENDÜSTRİ ÜRÜNLERİ SAN. İTH. İHR. A.Ş. Üretim Müdürü Yunus Emre ÖZTEKE'ye teşekkür ederim.

Akademik hayatım boyunca bana yol arkadaşlığı yapan Öğr. Gör. Dr. Yakup BÖLÜKBAŞ, Arş. Gör. Dr. Halil İbrahim KAHVE, Arş. Gör. Dr. Furkan AYDIN ve Doç. Dr. Can ERENSON'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatıma girdiği günden beri bana hep inanan ve destekleyen sevgili eşim Melis Sıla ORUÇ'a, hayatımın her anında bana destek olan ve yol gösteren annem Şerife ORUÇ, babam Özcan ORUÇ ve kardeşim Dilara ORUÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı sevgili eşim Melis'e ve oğlum Kağan Alp'e ithaf ediyorum.

Ramazan ORUÇ
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Hedefleri	3
1.2 Tez İçeriği	5
2. SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK ELEMANLAR	6
2.1 Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Eğilme Elemanlarının Davranışları.....	11
2.1.1 Lokal burkulma.....	11
2.1.2 Distorsiyonel burkulma	13
2.1.3 Yanal burulmalı burkulma	14
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	15
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
4.1 Materyal ve Metot	21
4.2 Deney Programı ve Deney Tekniği	24
4.2.1 Kirişlerin yanal öteleme ve dönme açılarının belirlenmesi	29
4.3 Deney Sonuçları	29
4.3.1 AD4500 deney elemanı.....	29
4.3.2 TD4500 deney elemanı.....	33
4.3.3 AD1800 deney elemanı.....	37
4.3.4 TD1800 deney elemanı.....	41
4.3.5 AD900 deney elemanı.....	45
4.3.6 TD900 deney elemanı.....	48
4.3.7 AD1800SM deney elemanı.....	52
4.3.8 TD1800SM deney elemanı	56
4.3.9 AD900SM deney elemanı.....	60
4.3.10 TD900SM deney elemanı	63
4.4 Sonuçlar.....	66
5. NÜMERİK ÇALIŞMALAR.....	71
5.1 Sonlu Eleman Ağ Modelleri	71
5.2 Malzeme Modeli.....	72
5.3 Mesnet Koşullarının ve Temas Yüzeylerinin Modellenmesi.....	74
5.4 Geometrik Kusurlar	76
5.5 Analiz Yöntemi.....	78
5.6 Yakınsama Analizleri.....	79
5.6.1 Ağ modeli tipleri	80
5.6.2 Ağ boyutları	81
5.6.3 Geometrik kusurlar	82
5.6.4 Sonuçlar	84
5.7 Sonlu Elemanlar Analizlerinin Doğrulanması.....	85
5.7.1 Basit mesnetli modellerin doğrulanması	85
5.7.2 Sabit mesnetli modellerin doğrulanması	93
5.8 Parametrik Çalışmalar	99
6. AISI S100-16 ŞARTNAME YAKLAŞIMI	105

6.1 Akmanın Başlaması ve Global Burkulma Tasarımı	108
6.2 Lokal Burkulma Kapasitesi	109
6.3 Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi	110
6.4 Sonuçlar	111
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	119
KAYNAKLAR	122
EKLER	129
EK A. Kapasite Hesaplamaları	130
ÖZGEÇMİŞ	137



DOKTORA TEZİ

KONİK SİLO ÇATILARINDA KULLANILAN HAFİF ÇELİK KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Ramazan ORUÇ

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

ÖZET

Bu çalışmada konik silo çatısının bir parçası olarak tasarlanan soğukta şekil verilmiş çelik kiriş elemanların eğilme davranışı deneysel ve nümerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda deneysel çalışmada kiriş elemanlara dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Deneyler basit ve sabit mesnetli olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmada değişken olarak kirişlerin yönlendirilmesi ve bağlantı kirişleri arası mesafe dikkate alınmıştır. Bu değişkenlerin kirişlerin moment taşıma kapasitesine, burkulma davranışına, yanal öteleme ve dönme miktarına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasının, basit mesnetli elemanlarda moment taşıma kapasitesini artırdığını, ancak sabit mesnetli elemanlarda bu etkinin gözlemlenmediğini ortaya koymuştur. Ayrıca mesafe azaldıkça kirişlerin yanal öteleme ve dönme açılarının azaldığı ve bu durumun kirişlerin göçme davranışlarını değiştirdiği belirlenmiştir. Ters yönlendirme ise en etkili kiriş yönlendirmesi olarak tespit edilmiştir. Nümerik çalışma ise, deneysel sonuçların doğrulanması ve deneylerde incelenmeyen değişkenlerin etkisini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yakınsama analizleri kapsamında ağ modeli tipleri, ağ boyutları ve farklı ölçeklerde geometrik kusurların etkisi incelenmiştir. Analizler, modelde global kusurların yanı sıra lokal kusurların da tanımlanması gerekliliğini ortaya koymuştur. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanmasında deney elemanlarının moment taşıma kapasitesi, göçme modları ve moment-deplasman eğrileri karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu belirlenmiştir. Parametrik çalışmada ise deneysel çalışmada incelenmeyen değişkenlerin araştırılması amaçlanmıştır. Değişken olarak kirişlerin kesit yüksekliğinin kesit kalınlığına oranı (h/t) ve bağlantı kirişleri kesit kalınlıkları dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgular, h/t oranının artmasıyla moment taşıma kapasitelerinin azaldığını ve farklı kalınlıklardaki bağlantı kirişlerinin kullanımının moment taşıma kapasitesine etkisinin sınırlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneysel ve nümerik çalışma sonuçları AISI S100 şartnamesi ile karşılaştırılmıştır. AISI S100 şartnamesi yaklaşımlarının deneysel ve nümerik sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğukta Şekil Verilmiş Çelik, Konik Silo Çatısı, Eğilme Elemanı, Deneysel Çalışma, Nümerik Analiz.

Temmuz, 2024; 137 sayfa

PhD. THESIS

INVESTIGATION OF THE BENDING BEHAVIOUR OF COLD FORMED STEEL BEAMS USED IN CONICAL SILO ROOFS

Ramazan ORUÇ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

ABSTRACT

This study aimed to investigate the bending behaviour of cold-formed steel beam members as a part of the conical silo roof experimentally and numerically. Accordingly, a four-point bending test was applied in the experimental study. The experiments were carried out in two cases: simple and pinned support. The study considered the orientation of the radial beams and the distance between the circular beams. The effects of the variables on the moment carrying capacity, buckling behaviour, lateral translation and rotation of the beams were investigated. The experimental results show that decreasing the distance between circular beams increases the moment-carrying capacity of simply supported radial beams. However, this effect is not observed for pinned supported members. In addition, it was determined that the lateral translation and rotation angles of the beams decreased as the distance decreased, which changed the failure behaviour of the radial beams. Face-to-back orientation was found to be the most effective beam orientation. The numerical study was conducted to validate experimental results and investigate untested variables. The effect of mesh types, mesh sizes and geometric imperfections at different amplification factors were examined in the convergence analyses. The analyses revealed the need to identify local and global imperfections in the model. In the verification analysis, the experimental members' moment carrying capacity, failure modes and moment-displacement curves were compared and the results were consistent. The parametric study considered the ratio of the height to the thickness (h/t) of the radial beams and the thickness of the circular beams. The results indicated that as the h/t ratio increased, the moment-carrying capacities decreased. Using circular beams with varying thicknesses had a limited effect on the moment carrying capacity. In addition, the results of the experimental and numerical studies were compared with the AISI S100 specification. It was determined that the AISI S100 specification approaches were in good agreement with the experimental and numerical results.

Keywords: Cold Formed Steel, Conical Silo Roof, Bending Member, Experimental Study, Numerical Study.

July, 2024; 137 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlardan üretilen a) konut yapısı b) silo yapısı.....	1
Şekil 1.2. Silo çeşitleri: (a) taş silo (URL-1), (b) ahşap silo (URL-2), (c) betonarme silo (URL-3) ve (d) çelik silo (URL-4).	2
Şekil 1.3. (a) Düz tabanlı (URL-4) ve (b) konik tabanlı silo (URL-5).....	2
Şekil 1.4. (a) Konik silo çatısı ve (b) konik silo çatısının bir parçası olarak üretilen deney elemanı.	4
Şekil 2.1. Yaygın olarak kullanılan kesit geometrileri.	7
Şekil 2.2. Soğukta şekil verme işlemleri a) rulo şekillendirme b) pres ile şekillendirme (URL-6).	7
Şekil 2.3. (a) Rulo şekillendirme ve (b) pres ile şekillendirme şematik gösterimi.	8
Şekil 2.4. Soğukta şekil verme işleminin mekanik özellikler üzerine etkisi.	9
Şekil 2.5. Soğukta şekil verme işleminin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerine etkisi.	10
Şekil 2.6. Tırnaklı C kesitin tipik lokal burkulma şekli.	12
Şekil 2.7. Basit mesnetli plağın burkulması.	12
Şekil 2.8. Gerilmenin yeniden dağıtılması basamakları.	13
Şekil 2.9. Tırnaklı C kesitin tipik distorsiyonel burkulma şekli.	13
Şekil 2.10. Tırnaklı C kesitlerde yanal burulmalı burkulma şekli.	14
Şekil 4.1. Spektrometre numunesi ve cihazı.	22
Şekil 4.2. Çekme testi (a) çekme test cihazı, (b) numunelerin geometrisi.....	23
Şekil 4.3. 2 mm kalınlıktaki numune için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	23
Şekil 4.4. 2.5 mm kalınlıktaki numune için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi. . . .	24
Şekil 4.5. Kesit geometrisinin isimlendirilmesi.	25
Şekil 4.6. (a) Kirişlerin birbirine bağlanması, (b) kirişlerin uç bağlantı elemanları ile mesnetlenmesi, (c-d) basit mesnet ve (e-d) sabit mesnet detayları.	25
Şekil 4.7. Detaylandırılmış deney düzeneği (a) deney düzeneği, (b) kirişlerin yönlendirmesi ve (c) kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin enkesit geometrik ölçüleri.	27
Şekil 4.8. (a) Deney sistemi, (b) orta nokta düşey ve yanal deplasman, (c) mesnet düşey ve yanal deplasman ölçümleri ve (d) kesit içine ahşap takoz yerleştirilmesi.	28
Şekil 4.9. Kirişlerde yanal öteleme ve dönme açılarının belirlenmesi.	29
Şekil 4.10. AD4500 deney elemanına ait göçme şekli.	30
Şekil 4.11. AD4500 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.....	31
Şekil 4.12. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	31
Şekil 4.13. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	32
Şekil 4.14. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	32
Şekil 4.15. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	33
Şekil 4.16. TD4500 deney elemanına ait göçme şekli.	34
Şekil 4.17. TD4500 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	34
Şekil 4.18. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	35
Şekil 4.19. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	35
Şekil 4.20. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	36
Şekil 4.21. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	36

Şekil 4.22. Deney elemanın göçme şekli (a-b) ve bağlantı kirişi levhasında meydana gelen lokal ezilme (c-d).	38
Şekil 4.23. AD1800 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	38
Şekil 4.24. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	39
Şekil 4.25. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	39
Şekil 4.26. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	40
Şekil 4.27. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	40
Şekil 4.28. Deney elemanının göçme şekli (a-b) ve bağlantı kirişi levhasının alt bölgesinde oluşan lokal ezilme (c-d).	42
Şekil 4.29. TD1800 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	42
Şekil 4.30. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	43
Şekil 4.31. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	43
Şekil 4.32. Arka kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.	44
Şekil 4.33. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	44
Şekil 4.34. Deney elemanının göçme şekli.	45
Şekil 4.35. AD900 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	46
Şekil 4.36. Ön kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.	46
Şekil 4.37. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	47
Şekil 4.38. Arka kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.	47
Şekil 4.39. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	48
Şekil 4.40. Deney elemanına ait göçme şekli.	49
Şekil 4.41. TD900 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	49
Şekil 4.42. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	50
Şekil 4.43. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	50
Şekil 4.44. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	51
Şekil 4.45. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	51
Şekil 4.46. Deney elemanın göçme şekli (a-b) ve bağlantı kirişi levhasında oluşan lokal ezilme (c).	53
Şekil 4.47. AD1800SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	53
Şekil 4.48. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	54
Şekil 4.49. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	54
Şekil 4.50. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	55
Şekil 4.51. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	55
Şekil 4.52. Deney elemanın göçme şekli (a-b) ve bağlantı kirişi levhasında oluşan lokal ezilme (c).	57
Şekil 4.53. TD1800SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	57
Şekil 4.54. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	58
Şekil 4.55. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	58
Şekil 4.56. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	59
Şekil 4.57. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	59
Şekil 4.58. Deney elemanının göçme şekli.	60
Şekil 4.59. AD900SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	61
Şekil 4.60. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	61

Şekil 4.61. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	62
Şekil 4.62. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	62
Şekil 4.63. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	63
Şekil 4.64. Deney elemanının göçme şekli.	64
Şekil 4.65. TD900SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.	64
Şekil 4.66. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	65
Şekil 4.67. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	65
Şekil 4.68. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.	66
Şekil 4.69. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.	66
Şekil 4.70. Basit mesnetli deney elemanlarında ön kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.	68
Şekil 4.71. Basit mesnetli deney elemanlarında arka kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.	68
Şekil 4.72. Sabit mesnetli deney elemanlarında ön kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.	69
Şekil 4.73. Sabit mesnetli deney elemanlarında arka kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.	70
Şekil 5.1. Abaqus kütüphanesinde bulunun kabuk elemanlar (a) S4 ve (b) S4R.	72
Şekil 5.2. 2.5 mm kalınlıktaki elemana ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği. ..	73
Şekil 5.3. 2 mm kalınlıktaki elemana ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.	74
Şekil 5.4. Basit mesnetli modelin oluşturulması.	75
Şekil 5.5. Sabit mesnetli modelin oluşturulması.	75
Şekil 5.6. Bulonlu birleşimlerin modellenmesi.	76
Şekil 5.7. Geometrik kusur türleri (a) lokal, (b) distorsiyonel.	77
Şekil 5.8. Hakim burkulma modları (a) global, (b) ve (c) lokal burkulma.	79
Şekil 5.9. S4 ve S4R eleman için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması. ..	80
Şekil 5.10. Ağ boyutları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.	82
Şekil 5.11. Global kusur ölçeklendirme katsayıları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.	83
Şekil 5.12. Lokal kusur ölçeklendirme katsayıları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.	84
Şekil 5.13. Deney ile sonlu elemanlar modeli göçme modlarının karşılaştırılması.	84
Şekil 5.14. Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (a-b) TD900, (c) AD900, (d) TD1800, (e) AD1800, (f) TD4500 ve (g) AD4500.	88
Şekil 5.15. AD4500 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	88
Şekil 5.16. TD4500 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	89
Şekil 5.17. AD1800 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	89
Şekil 5.18. TD1800 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	90
Şekil 5.19. AD900 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	90
Şekil 5.20. TD900 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	91
Şekil 5.21. Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (a) AD1800SM, (b) TD1800SM, (c) AD900SM ve (d) TD900SM.	95
Şekil 5.22. AD1800SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	95
Şekil 5.23. TD1800SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	96
Şekil 5.24. AD900SM deney elemanına ait moment deplasman eğrisi.	96
Şekil 5.25. TD900SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.	97
Şekil 5.26. Basit mesnetli modeller için moment-h/t ilişkisi.	102

Şekil 5.27. Sabit mesnetli modeller için moment-h/t ilişkisi.	102
Şekil 6.1. Burkulma sonrası gerilme dağılımı ve etkili genişliğin tanımı.	106
Şekil 6.2. Kirişe ait CUFSM programında elastik burkulma analizi çıktısı.	107
Şekil 6.3. Basit mesnetli deney elemanları ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 6.4. Basit mesnetli parametrik çalışma ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.....	117
Şekil 6.5. Sabit mesnetli deney elemanlarının AISI S100-16 eğrileri ile karşılaştırılması.....	118
Şekil 6.6. Sabit mesnetli parametrik çalışma ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.....	118



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. TS EN 10346'ya göre DX malzemelerin tolerans kimyasal bileşim yüzdeleri.	21
Çizelge 4.2. Spektrometre analiz sonuçları özeti.	22
Çizelge 4.3. DX51D elemanların mekanik özellikleri.	24
Çizelge 4.4. Basit mesnetli deney elemanlarının göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları.	69
Çizelge 4.5. Sabit mesnetli deney elemanlarının göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları.	70
Çizelge 5.1. Maksimum geometrik kusurlar için CDF değerleri.	77
Çizelge 5.2. Ağ boyutlarına ait moment taşıma kapasitesi ve CPU süresi.	82
Çizelge 5.3. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması.	92
Çizelge 5.4. Sabit mesnetli deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırılması.	98
Çizelge 5.5. Parametrik çalışmalarda kullanılan kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri.	100
Çizelge 5.6. Basit mesnetli modeller için göçme moment kapasiteleri ve göçme modu.	103
Çizelge 5.7. Sabit mesnetli modeller için göçme moment kapasiteleri ve göçme modu.	104
Çizelge 6.1. Basit mesnetli deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile AISI S100-16 şartname sonuçlarının karşılaştırılması.	113
Çizelge 6.2. Sabit mesnetli deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile AISI S100-16 şartname sonuçlarının karşılaştırılması.	114
Çizelge 6.3. Basit mesnetli parametrik çalışmaların DSM ile karşılaştırılması.	115
Çizelge 6.4. Sabit mesnetli parametrik çalışmaların DSM ile karşılaştırılması.	116

SİMGELER VE KISALTMALAR

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği (American Society for Testing and Materials)
BB	Kiriş gövdesinin ezilmesi (Beam Bearing)
CDF	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
COV	Değişim Katsayısı (Coefficient of Variation)
CPU	Merkezi İşlem Birimi (Central Process Unit)
CUFSM	Sınırlandırılmış ve Sınırlandırılmamış Sonlu Şerit Yöntemi (Constrained and Unconstrained Finite Strip Method)
DB	Distorsiyonel Burkulma (Distortional Buckling)
DSM	Doğrudan Dayanım Yöntemi (Direct Strength Method)
E	Elastisite Modülü
EWM	Etkili Genişlik Yöntemi (Effective Width Method)
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)
FSM	Sonlu Şerit Yöntemi (Finite Strip Method)
F_u	Çekme Dayanımı (MPa)
F_y	Akma Dayanımı (MPa)
G	Kayma Modülü
GBT	Genelleştirilmiş Kiriş Teorisi (Generalised Beam Theory)
LB	Lokal Burkulma
LTB	Yanal Burulmalı Burkulma (Lateral Torsional Buckling)
ϵ_f	Kopma anındaki birim şekil değiştirme değeri
u	Ötelenme
ν	Poisson Oranı
θ	Dönme
λ_l	Lokal Burkulma için Narinlik Oranı
λ_d	Distorsiyonel Burkulma için Narinlik Oranı

1. GİRİŞ

Soğukta şekil verilmiş çelik (CFS) elemanlar modern yaşamın her alanında yer almaktadır. Bu elemanların kullanım alanları teneke kutulardan yapısal kazıklara ve ana çerçeve bina elemanlarına kadar çeşitlilik göstermektedir. Soğukta şekil verme işlemiyle çok farklı şekil, boyut ve uygulama çeşitliliğine sahip ürün ortaya çıkarılmaktadır (Dubina vd., 2012). Bu elemanlar ile üretilen konut, endüstriyel ve ticari yapıların kullanımı 1940'lı yıllardan sonra giderek artmıştır (Hancock vd., 2001; Kankanamge, 2010; Yu vd., 2019). CFS elemanlardan üretilen bir konut yapısı ve silo yapısı sırasıyla Şekil 1.1 (a-b)'de verilmiştir. Bu elemanlar yapıda görevi itibarıyla kolon, kiriş, perde duvar ve çatı aşığı gibi taşıyıcı olarak birincil eleman görevi üstlenirken taşıyıcı özelliği olmayan bölme duvarlar gibi ikincil eleman olarak da kullanılmaktadır.



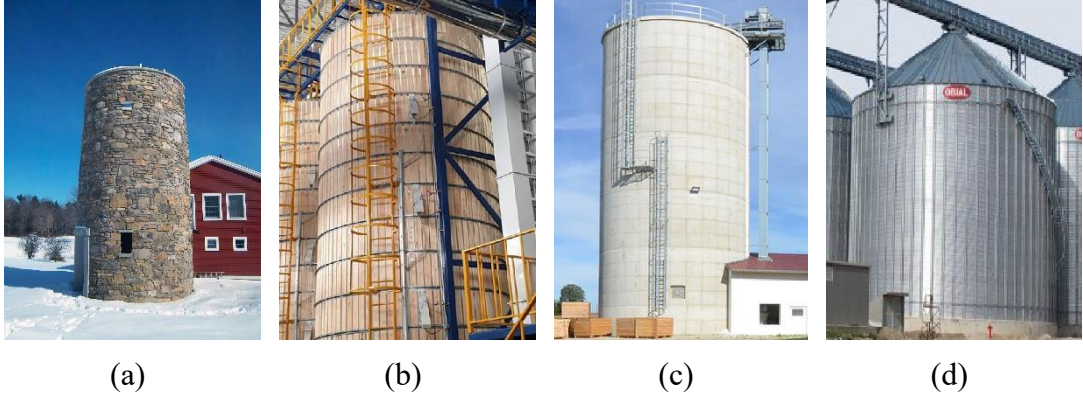
(a)



(b)

Şekil 1.1. CFS elemanlardan üretilen a) konut yapısı b) silo yapısı.

Silo yapıları; kömür, kül, çimento, karbon siyahı vb. endüstriyel malzemelerin, kahve, un, tuz, baharat gibi gıda malzemelerinin ve buğday, arpa, mısır vb. tarım malzemelerinin depolandığı yapılardır. Ayrıca siloların küçük alanlarda yüksek depolama kapasitesi olması, depolanan malzeme için optimum koşullar (nem, ısı, zararlı organizmalara karşı koruma) sağlaması avantajlarıyla tercih edilmektedir. Silo yapılarının inşasında kronolojik olarak taş, ahşap, betonarme ve çelik malzemeler kullanılmıştır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Silo çeşitleri: (a) taş silo (URL-1), (b) ahşap silo (URL-2), (c) betonarme silo (URL-3) ve (d) çelik silo (URL-4).

II. Dünya Savaşı sonrası çelik üretiminin artması, teknolojinin gelişmesi, kurulum kolaylığı ve rekabetçi fiyat gibi avantajlarıyla çelik silolar diğer yapı malzemelerinden üretilen silolara göre daha çok tercih edilmektedir. Genellikle silindirik bir yapıya sahip olan çelik silolar, düz tabanlı veya konik tabanlı olacak şekilde tasarlanmaktadır (Şekil 1.3). Düz tabanlı çelik silolar konik bir silo çatısı ve silindirik kabuk bir gövde duvarından meydana gelirken konik tabanlı silolar ise düz tabanlı silolardan farklı olarak ayrıca konik bir tabana ve konik tabanın temele bağlanmasını sağlayan kolon elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 1.3. (a) Düz tabanlı (URL-4) ve (b) konik tabanlı silo (URL-5).

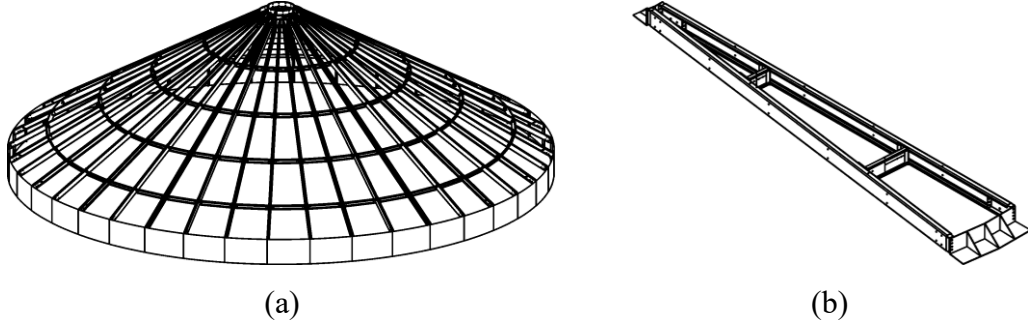
Siloların çatıları malzemenin doğal yığılma şekli nedeniyle konik olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca malzemenin dış etkilere korunması amacıyla hassas tasarlanması gerekmektedir. Tasarımda; rüzgar, kar gibi doğal yükler ve konveyör gibi tesisat yükleri göz önüne alınmaktadır. Silo çatılarının üzerine gelen rüzgar ve kar yüklerinin tasarımında TS EN 1991-1-3 ve TS EN 1991-1-4 standartları kullanılmaktadır. Ancak her iki standartta da konik silo çatıları ile ilgili tasarım kriterleri yer almamaktadır (Bölükbaş, 2021).

1.1 Çalışmanın Amacı ve Hedefleri

Silolar, düşük maliyetli depolama çözümleri sunmalarına rağmen, içlerinde depolanan ürünlerin değeri genellikle tesisin maliyetinden oldukça fazladır. Bu nedenle, sistemde meydana gelebilecek herhangi bir olumsuzluk, büyük maddi kayıplara neden olabilmektedir. Depolanan ürünlerin iklimlendirilmesi, nem ve yağıştan korunması kritik öneme sahiptir. Bu korumada silo çatısının rolü oldukça büyüktür. Çatıda oluşacak bir olumsuzluk tüm ürünün kaybedilmesine neden olabilmektedir. Çember formunda olan narin silo gövdesi tepe noktasında çatı yapısına mesnetlenmektedir. Depolanacak ürün silo çatısına eklenen tesisat aracılığıyla doldurulmaktadır. Dolum yapılan bu bölüm, izolasyon ve ilave titreşimler nedeniyle kritik olmaktadır.

Yukarıda açıklandığı üzere çatı yapısında ortaya çıkacak bir olumsuzluk ürünün bozulmasına ve hatta yapının çökmesine neden olmaktadır. Bu amaçla CFS elemanlardan oluşan çatının mesnetlerinin ve yapıyı oluşturan kirişlerin kesitlerinin tasarımı konusu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın amacı çatıyı oluşturan kirişlerin ve mesnetlerinin davranış ve dayanımının deneysel ve nümerik olarak incelenmesidir. Elde edilen sonuçlar yönetmeliklerde belirtilen kriterler ile karşılaştırılmıştır.

Konik silo çatısında kirişlerin bir ucu tepe ringine diğer ucu ise silo duvarına bağlanmaktadır (Şekil 1.4 (a)). Bu bağlantılar genellikle bulonlu veya kaynaklı birleşim olarak tasarlanmaktadır. Ancak bulonlu birleşimlerin işçilik açısından daha kolay ve hızlı olması, özel ekipman gereksiniminin daha az olması ve montaj/demontaj imkanı sağlaması gibi avantajlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bulonlu birleşimlerde düğüm noktası rijitliği tam olarak belirlenemediği için kiriş mesnet şartları belirsiz kalmaktadır. Bu nedenle deneysel çalışmalar konik silo çatısının bir parçası olarak üretilen kiriş sistemi basit mesnetli ve sabit mesnetli olarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.4 (b)). Deney elemanlarına dört noktali eğilme testi uygulanarak göçme meydana gelene kadar yükleme yapılmıştır. Basit mesnetli deney setinde 6 deney elemanı ile eğilme testi uygulanırken sabit mesnetli deney elemanında 4 adet deney elemanı ile yapılmıştır. Her iki deney setinde de değişken olarak bağlantı kirişleri arası mesafe ve kirişlerin yönlendirmesi dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin kirişlerin moment taşıma kapasitesine, göçme şekline, yanal öteleme ve dönme miktarına olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 1.4. (a) Konik silo çatısı ve (b) konik silo çatısının bir parçası olarak üretilen deney elemanı.

Nümerik çalışmaların önemi, yapı tasarımında maliyet ve zaman tasarrufu sağlaması ve farklı değişkenlerin hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanınmasıdır. Bu çalışmada, hem deneysel çalışma sonuçlarının doğrulanması hem de deneylerde incelenmeyen değişkenlerin etkilerini araştırmak için nümerik analizler yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ile deney elemanlarının doğrulanması aşamasında ağ modeli tipleri, ağ boyutları ve geometrik kusurların etkisi dikkate alınmıştır. Ayrıca birden fazla değişkenin incelenmesi deneysel olarak ekonomik olmayacağından dolayı ilave parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda hem basit mesnetli deney elemanları için hem de sabit mesnetli deney elemanları için ana kiriş gövde yükseklik-kalınlık (h/t) oranının ve bağlantı kirişlerinin kesit kalınlığının kirişlerin moment taşıma kapasitesine ve burkulma şekillerine olan etkisi incelenmiştir.

AISI S100-16 şartnamesi CFS kirişler, kolonlar ve diğer yapısal elemanların tasarımı, burkulma modlarının değerlendirilmesi, bağlantı elemanlarının tasarımı, malzeme özelliklerini ve test yöntemlerini kapsamaktadır. AISI S100-16 şartnamesi kirişlerin moment taşıma kapasitesini belirlenmek için çeşitli yöntemler sunmaktadır. Bu çalışmada, şartnamenin tasarım kriterlerine göre kirişlerin moment taşıma kapasitesi ve burkulma şekillerinin tahmini dikkate alınmıştır. Deneysel, nümerik ve parametrik çalışmaların sonuçları, AISI S100-16 şartnamesinin önerileriyle karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme ile deneysel ve nümerik sonuçların şartnameye uygunluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

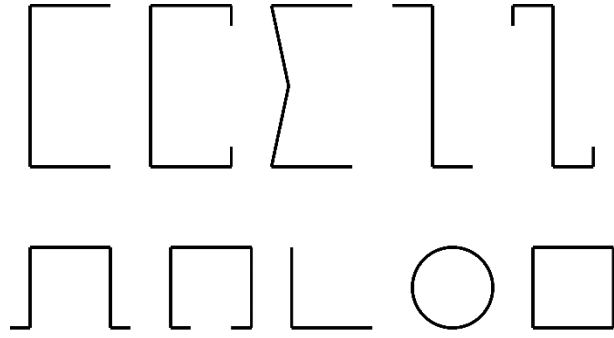
1.2 Tez İçeriği

1. bölümde CFS elemanlar ve silo yapıları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca çalışmanın amaç ve hedefleri açıklanmıştır.
2. bölümde CFS elemanların kısa tarihçesi, kullanım alanları ve avantajları, şekil verme işlemleri ve mekanik davranışına olan etkisi ve eğilme elemanlarının davranışları bu bölümde sunulmuştur.
3. bölümde literatür araştırması yapılmış ve çalışmanın amaç ve kapsamı sunulmuştur.
4. bölüm deneysel çalışmanın aıklanđıđı bölümdür. Bu bölümde deneylerde kullanılan materyaller, malzeme deneyleri, deney düzeneği ve deney sonuçları verilmiştir.
5. bölümde sonlu elemanlar modelinin kurulması basamakları; malzeme modeli, mesnet şartları, ağ modeli ve boyutları bu bölümde verilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile deneysel çalışmaların doğrulanması yapılmıştır. Deneysel alışma ve sonlu elemanlar analiz sonuçları göz önüne alınarak ilave parametrik çalışmalar yapılmıştır.
6. bölümde AISI S100-16 şartnamesinin yaklaşımı açıklanmış ve deneysel sonuçlar, sonlu elemanlar analizi sonuçları ve parametrik çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK ELEMANLAR

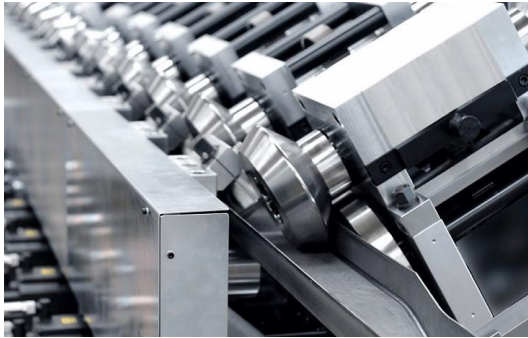
Çelik yapı elemanları iki temel formda üretilmektedir. Birincisi sıcak haddelenmiş profiller ve plakalar içeren geleneksel gruptur. Diğeri ise, rulo şekillendirme veya pres şekillendirme yöntemleri kullanılarak çelik levha, plaka ya da düz çubuklardan elde edilen ve önemi giderek artan soğukta şekillendirilmiş gruptur (Yu vd., 2019). Çelik profiller, genellikle I, H, L, U vb. harflerin formunda üretilmiş kesitlere sahiptir. Sonraki yıllarda gelişen teknoloji ile geleneksel profil kesitlerine benzer şekilde bükülen levhalar yapı sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Levhaya şekil verme işlemi malzeme ısıtılmadan yapıldığı için bu işleme soğukta şekil verme denilmiştir. Şekil verme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte rulo formunda üretilen yassı malzemeler silolardan, sanayi yapılarına ve konutlara kadar geniş bir kullanım alanı bulmuştur. CFS elemanlarda kalınlığın 0.373 mm (0.0147 in.) ile 6.35 mm (0.25 in.) arasında değiştiği kabul edilmektedir. Levha kalınlığı geleneksel malzeme kalınlığına göre daha ince olduğu için bu tür malzeme ile inşa edilen yapılara hafif çelik yapılar da denilmektedir (Williams, 2016; Yu vd., 2019).

1850’li yıllarda Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık’ta hafif çelik yapılar kullanılmaya başlanmıştır. Kullanımının yaygınlaşması sonucunda 1946 yılında Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından soğukta şekil verilmiş ince cidarlı elemanlar ile ilgili şartname yayınlanmıştır (Hancock vd., 2001; Yu vd., 2019). CFS elemanlar endüstride; konut inşasında, ticari yapılarda, araç karoserinde, silo yapılarında ve diğer depolama ürünlerinde, drenaj tesislerinde, köprü inşaatlarında, demiryolu yapılarında vb. gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Yu vd., 2019). Yapılarda geleneksel çelik yerine CFS kullanılması birçok avantajı beraberinde getirmektedir. CFS kesitlerin, geleneksel malzemeye göre dayanım/ağırlık oranı kıyaslanamayacak kadar yüksektir. Ayrıca istenen şeklin verilebilmesi, firenin az olması ve depolanmasının kolay oluşu diğer avantajları olarak sıralanabilir. Bu durum hafif çelik yapıları daha ekonomik yapmaktadır. Yaygın olarak kullanılan CFS kesit geometrileri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

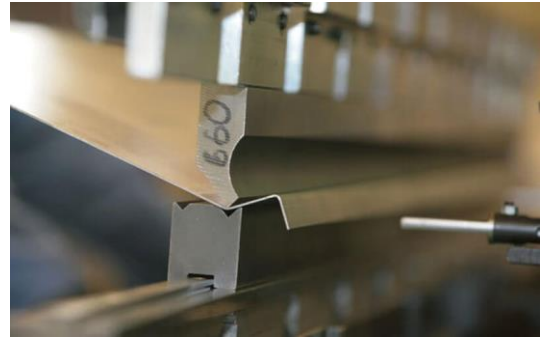


Şekil 2.1. Yaygın olarak kullanılan kesit geometrileri.

Kesitlerin elde edilmesinde levha plastik şekil değiştirecek kadar bükülmektedir. Örneğin C harfi formunda kesit iki bölgede plastik şekil değiştirme yaptırılarak elde edilmektedir. Bu işlem iki teknikte yapılmaktadır. Rulo şekillendirme yönteminde, levha sabit bilyelerin arasında sıkıştırılarak her bilyede biraz bükülerek şekillendirilmektedir (Şekil 2.2(a)). Pres ile şekillendirme yönteminde ise levha, bir kalıbın içine alınarak tek seferde sıkıştırılmaktadır (Şekil 2.2(b)). Rulo şekillendirme yöntemi büyük miktarlarda üretimler için daha çok tercih edilmektedir. Kurulum maliyetleri yüksektir ancak sonraki işçilik maliyetleri düşüktür. Pres ile şekillendirme yöntemi ise daha düşük hacimli üretimlerde tercih edilmektedir (Hancock vd., 2001). Ayrıca rulo şekillendirme ve pres ile şekillendirme sırasıyla Şekil 2.3 (a-b)'de şematik olarak gösterilmiştir.

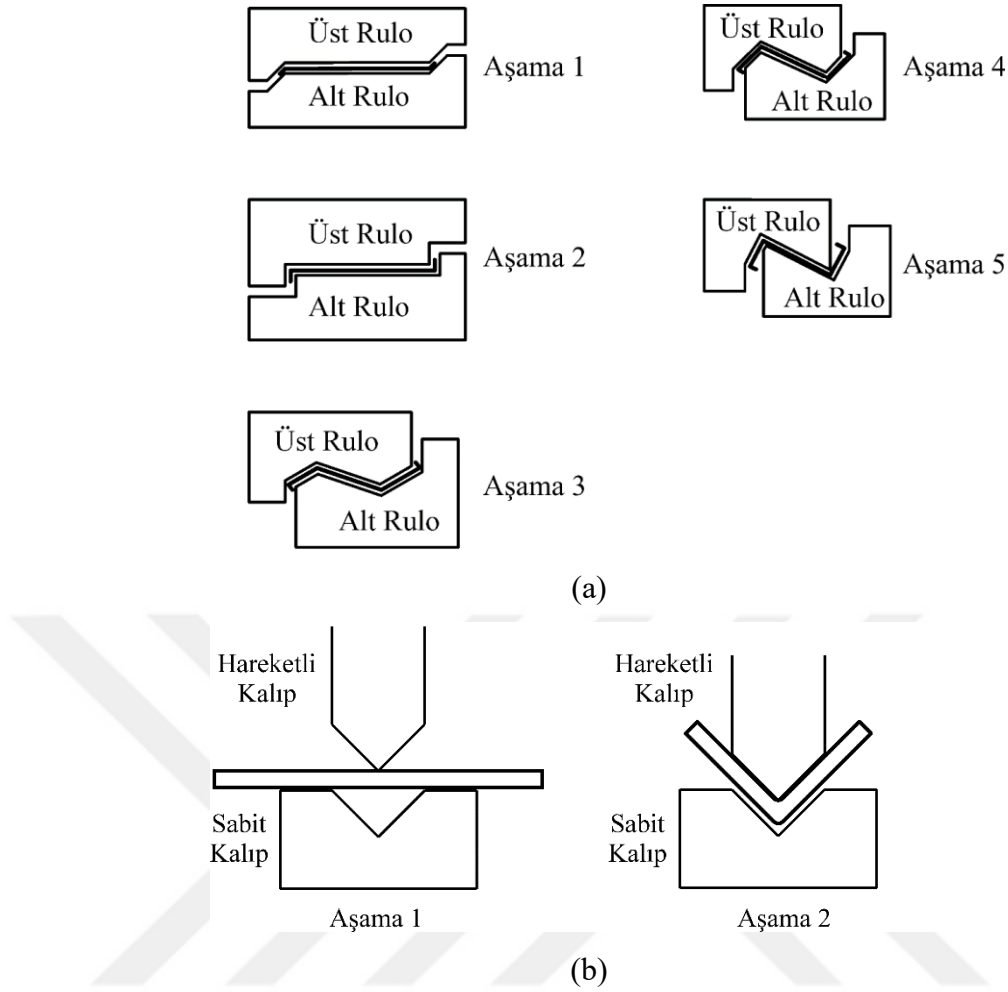


(a)



(b)

Şekil 2.2. Soğukta şekil verme işlemleri a) rulo şekillendirme b) pres ile şekillendirme (URL-6).



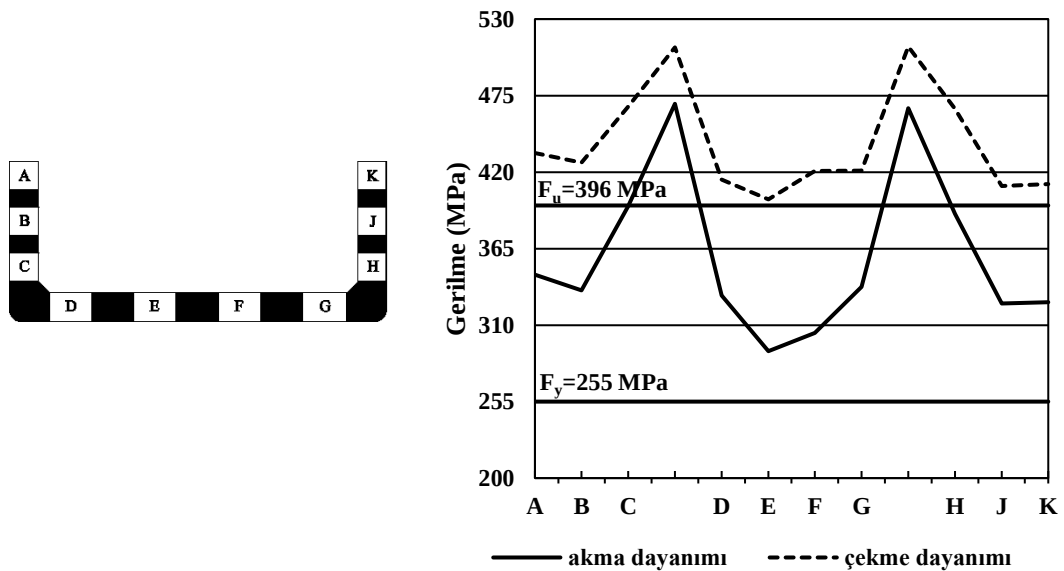
Şekil 2.3. (a) Rulo şekillendirme ve (b) pres ile şekillendirme şematik gösterimi (Hancock vd., 2001).

Malzeme özellikleri yapı elemanlarının performansında önemli rol oynamaktadır. Bu sebeple, CFS elemanların mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. CFS elemanların nominal akma dayanımları Kuzey Amerika şartnamesine göre 165 MPa ile 550 MPa arasında değişiklik göstermektedir. Bu akma dayanımlarına karşılık gelen elastisite modülü değerleri ise 200 GPa ile 207 GPa arasında değişiklik göstermektedir. Ayrıca çekme dayanımının akma dayanımına oranı (F_u/F_y) 1.08 ile 1.88 arasındadır. Kayma modülü (G), kayma gerilmesi ile kayma birim şekil değiştirme arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. Elastisite teorisine dayanarak kayma modülü Denklem 2.1'e göre hesaplanmaktadır. Kuzey Amerika şartnamesine göre CFS elemanlarda kayma modülü 78 GPa olarak kullanılmaktadır (Yu vd., 2019).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.1)$$

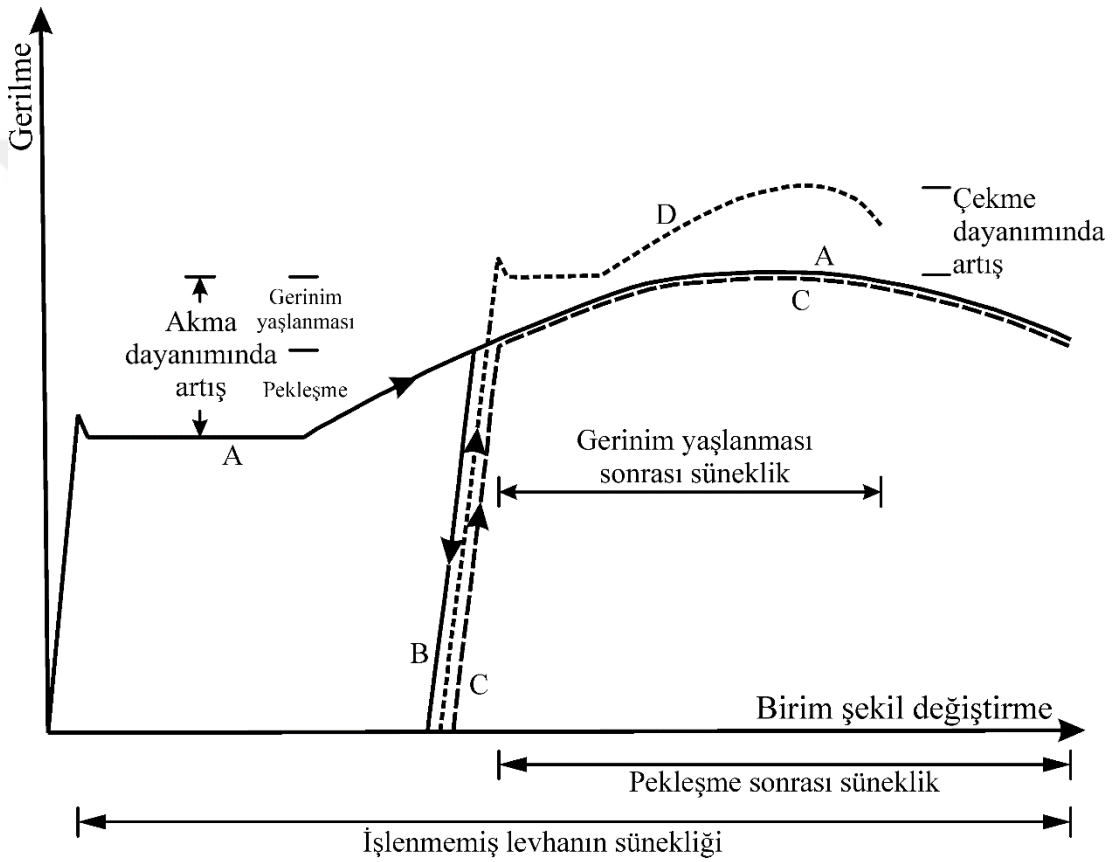
Burada G kayma modülünü, E elastisite modülünü ve ν Poisson oranını ifade etmektedir.

CFS profillerin mekanik özellikleri şekillendirmeden önceki sac, şerit, levha veya çubuktan önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bunun nedeni soğuk şekil verme işlemi esnasında kesit üzerinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmekte ve böylelikle soğukta şekil verme işlemi akma dayanımı ve çekme dayanımı artırırken sünekliği azaltmaktadır. Soğukta şekil verme işlemi ile akma ve çekme gerilmelerindeki değişim Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bir kesitin köşelerindeki malzemeye düz bölgedeki malzemeye göre çok daha yüksek derecede soğuk şekil verme işlemi uygulanmaktadır. Bu durum, köşelerdeki malzemenin akma ve çekme dayanımlarında önemli bir artışa neden olmaktadır. Köşe büküm bölgelerinde (C-D ve G-H), şekil verilmemiş levhanın akma ve çekme dayanımlarına kıyasla sırasıyla yaklaşık 1.8 ve 1.3 katlık bir artış meydana gelmiştir. Öte yandan, kesit gövdesinde (E-F) bu artış oranı yaklaşık olarak 1.2 ve 1.02 seviyelerindedir. Çekme dayanımındaki artış akma dayanımındaki artışa oranla daha küçük olması ile akma ile çekme dayanımları arasındaki fark belirgin bir şekilde azalmaktadır. Bunun sonucunda burkulma veya akma ilk olarak düz bölgede başlamaktadır (Chajes vd., 1963; Karren ve Winter, 1965).



Şekil 2.4. Soğukta şekil verme işleminin mekanik özellikler üzerine etkisi (Karren ve Winter, 1965).

Chajes vd. (1963) soğuk şekil verme işleminin mekanik özellikler üzerine olan etkisini araştırmıştır (Şekil 2.5). Şekil 2.5'teki gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde A işlenmemiş levhanın gerilme-birim şekil değiştirme eğrisini, B eğrisi pekleşme bölgesinde yüklemenin geri alınmasını, C eğrisi anında geri yüklemeyi ve D eğrisi gerinim yaşlanması sonrası geri yüklemeyi temsil etmektedir. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden anlaşılabacağı üzere hem C eğrisinde hem de D eğrisinde işlenmemiş levhaya göre akma dayanımında artış meydana gelirken, pekleşme ve gerinim yaşlanması sonrası süneklik azalması meydana gelmektedir.



Şekil 2.5. Soğukta şekil verme işleminin gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerine etkisi (Chajes vd., 1963).

Soğuk şekil verme işlemi köşe bükümlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi genellikle çelik tipine, gerilme tipine, soğuk şekil verme yönüne göre gerilme yönüne, F_u/F_y oranına, büküm çapı-kalınlık oranına (R/t) ve soğuk şekil verme miktarına bağlıdır (Yu vd., 2019). Soğuk şekil verme işleminin etkisini araştıran Karren (1967) köşe akma dayanımı için aşağıdaki denklemleri önermiştir.

$$\frac{F_{yc}}{F_{yv}} = \frac{B_c}{(R/t)^m} \quad (2.2)$$

$$B_c = 3.69 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0.819 \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}} \right) \quad (2.3)$$

$$m = 0.192 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0.068 \quad (2.4)$$

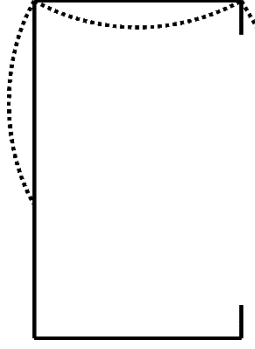
Burada F_{yc} köşe akma dayanımını, F_{yv} işlenmemiş akma dayanımını, F_{uv} işlenmemiş çekme dayanımını, R büküm çapını ve t kalınlığı ifade etmektedir.

2.1 Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Eğilme Elemanlarının Davranışları

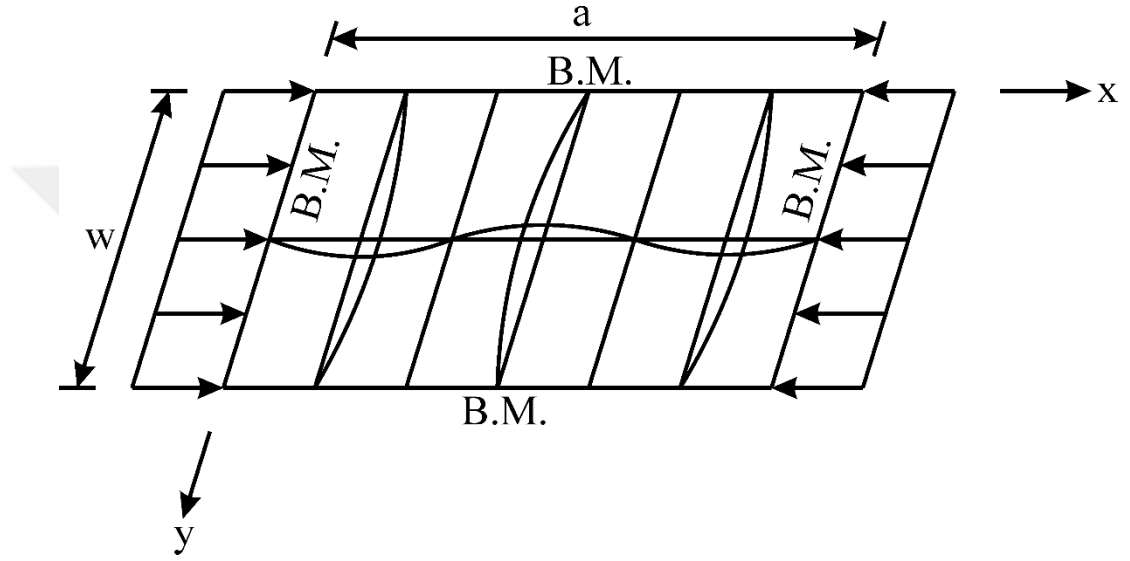
CFS elemanlar ince ve genişlik/kalınlık oranları (w/t) büyük elemanlardır. Eğilme momenti etkisinde geleneksel çelik elemanlardan farklı göçme şekilleri gözlemlenmektedir. CFS eğilme elemanlarında göçme genellikle akma, lokal burkulma, distorsiyonel burkulma ve yanal burulmalı burkulma sonucunda meydana gelmektedir. Ayrıca CFS elemanların ince cidarlı olması nedeniyle, lokal burkulma ve distorsiyonel burkulma yanal burulmalı burkulma ile etkileşimli olarak meydana gelebilmektedir (Kankanamge, 2010).

2.1.1 Lokal burkulma

Lokal burkulma modu kesiti oluşturan yüzeylerin kendi içinde bozulmasıyla oluşan göçme modudur. Bu göçme modunda birleşim yüzeyleri bozulmamaktadır. Ayrıca lokal burkulma oluşan kesitte yanal deplasman ve dönme oluşmamaktadır (Şekil 2.6). Lokal burkulma modu diğer burkulma modlarına göre daha kısa yarım dalga boylarında ve kesitin basınç bölgesinde meydana gelmektedir. Şekil 2.7’de dört tarafı basit mesnetli dikdörtgen plağın, x ekseninde basınç yüklemesi etkisinde oluşan burkulma verilmiştir.

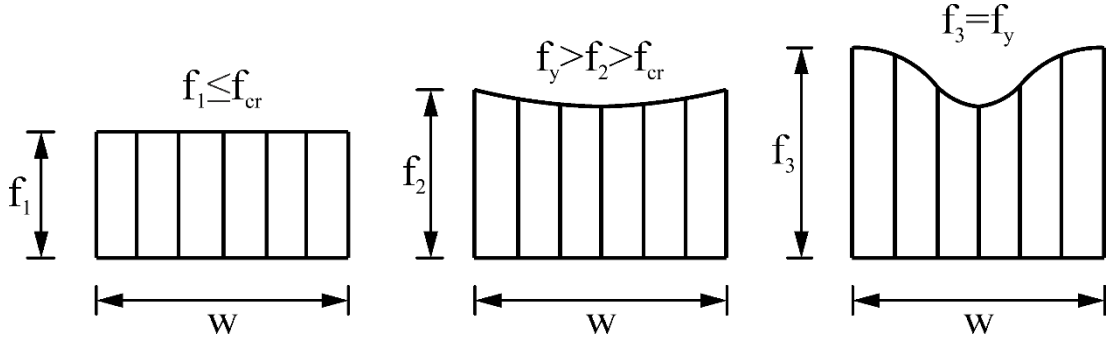


Şekil 2.6. Tırnaklı C kesitin tipik lokal burkulma şekli.



Şekil 2.7. Basit mesnetli plağın burkulması (Yu vd., 2019).

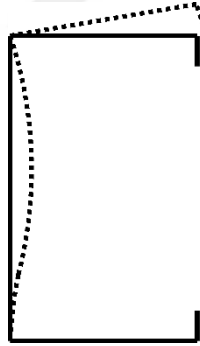
Tek boyutlu kolonlar gibi elemanların aksine, CFS elemanlarda burkulma gerilmesi değerine ulaşıldığında göçme meydana gelmemekte ve yük taşımaya devam etmektedir. Gerilmenin yeniden dağıtılması yoluyla burkulma sonrasında eleman yük taşımaya devam etmektedir (Şekil 2.8). Bu olgu burkulma sonrası davranış “postbuckling behavior” olarak bilinmektedir. Şekil 2.8’de ilk aşamada burkulma öncesi gerilme dağılımı sabittir. Burkulma sonrası gerilmenin bir kısmı plakanın kenar kısmına aktarılmakta ve düzgün olmayan bir gerilme dağılımı meydana gelmektedir. Gerilmenin yeniden dağılımı, kenardaki çeliğin akma gerilmesine ulaşmasına kadar devam etmekte, sonrasında ise plakada göçme meydana gelmektedir (Hancock vd., 2001; Zhao, 2014; Yu vd., 2019).



Şekil 2.8. Gerilmenin yeniden dağılımı basamakları (Yu vd., 2019).

2.1.2 Distorsiyonel burkulma

Distorsiyonel burkulma, lokal burulmalı burkulma olarak da bilinen, tırnaklı elemanlarda gövde başlık birleşiminde başlığın dönmesi ile meydana gelen burkulma modu olarak tanımlanmaktadır (Dubina ve Ungureanu, 2023). Lokal burkulma gibi kesit burkulma tipindedir (Şekil 2.9). Distorsiyonel burkulma modu, genellikle lokal burkulma ve yanal burulmalı burkulma modlarının arasındadır; lokal burkulma moduna göre daha uzun yarım dalga boyuna sahipken yanal burulmalı burkulma moduna göre ise daha kısa yarım dalga boyuna sahiptir.



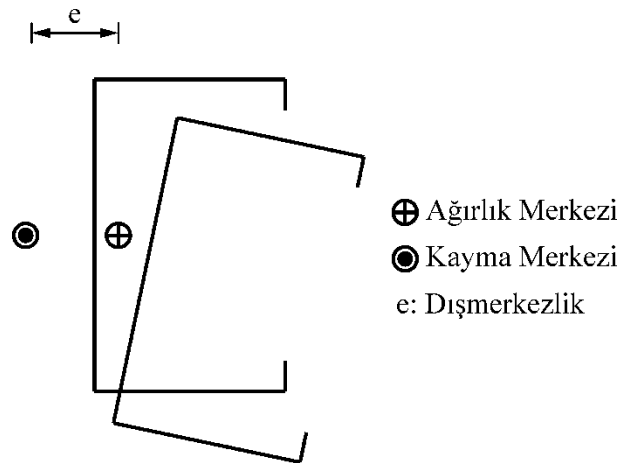
Şekil 2.9. Tırnaklı C kesitin tipik distorsiyonel burkulma şekli.

Soğukta şekil verilmiş C kesit geometrisine sahip bir elemanın distorsiyonel burkulmaya etki eden en önemli parametre gövde yüksekliği-başlık genişliği (w/h) oranıdır. Daha büyük gövde yüksekliğine sahip elemanlar daha esnektir ve böylelikle gövde başlık birleşiminde dönme rijitliği azalmaktadır. Bunun sonucunda daha düşük yük seviyelerinde burkulma meydana gelmektedir. Başlığın dar olduğu durumlarda ise, gövdenin lokal burkulması ile distorsiyonel burkulması yakın dalga boylarında meydana gelmekte ve distorsiyonel burkulma modu düşük gerilme seviyelerinde oluşmaktadır. Başlığın aşırı geniş olduğu durumda ise, lokal burkulma söz konusu

olmamaktadır. Ancak başlığı yerinde tutmak için ilave tırnak şeklinde elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Tırnak uzunluğu ile başlık genişliği eşit olduğunda, en yüksek distorsiyonel burkulma kapasitesine erişilmektedir (Schafer, 2000; Dubina vd., 2012).

2.1.3 Yanal burulmalı burkulma

CFS eğilme elemanlarda meydana gelen burkulma şekillerinden birisi de yanal burulmalı burkulmadır. Yanal burulmalı burkulma; eğilme elemanının kuvvetli ekseninde eğilme etkisindeyken zayıf eksen etrafında eğilmesi ile kesitin burulması sonucunda meydana gelen burkulma şeklidir. Lokal ve distorsiyonel burkulmadan farklı olarak yanal burulmalı burkulmada kesitte herhangi bir bozulma meydana gelmemekte ve eleman boyunca deformasyon oluşmaktadır (Bölükbaş, 2021). Tırnaklı C kesite ait yanal burulmalı burkulma şekli Şekil 2.10’da verilmiştir. C kesitlerin asal eksene göre simetrik olmaması geometrik merkez ile kayma merkezi arasında bir dışmerkezlilik oluşturmaktadır. Dışmerkezliliği kısmen de olsa azaltmak için C kesitler tırnaklı olarak üretilmektedir. Düşey yükler altında açık kesitlerde yük aktarımı kayma merkezinden sağlanmaktadır. Yükün kayma merkezinden uygulanmadığı durumda ise eğilme momentine ilave olarak büyük burulma momentleri oluşmaktadır. Et kalınlığı çok ince olan kesitte yanal burulmalı burkulma davranışı ortaya çıkmaktadır. Yanal burulmalı burkulmaya maruz kalan eğilme elemanları düzlem dışı eğilme yaparak moment kapasitesinin önemli oranda azalmasıyla stabilitesini kaybederek göçme meydana gelmektedir (Hancock vd., 2001; Li, 2004; Selvaraj ve Madhavan, 2019).



Şekil 2.10. Tırnaklı C kesitlerde yanal burulmalı burkulma şekli.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Son yıllarda CFS elemanların inşaat sektöründe kullanılması sürdürülebilir ve maliyet etkili yapı malzemelerine olan talebin artmasıyla yaygınlaşmıştır. Ayrıca konu akademik çevrelerde de güncel hale gelmiştir. Sonuç olarak CFS elemanların uygulama alanlarındaki kullanımının artması için yapılan araştırmalar kalıcı ve olumlu etki bırakma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, CFS elemanlardan oluşan konik bir silo çatısının parçası deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu doğrultuda yapılan literatür çalışmasında, CFS eğilme elemanlarının davranışlarını inceleyen çalışmalar ve konik silo çatıları ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur.

Hafif çelik yapıların Amerika ve Büyük Britanya’da inşaat sektöründe kullanımı 1850’li yıllara kadar dayanmaktadır. AISI tarafından ilk olarak 1946 yılında soğukta şekil verilmiş ince cidarlı yapılar için şartnamenin yayınlanmasıyla soğukta şekil verilmiş elemanların kullanımı ve gelişimi hız kazanmıştır. Daha sonra teknik gelişmeler ve elde edilen araştırma sonuçları ile AISI şartnamesi 1956, 1960, 1962, 1968, 1980, 1986, 1996, 2001, 2007, 2012 ve 2016 yıllarında yenilenmiştir. AISI şartnamesinin yanı sıra diğer ülkelerde de CFS elemanlar için şartnameler hazırlanmıştır. Avusturalya ve Yeni Zelanda’da AS/NZ4600’, Çin’de GB 50018-2002 ve Avrupa birliği ülkelerinde Eurocode EN 1993-1-3 şartnameleri kullanılmaktadır. (Yu vd., 1996; Hancock vd., 2001; Yu vd., 2019).

CFS elemanlardan kesiti C ve Z harfi formunda olanlar en yaygınlarıdır. Bu kesitler ince cidarlı olduğu için eğilme etkisinde lokal, distorsiyonel ve yanal burulmalı burkulma modlarına yatkındır. Özellikle C kesitli elemanlar genellikle çatı aşıklarında, kolon ve kiriş elemanlarda kullanılmaktadır. Bu nedenle C kesit geometrisine sahip elemanların eğilme altındaki davranışlarının araştırılması birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar geliştirilmiştir (Yu ve Schafer, 2003; Yu ve Schafer, 2006; Yu ve Schafer, 2007; Wang ve Zhang, 2009; Maduliat vd., 2012; Shifferaw ve Schafer, 2012; Pham ve Hancock, 2013; Laim vd., 2013; Martins vd., 2017; Fan vd., 2022).

Yu ve Schafer (2003) yaptıkları deneysel çalışmada yanal burulmalı burkulmayı ve distorsiyonel burkulmayı önlemek için C ve Z kesitlerin başlıklarına panel yerleştirmişlerdir. Böylelikle yalnızca lokal burkulma göçmesini elde etmeyi

hedeflemişlerdir. Gövde narinliğinin lokal burkulma üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Yu ve Schafer (2006) deneysel çalışmada C ve Z kesitlerde distorsiyonel burkulma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Yu ve Schafer (2003) çalışmalarından farklı olarak maksimum moment bölgesinde ve yalnızca moment etkisinde distorsiyonel burkulmanın elde edilmesi için sabit moment bölgesindeki panel çıkartılmıştır. Çalışmada, gövde narinliği (h/t), başlık narinliği (b/t), tırnak narinliği (d/t), ve gövde yüksekliğinin başlık genişliğine oranı (h/b) parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Yu ve Schafer (2007) daha önceki Yu ve Schafer (2003) ve Yu ve Schafer (2006) çalışmalarında C ve Z kesitler ile yapılan lokal ve distorsiyonel burkulma ile sonuçlanan deneylerin sonlu elemanlar modellerini oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar modelleri ile test verileri içim uyumlu sonuçlar elde edilmiş ve ilave değişkenler ile parametrik çalışma yapılmıştır. Ayrıca DSM yöntemi ile çalışmanın sonuçları incelenmiş ve genişletilmiştir.

Wang ve Zhang (2009) C kesitlerde lokal, distorsiyonel ve lokal-distorsiyonel etkileşimli davranış deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Tırnak olarak ifade edilen parçanın davranış ve dayanım üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre kesitteki tırnakların davranış ve dayanım üzerinde büyük etkisi olduğu belirlenmiştir.

Maduliat vd. (2012) çalışmalarında soğukta şekil verilmiş C kesitlerin elastik olmayan eğilme kapasitesini araştırmayı ve yeni tasarım kuralları ortaya koymayı amaçlamışlardır. Kesit boyunca sabit moment etkisinde yükleme durumunda tırnaksız, tırnaklı ve takviyeli tırnaklı geometriye sahip C kesitler için deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda, narinlik seviyesi düşük elemanlar önemli ölçüde elastik olmayan davranış göstermiştir. Ayrıca AS/NZS4600, Eurocode ve DSM yaklaşımlarının deneysel sonuçlara göre daha güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir. Bunun sonucunda, deneysel sonuçlar ile uyumlu olan bir takım tasarım önerileri sunulmuştur.

Shifferaw ve Schafer (2012) farklı göçme modlarının elde edildiği deneysel çalışmaların verileri analitik olarak çalışılmıştır. Bunun için daha önce yapılmış

Çalışmaların verilerinden yararlanılmış ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ile birleştirilmiştir. Lokal, distorsiyonel ve yanal burulmalı burkulma modları için geliştirilen hesaplama yöntemleri önerilmiştir. Ayrıca nerilen yöntemin güvenilir ve genel bir tahmin yaklaşımı sağladığı belirlenmiştir.

Pham ve Hancock (2013) C kesitlerin ve SupaCee olarak adlandırılan ek tırnak ve gövde takviyeli kesitlerin davranış ve dayanımları deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kesitin SupaCee olarak adlandırılan şekle getirilmesiyle kapasitenin %4.5 ile %22.4 arasında arttığı belirlenmiştir. Ayrıca araştırmacılar elde edilen sonuçlar ile DSM yaklaşımına önerilerde bulunmuşlardır ve önerilerin test sonuçları ile daha uyumlu olduğunu belirlemişlerdir.

Laim vd. (2013) kesitleri C, I, R ve 2R şeklinde olan kirişlerin eğilme davranışı deneysel ve nümerik olarak çalışılmıştır. Her bir kesite dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar doğrulanmış ve ilave parametrik çalışma yapılmıştır. C kesitler için farklı narınlık oranları ve farklı kiriş boyları dikkate alınarak sonuçlar EN 1993-1.1 şartnamesi ile karşılaştırılmıştır.

Martins vd. (2017) araştırmacılar CFS kirişlerin basit mesnetli olarak eğilme momenti etkisi altındaki davranışlarını nümerik çalışma ile ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Bunun için tırnaklı C, Z ve şapka kesitler incelenmiştir. Analiz edilen kirişlerde, burkulma sonrası distorsiyonel burkulma davranışı ve taşıma kapasiteleri üzerine etkisi olan parametreler değerlendirilmiştir. Başlık-gövde oranı ve tırnak başlık oranı ile distorsiyonel kritik yarım dalga sayılarının etkisi en önemli değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Araştırmacılar alışma sonucunda, DSM yöntemi ile elde edilen tasarım eğrisinin bazı kirişlerin davranışının tahmininde yeterli olmadığını değerlendirilerek yeni bir DSM tasarım eğrisi önerisinde bulunmuşlardır.

Fan vd. (2022) soğukta şekil verilmiş tırnaklı C kesitlerin güçlü eksen eğilmesi altında lokal burkulma kapasitesini belirlemek amacıyla deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. Gövde yüksekliğinin ve başlık genişliğinin davranışa etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada kiriş elemanlarına dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar tarafından kirişlerin davranışlarını ve lokal burkulma kapasitelerini

simüle etmek için sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve deneysel çalışma ile doğrulaması yapılmıştır.

Soğukta şekil verilmiş C kesit geometrisine sahip çelik eğilme elemanlarının lokal ve distorsiyonel burkulma davranışlarının incelenmesinin yanı sıra yanal burulmalı burkulma davranışı da bir takım araştırmacı tarafından deneysel ve nümerik olarak çalışılmıştır (Pi vd., 1998; Put vd., 1999; Kankanamge ve Mahendran, 2013; Llano vd., 2013).

Pi vd. (1998) çalışmalarında C kesitlerin elastik olmayan yanal burkulma davranışını incelemek için sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Kesitteki artık gerilmelerin, kesitteki ilk kusurların, moment dağılımının ve kesite yükün uygulanma noktasının kiriş dayanımı üzerinde etkili olduğu belirlenerek kapasitenin hesaplanabilmesi için yaklaşımlar önermişlerdir.

Put vd. (1999) C kesitlerin yanal burkulma kapasitelerinin belirlenmesi için deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Kesit ölçüleri değiştirilen kirişler basit mesnetli olarak hareketli bir yükleme sistemi ile test edilmiştir. Araştırmada yanal burkulma sonuçlarının teorik tahminler ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca AS 4100 ve AS/NZ4600 şartnamesi yaklaşımı ile sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kankanamge ve Mahendran (2013) C kesitli elemanlarda yanal burulmalı burkulma davranışı nümerik olarak çalışılmıştır. Bunun için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Nümerik analiz sonuçları birçok şartname yaklaşımı ile karşılaştırılarak yeni tasarım kuralları önerilmiştir.

Padilla-Llano vd. (2013) yaptıkları deneysel çalışmada yanal hareketine izin verilen C kesitlerin çevrimsel tekrarlı yükler altındaki yanal burulmalı burkulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada kesit yüksekliği değişken olarak dikkate alınmıştır.

Konik silo çatıları rüzgar, kar ve çatı üzerine kurulan yürüme yolları, doldurma sistemleri gibi yüklerin etkisi altındadır. Hesap yüklerinin belirlenmesinde, tasarım ve yapım aşamasında kaynaklanan eksiklikler nedeniyle olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. (Sadovski vd., 2012; Krentowski, 2014; Lobkina, 2021). Silo çatısı silo duvarı üzerinde oluşacak gerilmeleri azaltmakta, yapıya rijitlik ve stabilite sağlamakta

ve depolanan ürünün atmosfer ile olan bağlantısını kesmektedir. (Briassoulis ve Pecknold, 1998; Portela ve Godoy, 2005).

Ramirez-Gomez vd. (2014) 18.34 m çapında metal bir silo çatısının davranışını deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Çatı kirişleri düğüm noktalarından zemine bağlanan halatlar ile tekil olarak çekilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar modeli ile deneysel çalışmanın doğrulanması yapılmıştır. Ayrıca araştırmacıların bir diğer çalışmasında, Gallego vd. (2018) kar yüklerinin çelik silo çatısına etkisini deneysel ve nümerik olarak çalışılmıştır. Bunun için dengeli kar yüklemesi ve dengesiz kar yüklemesi durumları dikkate alınmıştır. Dengeli kar yüklemesinde her bir düğüm noktasında yükleme yapılırken dengesiz kar yüklemesi durumunda ise sadece çatının bir bölümüne yükleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ile regresyon analizi yapılarak araştırmacılar tarafından yüksek korelasyon katsayısı (R^2) elde edilmiş ve sürüklenen kar etkisinin Eurocode şartnamesinde dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir.

Bölükbaş (2021) tez çalışmasında CFS elemanlar ile üretilen konik silo çatısının düşey yükler altındaki davranışını deneysel ve nümerik incelemiştir. Çatı çapı 18 metre ve eğimi 30° olarak belirlenmiştir. Yük düğüm noktalarına kancalar ile asılan ağırlıklar ile uygulanmıştır. Tasarım kar yükünün %35 ve %70'i düzeyine kadar yükleme yapılmıştır. Deneysel sonuçların doğrulanması için sonlu elemanlar modeli ABAQUS yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda çeyreklik yüklemelerde diğer yükleme durumuna göre daha fazla deplasman değerlerinin elde edildiği ve sonlu elemanlar modelinin çatı davranışının tahmininde deneysel çalışma ile tutarlı olduğu belirtilmiştir.

CFS eğilme elemanları ile yapılan çalışmaların eleman davranışı ile sınırlı kalması ve silo çatısı ile yapılan çalışmalarda deneysel ve nümerik analizlerde elastik sınır içerisinde kalınarak göçme durumlarının incelenmemesi bu çalışmanın yapılmasına teşvik etmiştir. Çalışmada, konik silo çatısının bir parçası olarak üretilen kiriş sisteminin düşey yükler altındaki davranışının deneysel ve nümerik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı mesnet koşulları, kirişlerin yönlendirmesi ve bağlantı kirişleri arası mesafe deneysel çalışmanın değişkenleridir. Deneysel çalışmanın doğrulanması amacıyla, ABAQUS programı kullanılarak deney elemanının modeli oluşturulmuştur. Analizler yapılarak sonuçlar doğrulanmıştır. Sonrasında, ilave parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmalarda deneysel çalışmada göz önüne alınmayan ilave

değişkenler incelenmiştir. Bu değişkenler kiriş gövde yüksekliğinin kesit kalınlığına oranı (h/t) ve farklı kalınlıklardaki bağlantı kirişlerinin kullanılmasıdır. Ayrıca kirişlerin eğilme momenti taşıma kapasiteleri AISI S100-16 şartnamesine göre hesaplanarak deneysel ve nümerik çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Materyal ve Metot

Deney elemanları DX51D sınıfı sıcak daldırma kaplamalı çelik sac levhanın şekillendirilmesiyle üretilmiştir. DX51D kodunda ilk D harfi soğuk şekillendirmeyi, X harfi rulolama (sıcak veya soğuk) işleminin belirtilmediğini, 51 sayısı çelik seri numarasını ve son D harfi ise sıcak daldırma galvaniz işlemini ifade etmektedir. Kullanılan çelik düşük karbonlu çelik sınıfındadır. DX galvanizli çelik sac levhalar ihtiyaca göre farklı kimyasal özelliklerde üretilmektedir. DX51D inşaat, beyaz eşya, otomotiv ve tarım makinaları gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Diğer yandan, 52-55 çelik numaralı sac levhalar daha düşük karbon içeriğine sahip olduğu için daha yüksek süneklik ihtiyacı olan uygulamalarda tercih edilmektedir. DX galvanizli sac levhalar TS EN 10346 standardına göre üretilmektedir.

Kimyasal bileşim yüzdelerinin belirlenmesi için OBİAL SİLO kalite kontrol laboratuvarında spektrometre analizi yapılmıştır. Spektrometre analizi elektrik akımı ile numunenin düz yüzeyi yakılarak buharlaşma ile malzeme bileşeninde bulunan karbon, silisyum, mangan, fosfor gibi farklı katkı maddelerinin kütle oranı (%) olarak elde edilmesi yöntemidir. TS EN 10346 standardına göre DX çelik malzemelerin tolerans ağırlıkça kimyasal bileşim yüzdeleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Spektrometre analizi yapılan numune Şekil 4.1’de ve analiz sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. TS EN 10346’ya göre DX malzemelerin tolerans kimyasal bileşim yüzdeleri.

Çelik Sınıfı		Kimyasal Bileşim Yüzdeleri (Kütlece)					
Çelik ismi	Çelik numarası	C	Si	Mn	P	S	Ti
DX51D	1.0226	0.18		1.20	0.12		
DX52D	1.0350						
DX53D	1.0355		0.50			0.045	0.30
DX54D	1.0306	0.12		0.60	0.10		
DX55D	1.0309						



(a)



(b)

Şekil 4.1. Spektrometre numunesi ve cihazı.

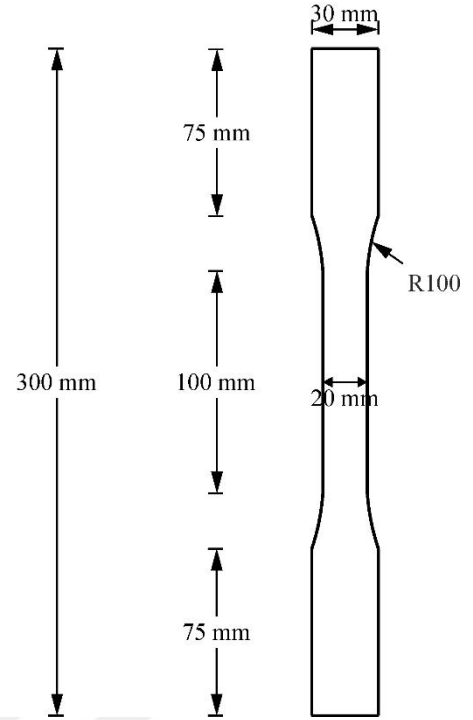
Çizelge 4.2. Spektrometre analiz sonuçları özeti.

Element	Kimyasal Bileşim Yüzdesi	Tolerans Değerleri
Karbon (C)	0.17	0.18
Silisyum (Si)	0.42	0.5
Mangan (Mn)	1.15	1.2
Fosfor (P)	0.107	0.12
Kükürt (S)	0.035	0.045
Titanyum (Ti)	0.14	0.30

Kullanılan çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için çekme testi uygulanmıştır. ASTM E8/E8M-13a'ya uygun olarak kirişlerin gövde ve başlıklarının düz bölgesinden alınan numuneler ile çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri kalınlıkları 2.5 mm ve 2 mm olan numuneler ile yapılmıştır. (Şekil 4.2 (a)). Numunelerin geometrisi Şekil 4.2 (b)'de verilmiştir. Çekme testleri 600 kN kapasitesi 0.01 mm/sn yükleme hızlı çekme test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerdeki uzamaları ölçmek için 100 mm genişlikte ekstansometre cihazı kullanılmıştır. Çekme numuneleri elemanların 2 mm ve 2.5 mm kalınlık için gerilme-birim şekil değiştirme (%) grafikleri Şekil 4.3 ve 4.4'te verilmiştir. Kullanılan çeliğin mekanik özellikleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.2. Çekme testi (a) çekme test cihazı, (b) numunelerin geometrisi.



Şekil 4.3. 2 mm kalınlıktaki numune için gerilme-birim şekil değişirme eğrisi.



Şekil 4.4. 2.5 mm kalınlıktaki numune için gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

Çizelge 4.3. DX51D elemanların mekanik özellikleri.

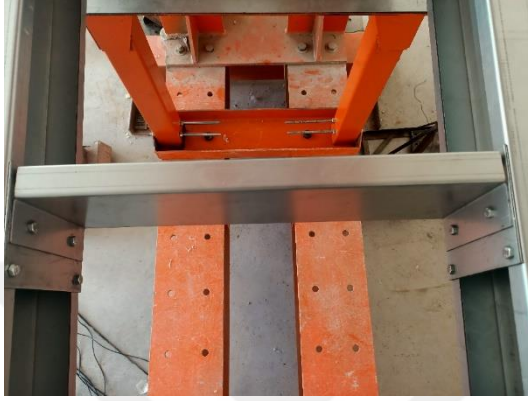
Kupon Kalınlıkları	E_s (GPa)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_f (%)
2	202.8	326.5	331.15	25.1
2.5	198.8	321.6	326.7	22.2
TS EN 10346			270-500	En düşük 22

4.2 Deney Programı ve Deney Tekniği

Kiriş elemanlarının birbirine bir açı ile bağlanması sonucunda konik çatı yüzeyi elde edilmektedir. En yaygın olarak tercih edilen silo yarıçapı 9 m'dir. Bu amaçla, deneysel çalışmada, $\frac{1}{2}$ ölçekli, 4.5 m uzunluğunda kiriş elemanlarından oluşturulan deney elemanı tasarlanmıştır. Kirişler arasındaki açı 9° 'dir. 4500 mm uzunluğundaki kirişler C-180x64x28-2.5 olarak isimlendirilirken, boyları değişken olan bağlantı kirişleri ise C-175x40x18.5-2 olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4.5). Elemanların birbirine bağlanmasında bulonlu birleşim kullanılmıştır. Kirişler birbirlerine ve uç bağlantı elemanlarına bağlanmasında M8 bulonlar kullanılırken, uç bağlantı elemanların mesnetlenmesinde M10 bulonlar kullanılmıştır. Bulonların kalite sınıfı 8.8'dir. Kirişlerin birbirine bağlanması ve mesnetlenmesi Şekil 4.6 (a-f)'de verilmiştir.

Gövde
Yükseklği
 Tımak
Uzunluğu
C-180x64x28-2.5
 Kesit
Geometrisi Genişlik Kalınlık

Şekil 4.5. Kesit geometrisinin isimlendirilmesi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



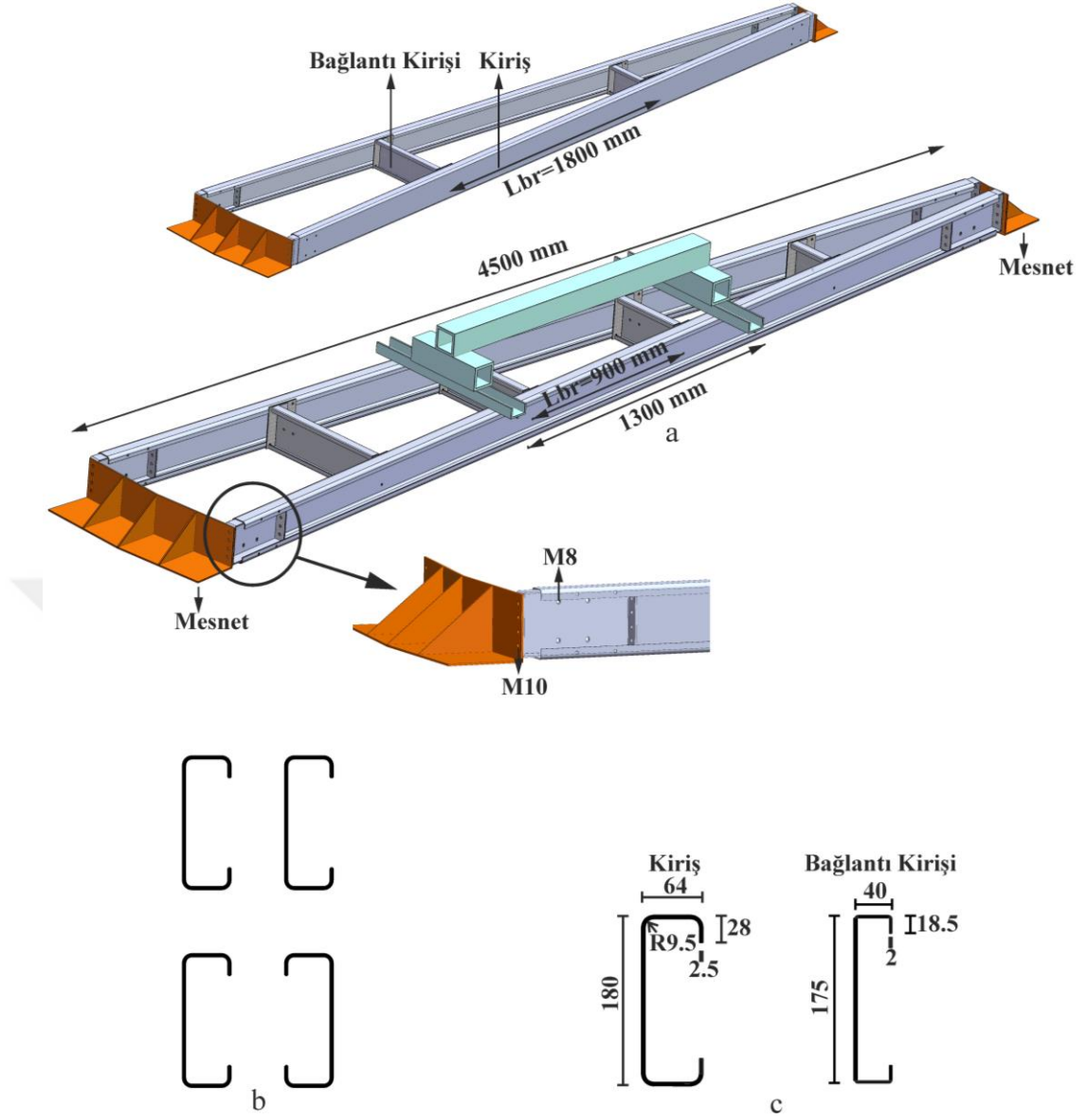
(f)

Şekil 4.6. (a) Kirişlerin birbirine bağlanması, (b) kirişlerin uç bağlantı elemanları ile mesnetlenmesi, (c-d) basit mesnet ve (e-d) sabit mesnet detayları.

Deney elemanlarına mesnetleri arası 1300 mm olan reaksiyon kirişi kullanılarak iki noktadan yükleme yapılmıştır. Böylelikle göçmenin sabit moment bölgesinde olması amaçlanmıştır (Şekil 4.7 (a)). Yükleme esnasında lokal ezilmelerin engellenmesi amacıyla yükleme noktalarında kesit içerisine 80x50x175 mm boyutlarında ahşap takozlar yerleştirilmiştir (Şekil 4.8 (d)). Yükleme 500 kN kapasiteli bir hidrolik krik ve el kumandalı hidrolik pompa aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yük artım hızı 0.25 kN/sn'dir. Uygulanan yük 100 kN kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Testlere göçme meydana gelene kadar devam edilmiştir. Deney elemanlarında deplasman ölçümleri potansiyometrik cetveller ile gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin orta noktasından bir adet düşey, iki adet yanal deplasman, mesnet çökmeleri ve mesnet dönmeleri olacak şekilde deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8 (b-c)). Deneylerde deplasman saniyede 4 veri olacak şekilde veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

Laboratuvar çalışması kapsamında, farklı mesnet koşulları, kirişlerin yönlendirmesi ve bağlantı kirişleri arası mesafe gibi parametreler dikkate alınmıştır. Basit mesnetli deney elemanlarında (Şekil 4.6 (c-d)) toplamda 6 farklı deney elemanı tasarlanmıştır. Kirişlerin aynı yönlü ve ters yönlü olarak yönlendirilmesi yapılmıştır. Her bir yönlendirme için bağlantı kirişlerinin kullanılmadığı, 1800 mm ve 900 mm olan bağlantı kirişleri arası mesafenin etkisi incelenmiştir. Öte yandan, sabit mesnetli deney elemanlarında (Şekil 4.6 (e-f)) ise toplamda 4 farklı kiriş sistemi oluşturulmuştur. Kirişlerin aynı yönlü ve ters yönlü olarak yönlendirmesi yapılmıştır. Her bir yönlendirme için bağlantı kirişleri arası mesafenin 1800 mm ve 900 mm olduğu durumlar incelenmiştir. Kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin enkesit özellikleri Şekil 4.7 (c)'de verilmiştir.

Deney elemanlarının isimlendirilmesi basit mesnetli deney elemanları için kirişler aynı yönlü ve bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm ise AD1800 olarak yapılırken sabit mesnetli deney elemanında ise “AD1800SM” olarak yapılmıştır. Burada “AD” kirişlerin aynı yönde olduğunu, “1800” bağlantı kirişleri arasındaki mesafeyi ve “SM” ise sabit mesnetli olduğunu ifade etmektedir.





(a)



(b)



(c)

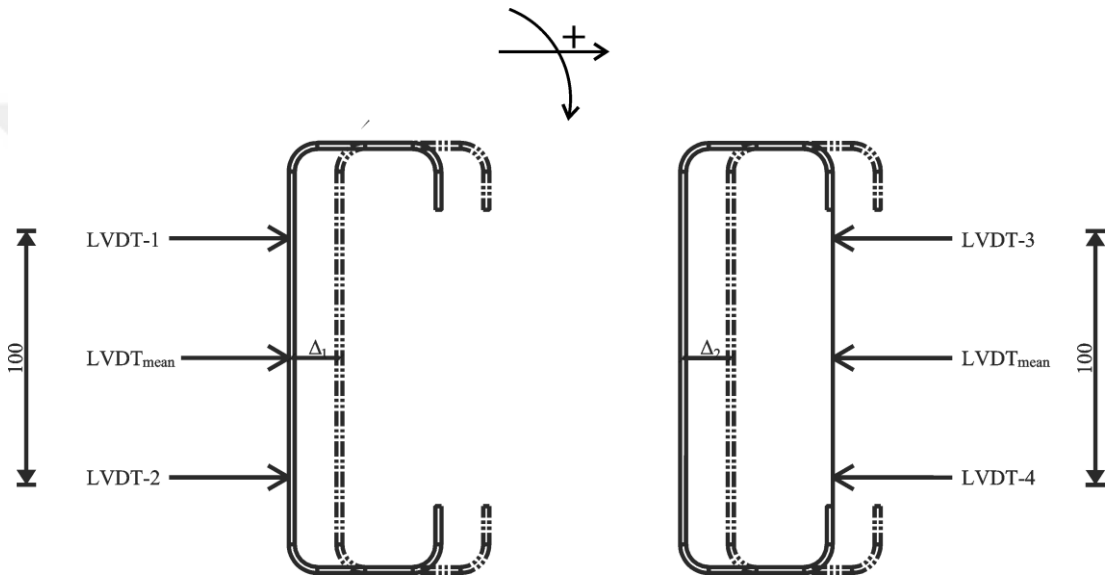


(d)

Şekil 4.8. (a) Deney sistemi, (b) orta nokta düşey ve yanal deplasman, (c) mesnet düşey ve yanal deplasman ölçümleri ve (d) kesit içine ahşap takoz yerleştirilmesi.

4.2.1 Kirişlerin yanal öteleme ve dönme açılarının belirlenmesi

Kirişlerin yanal öteleme ve dönme açılarının belirlenebilmesi için kesit üzerine üst ve alt başlıklara potansiyometrik cetveller yerleştirilmiştir. Ön ve arka kirişlerin yanal ötelemelerinin belirlenebilmesi için üst ve alt başlıklardan alınan yanal deplasman ölçümleri geometrik benzerlik yardımıyla kesit ortasındaki yanal hareket hesaplanmıştır. Grafiklerde pozitif olarak kabul edilen yanal öteleme ve dönme açısı yönleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Dönme açısının ve yanal ötelemelerin belirlenebilmesi için sırasıyla Denklem 4.1 ve 4.2’den yararlanılmıştır.



Şekil 4.9. Kirişlerde yanal öteleme ve dönme açılarının belirlenmesi.

$$(\alpha) = \tan^{-1} \left[\frac{(LVDT_1) \pm (LVDT_2)}{100} \right] \text{ ya da } \left[\frac{(LVDT_3) \pm (LVDT_4)}{100} \right] \quad (4.1)$$

$$\Delta_{1-2} = \frac{(LVDT_1) + (LVDT_2)}{2} \text{ ya da } \frac{(LVDT_3) + (LVDT_4)}{2} \quad (4.2)$$

4.3 Deney Sonuçları

4.3.1 AD4500 deney elemanı

AD4500 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve bağlantı kirişleri kullanılmayan basit mesnetli deney elemanıdır. Yük 4 kNm moment düzeyine kadar artmış, bu yük düzeyinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yükleme devam edildiğinde deney elemanı düzlem dışı hareket ederek stabilitesini

kaybetmiştir. Yük 4.9 kNm düzeyine kadar çıkmış ve eleman daha fazla yük taşıyamayarak göçme gerçekleşmiştir. Göçme, ön ve arka kirişin açık kesit tarafına doğru yanal öteleme ve dönme yapmasıyla yanal burulmalı burkulma modunda gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.10'da ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Göçme sırasında ön kiriş 22.3° , arka kiriş ise 18.7° dönmüştür. Ön ve arka kirişlerden ölçülen moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.12 ve 4.14'te verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 46.5 mm, arka kirişte ise 26.2 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.15'te verilmiştir. Deney elemanında bağlantı kirişlerinin kullanılmaması çok düşük yük düzeylerinde kirişlerin dönmesine ve düzlem dışı hareket etmesine neden olmuştur.



(a)

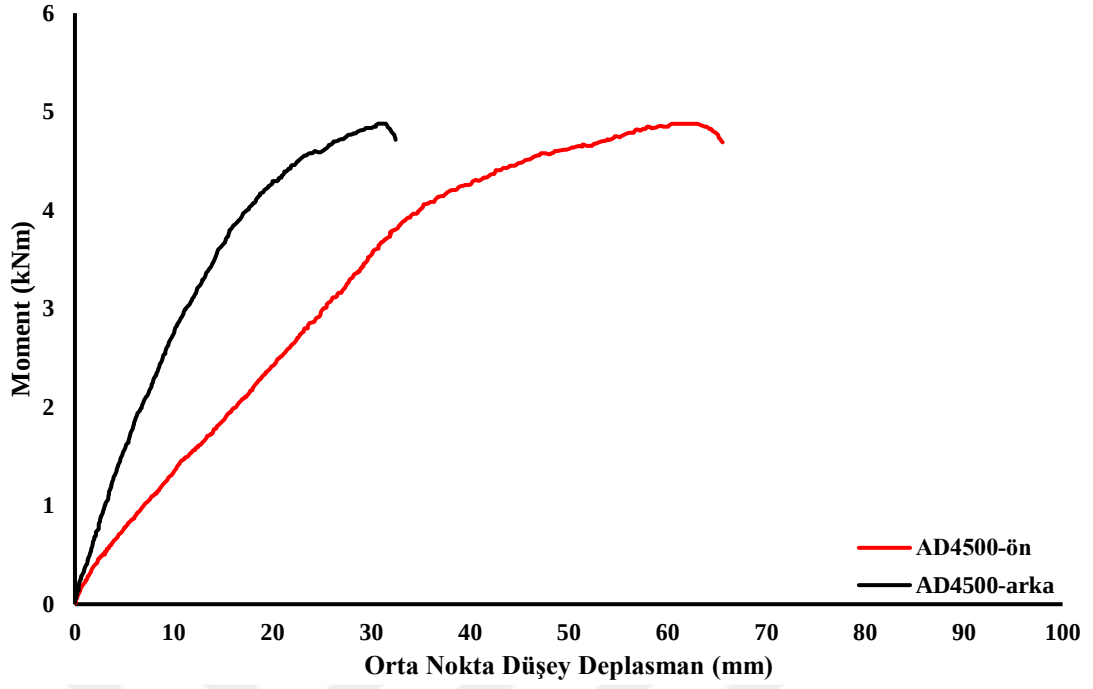


(b)

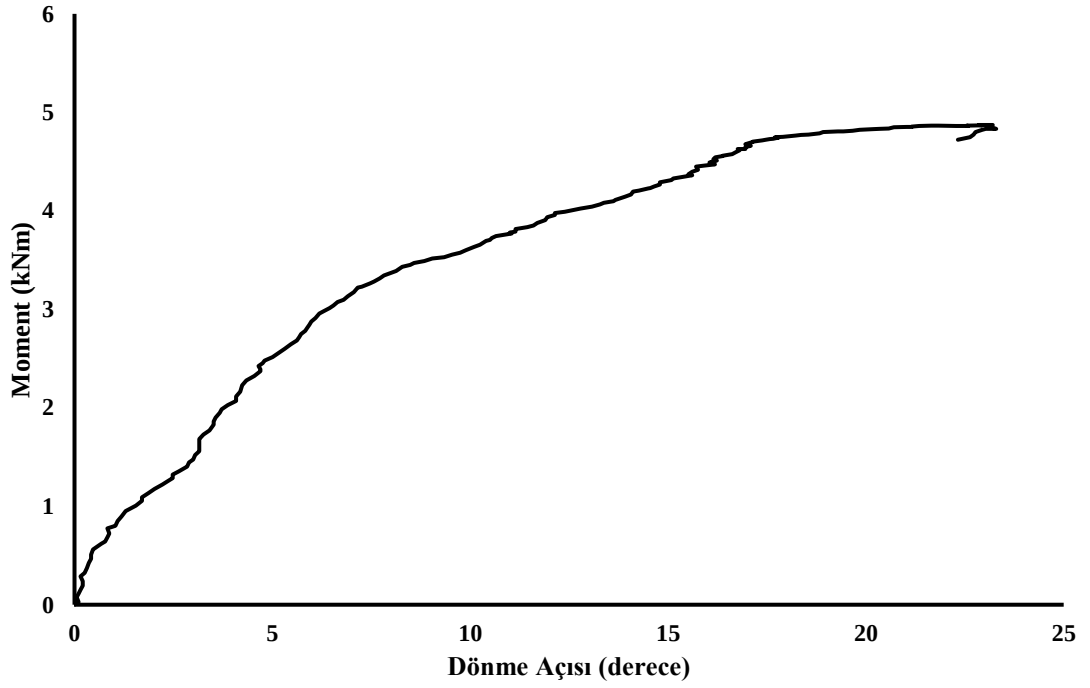


(c)

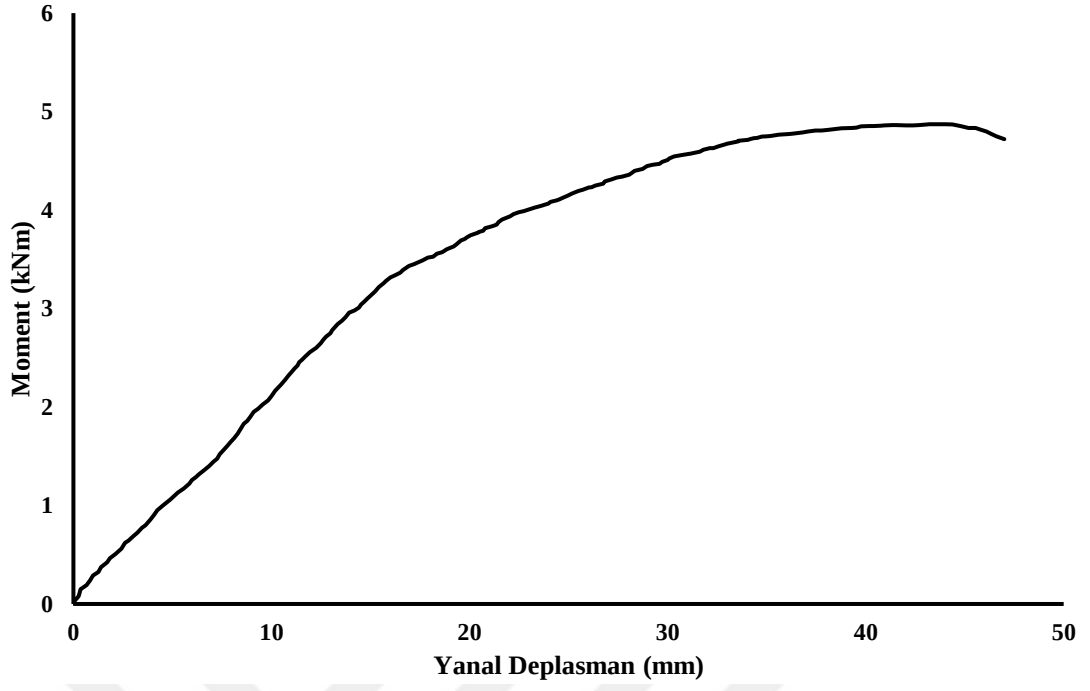
Şekil 4.10. AD4500 deney elemanına ait göçme şekli.



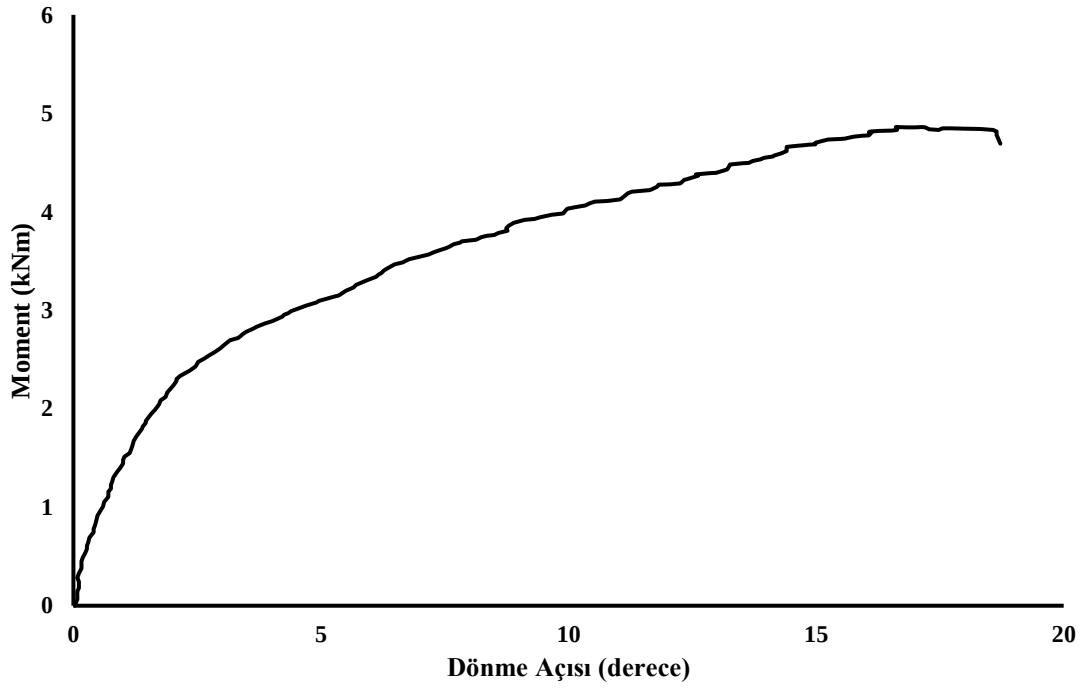
Şekil 4.11. AD4500 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



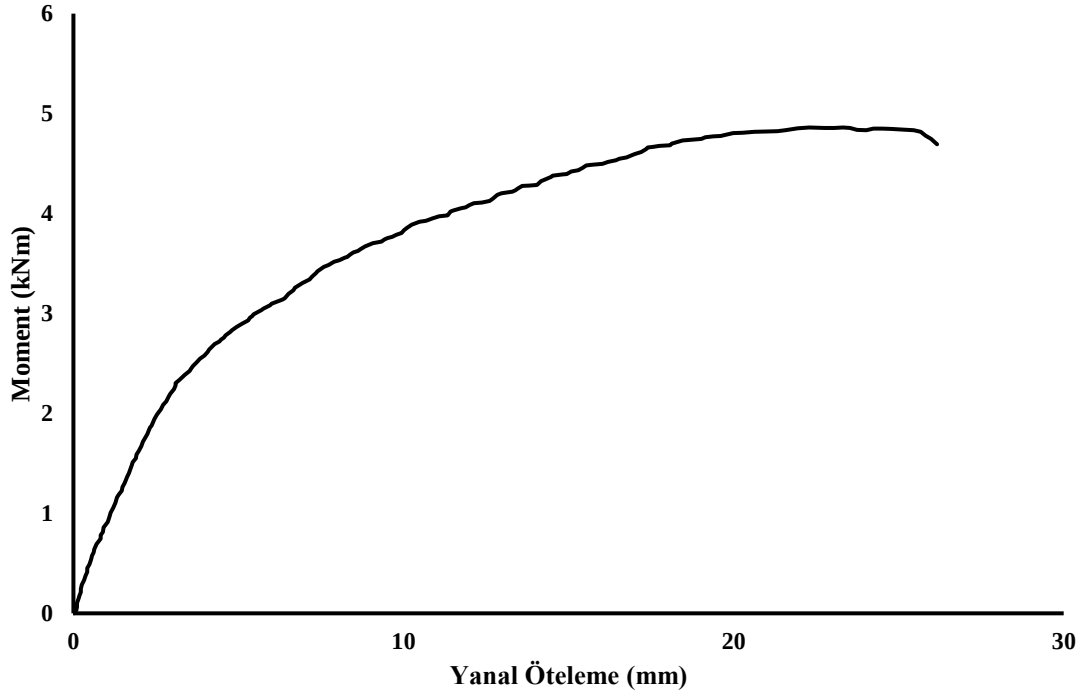
Şekil 4.12. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.13. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.14. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.15. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.2 TD4500 deney elemanı

TD4500 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının ters doğrultuda olduğu ve bağlantı kirişleri kullanılmayan basit mesnetli deney elemanıdır. Yük 3 kNm moment seviyesine kadar artmış, bu yük seviyesinden sonra dönme açısının artmasıyla birlikte belirgin bir şekilde ön ve arka kirişlerde rijitlik azalmaya başlamıştır. Yüklemeye devam edildiğinde deney elemanı düzlem dışı hareket ederek stabilitesini kaybetmiştir. Yük 5 kNm moment seviyesine kadar artmış ve deney elemanı daha fazla yük taşıyamayarak göçme meydana gelmiştir. Göçme, ön ve arka kirişin açık kesit tarafına doğru yanal öteleme ve dönme yapmasıyla yanal burulmalı burkulma modunda gerçekleşmiştir. Deney elemanının göçme fotoğrafı Şekil 4.16'da ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.17'de verilmiştir. Göçme sırasında ön ve arka kiriş 29° dönmüştür. Ön ve arka kirişe moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 44 mm, arka kirişte ise 27.6 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.21'de verilmiştir. Deney elemanında bağlantı kirişlerinin kullanılmaması çok düşük yük düzeylerinde kirişlerin dönmesine ve düzlem dışı hareket etmesine neden olmuştur.



(a)

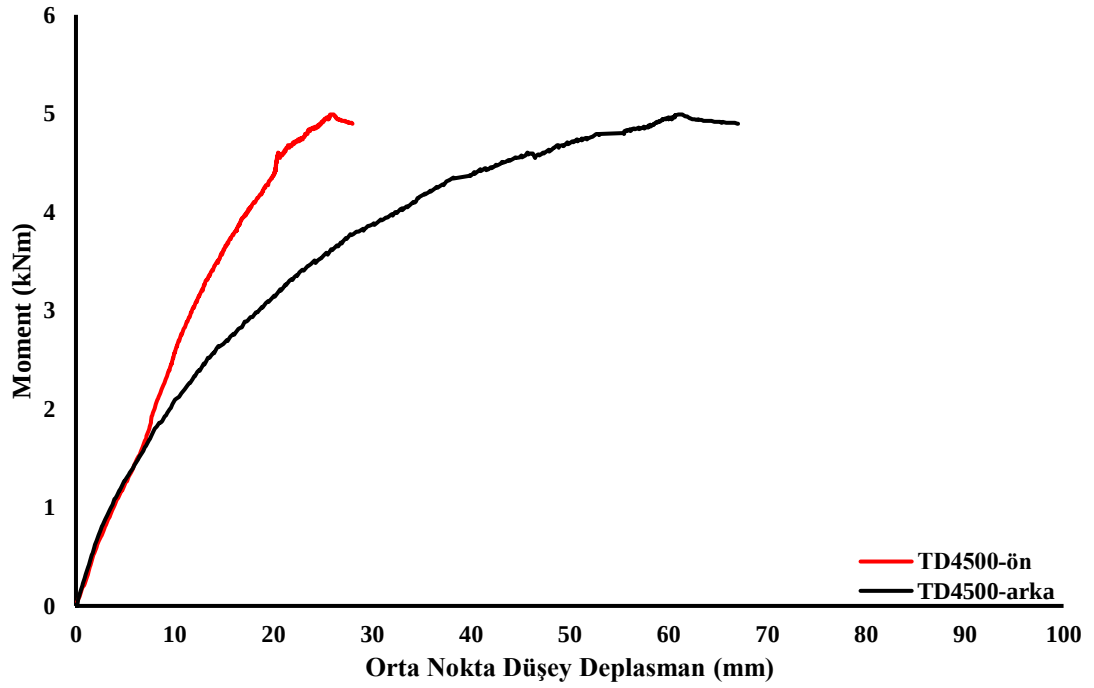


(b)

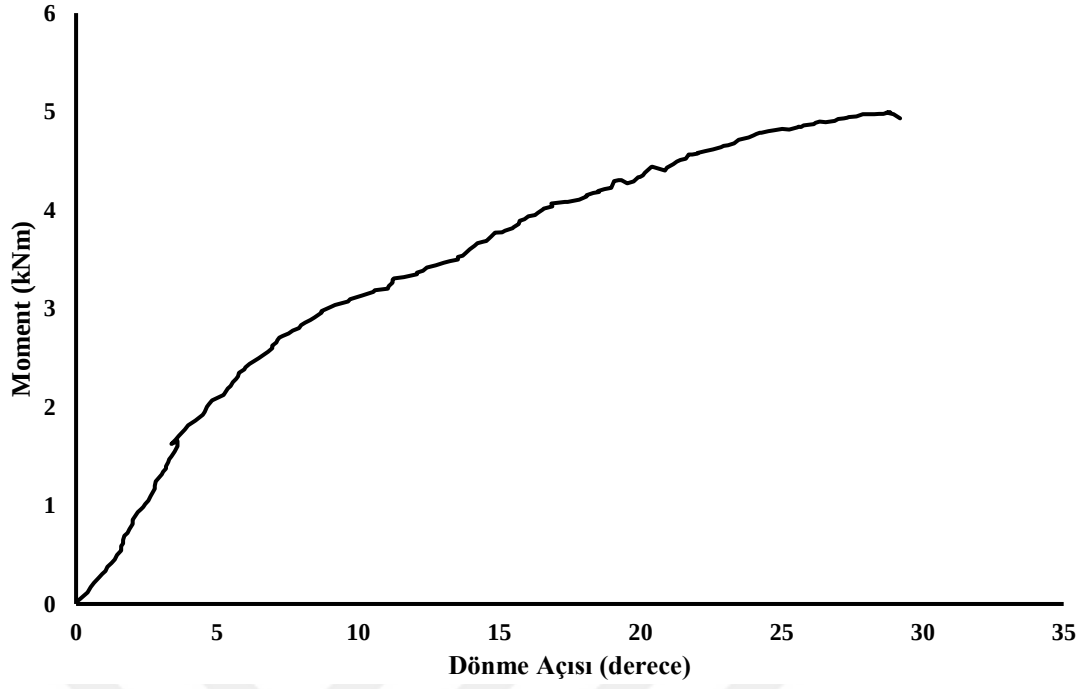


(c)

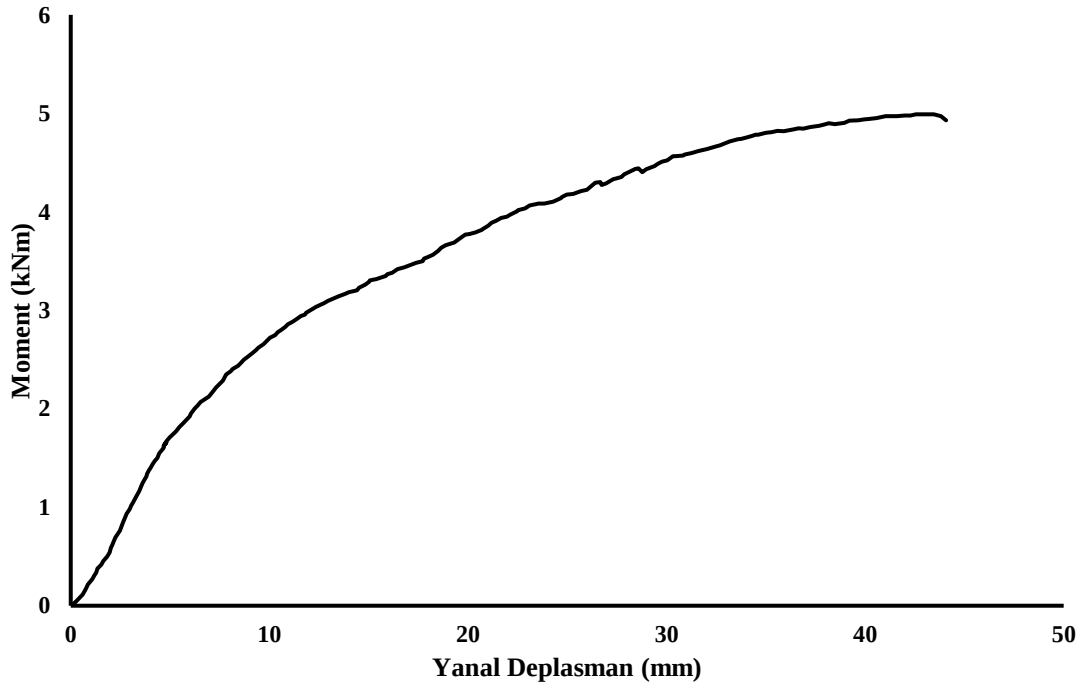
Şekil 4.16. TD4500 deney elemanına ait göçme şekli.



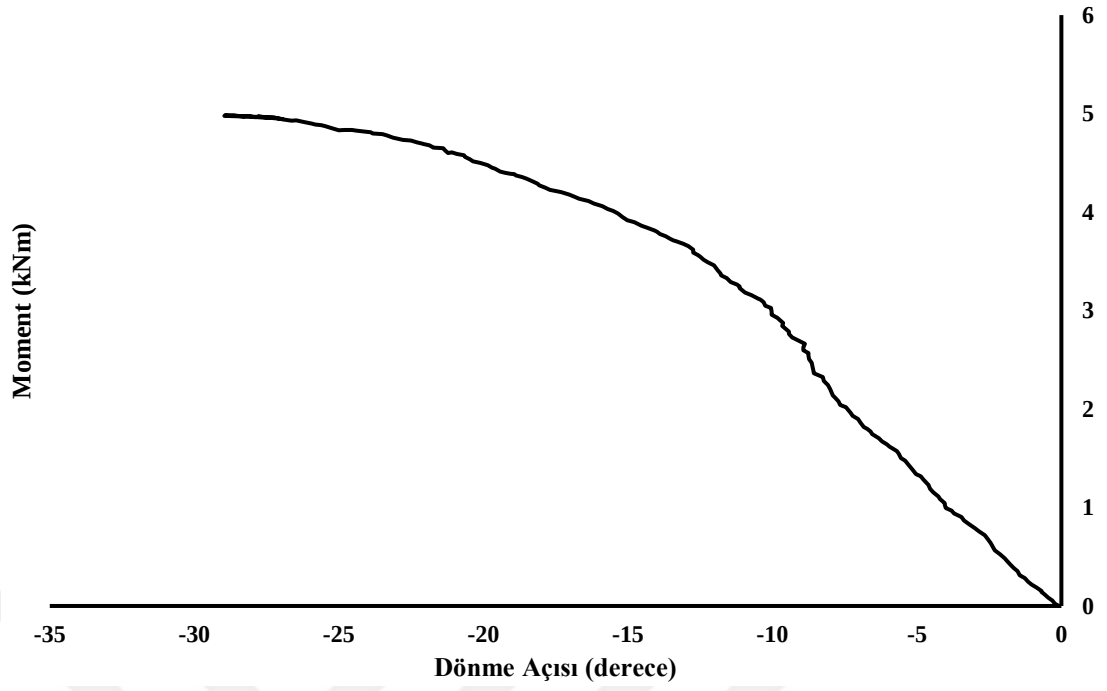
Şekil 4.17. TD4500 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



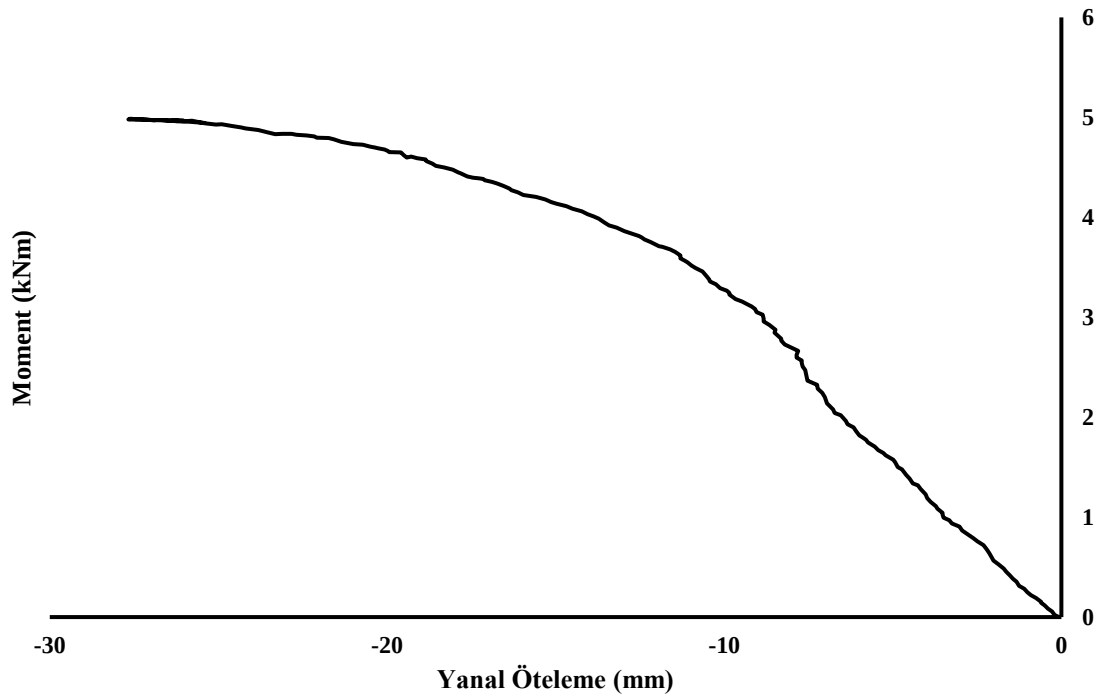
Şekil 4.18. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.19. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.20. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.21. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.3 AD1800 deney elemanı

AD1800 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve 1800 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan basit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında rijitlik düzeyinde belirgin bir azalma olmadan yük 13.1 kNm maksimum moment seviyesine kadar artmıştır. Bu seviyeden sonra deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, yanal burulmalı burkulmanın ve arka kiriş gövdesinde lokal burkulmanın birlikte oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.22’de ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.23’te verilmiştir. Yanal burulmalı burkulma davranışı bağlantı kirişlerinin ön kirişe bağlanan üst kısmını basınç etkisi altında bırakırken, arka kirişe bağlanan bölümünü ise çekme etkisi altında bırakmaktadır. Bu çekme etkisi, arka kiriş bağlantı levhasının üst parçasında lokal ezilmelere yol açmıştır (Şekil 4.22 (c-d)). Göçme sırasında ön kiriş 7° , arka kiriş ise 10.7° dönmüştür. Ön ve arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.24 ve Şekil 4.26’da verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 8 mm, arka kirişte ise 37.4 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.27’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.22. Deney elemanın göçme şekli (a) ve (b).

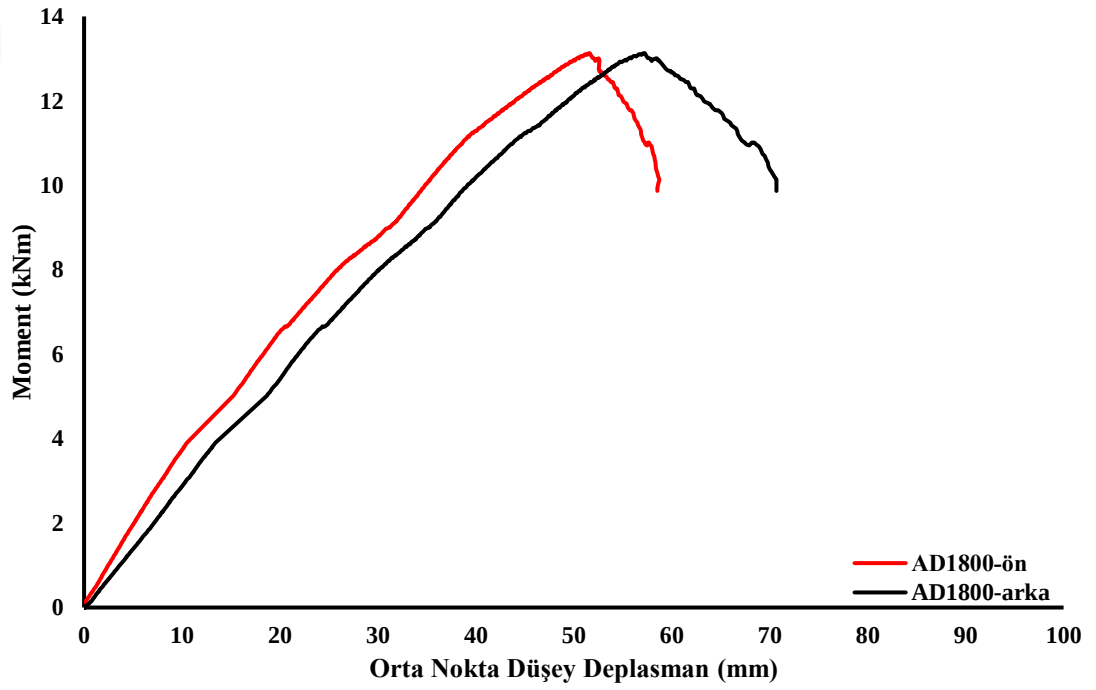


(c)

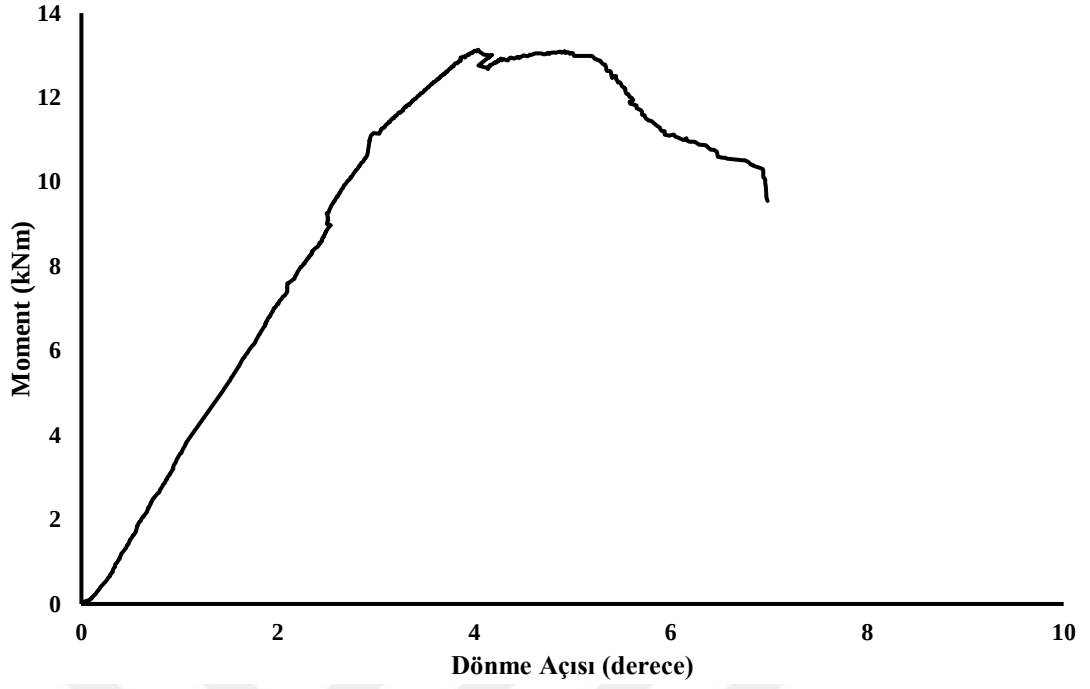


(d)

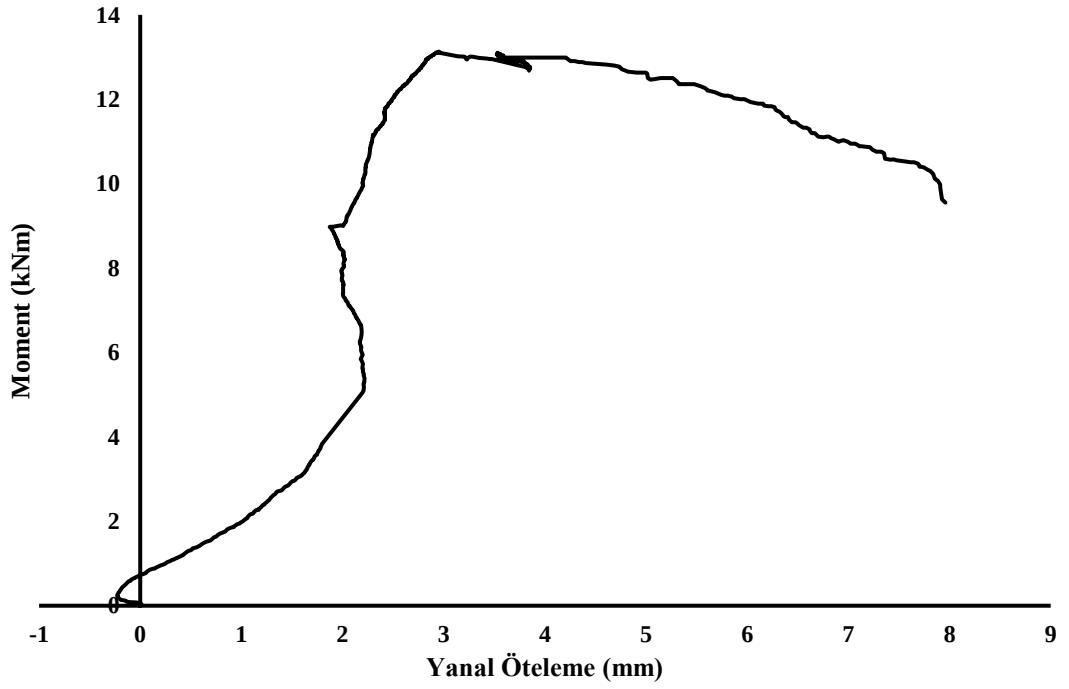
Şekil 4.22 (devam). Bağlantı kirişi levhasında meydana gelen lokal ezilme (c) ve (d).



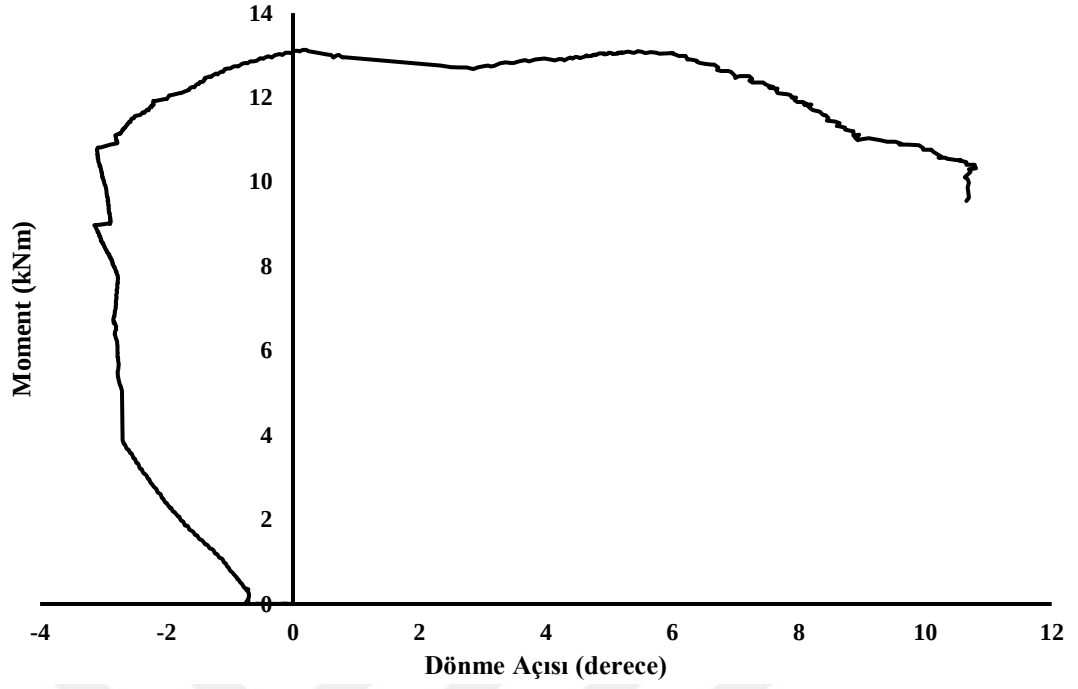
Şekil 4.23. AD1800 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



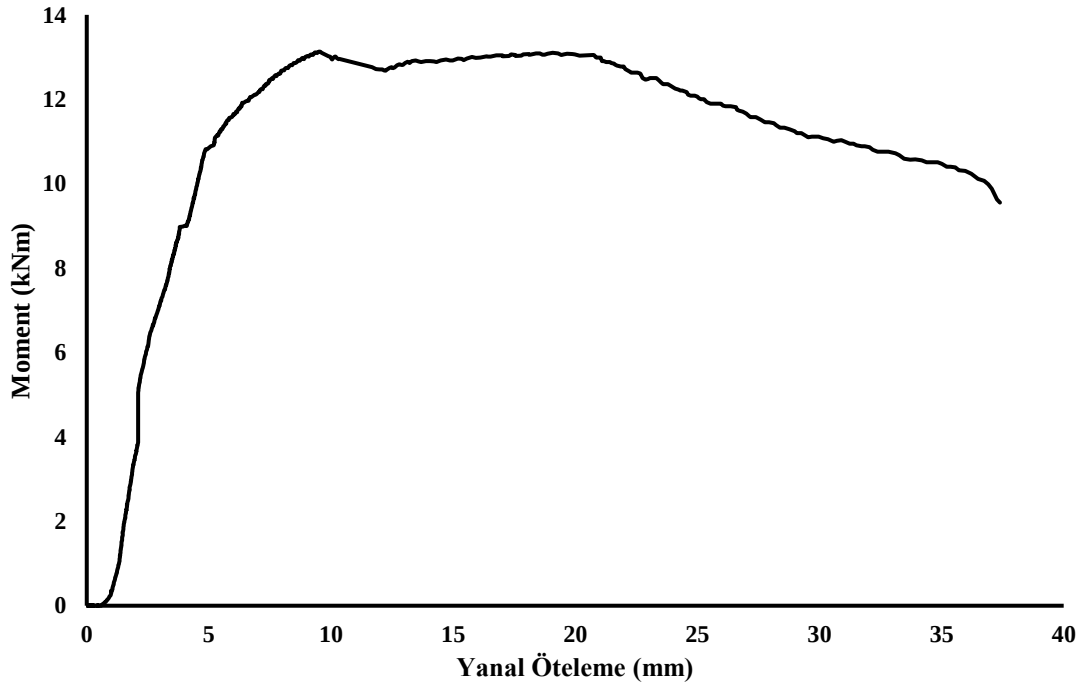
Şekil 4.24. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.25. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.26. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.27. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.4 TD1800 deney elemanı

TD1800 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının ters doğrultuda olduğu ve 1800 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan basit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 12 kNm moment düzeyine kadar artmış ve bu yük seviyesinden sonra yanal öteleme ve dönme açısının artmasıyla ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde yük 13.4 kNm maksimum moment düzeyine kadar artmış ve deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, yanal burulmalı burkulmanın ve ön kiriş gövdesinde lokal burkulmanın birlikte oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.28’de ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.29’da verilmiştir. Yanal burulmalı burkulma davranışı bağlantı kirişlerinin ön ve arka kirişlere bağlanan bağlantı levhasının üst bölgesini basınç etkisi altında bırakırken alt bölgesini ise çekme etkisi altında bırakmaktadır. Bu çekme etkisi, bağlantı levhasında lokal ezilmelere neden olmuştur (Şekil 4.28 (c-d)). Göçme sırasında ön kiriş 9° , arka kiriş ise 8° dönmüştür. Ön ve arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.30 ve Şekil 4.32’de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 18.6 mm, arka kirişte ise 11.2 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.33’te verilmiştir.



(a)

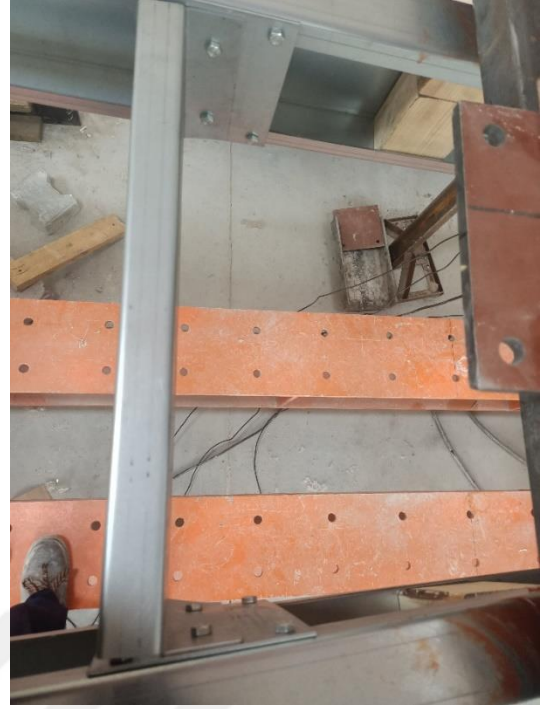


(b)

Şekil 4.28. Deney elemanının göçme şekli (a) ve (b).

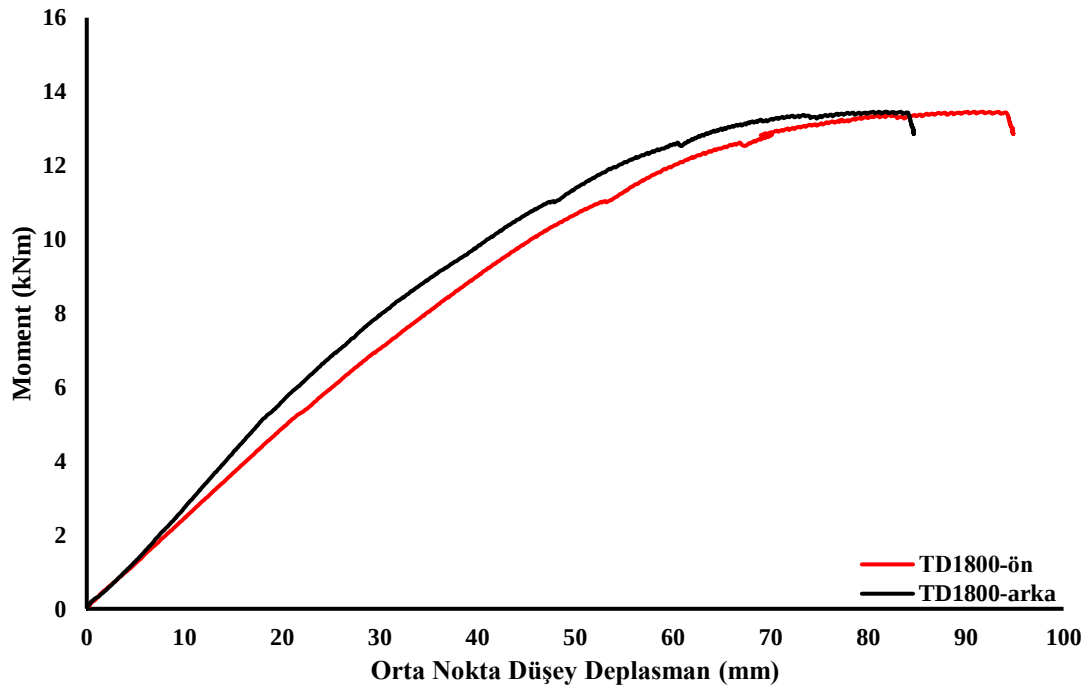


(c)

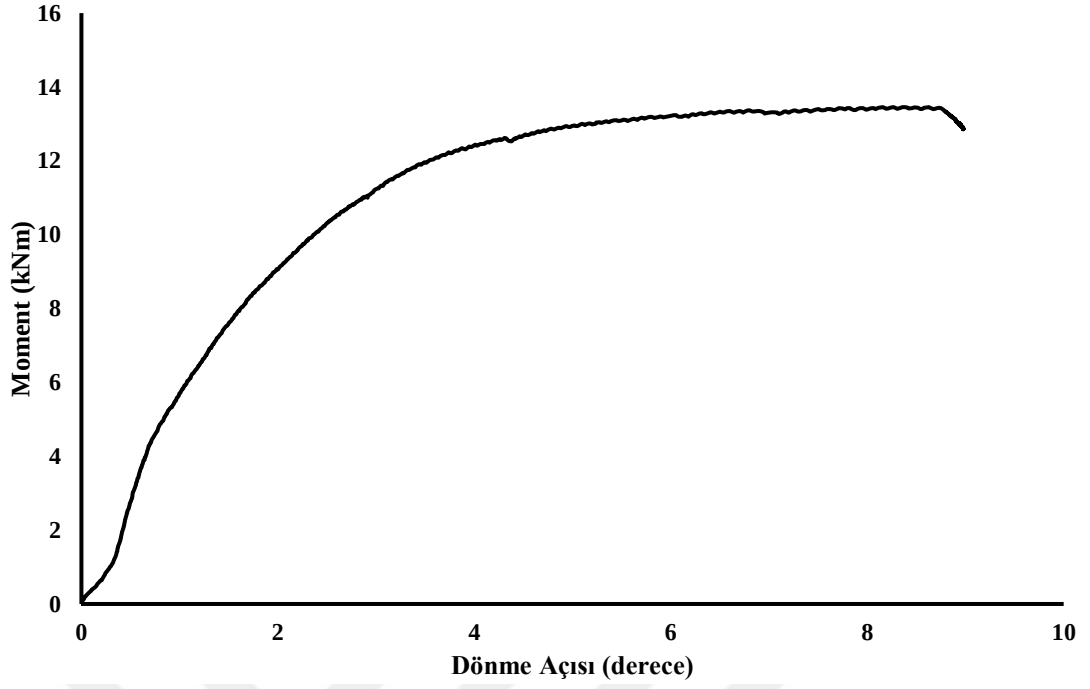


(d)

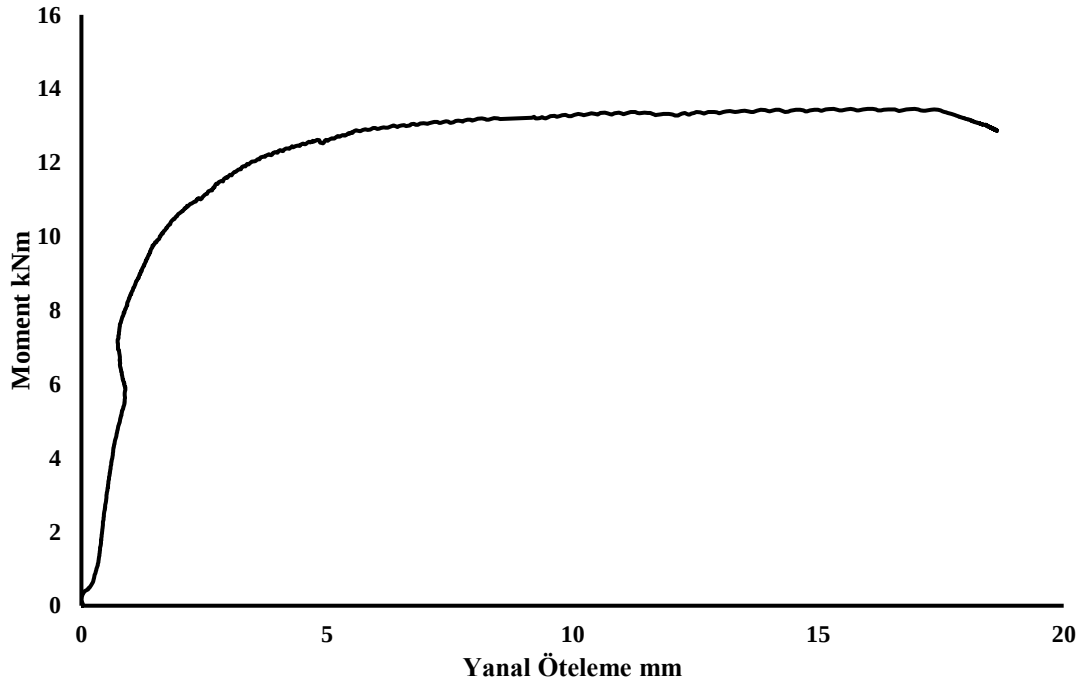
Şekil 4.28 (devam). Bağlantı kirişi levhasının alt bölgesinde oluşan lokal ezilme (c) ve (d).



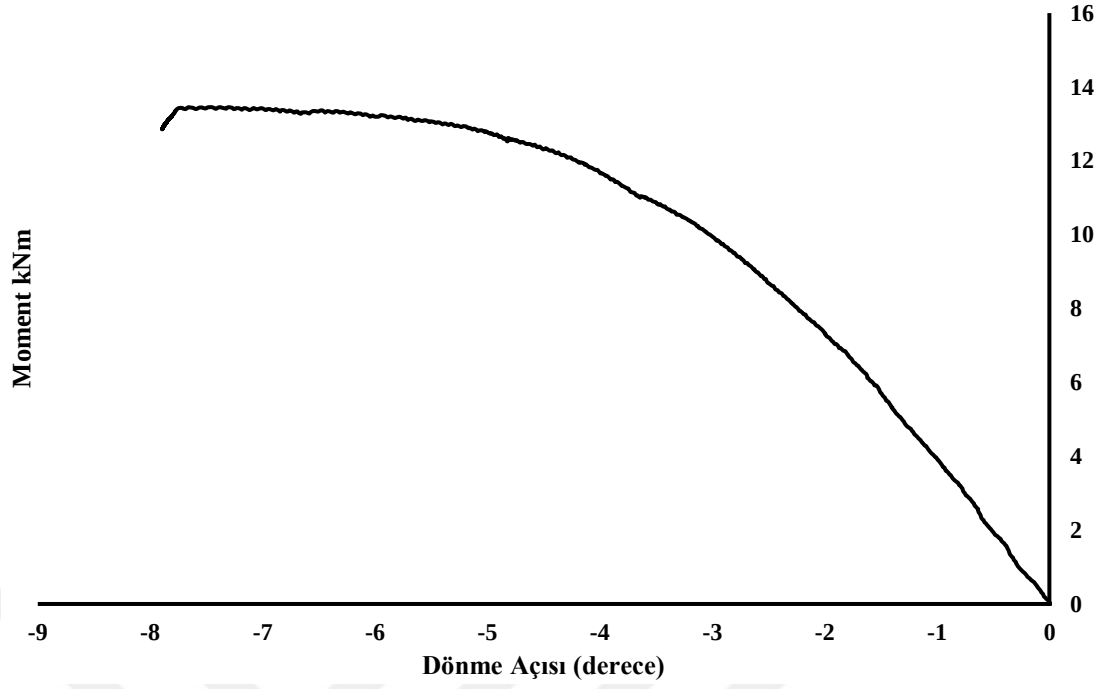
Şekil 4.29. TD1800 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



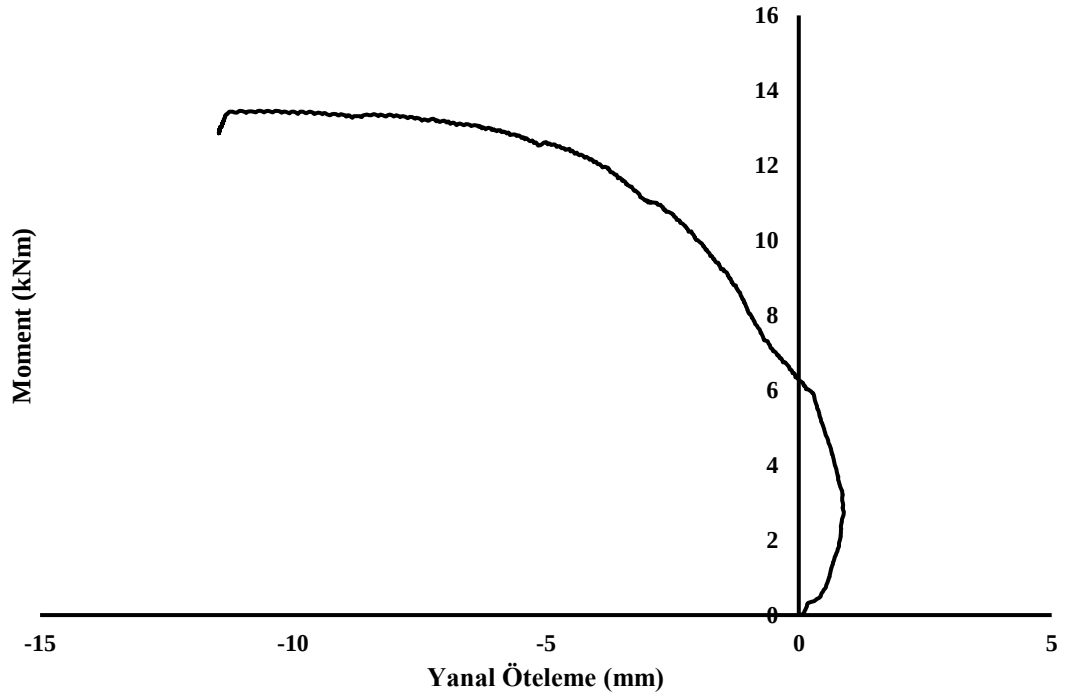
Şekil 4.30. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.31. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.32. Arka kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.



Şekil 4.33. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.5 AD900 deney elemanı

AD900 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve 900 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan basit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 10.7 kNm moment düzeyine kadar artmış ve bu yük seviyesinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde yük 14.1 kNm moment düzeyine kadar artmış ve deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, arka kiriş gövdesinde lokal burkulma oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanının göçme fotoğrafı ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği sırasıyla Şekil 4.34 ve 4.35'te verilmiştir. Göçme sırasında ön kiriş 3.1° , arka kiriş ise 6° dönmüştür. Ön ve arka kirişlere ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.36 ve Şekil 4.38'de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 7.2 mm, arka kirişte ise 4.6 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.39'da verilmiştir.



(a)

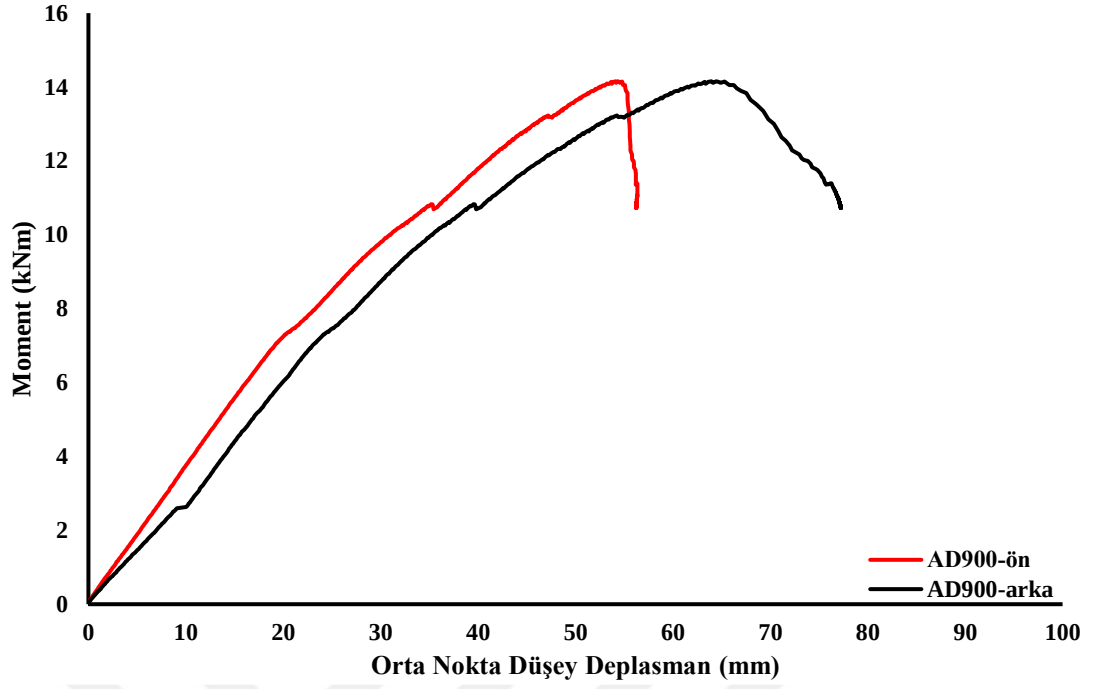


(b)

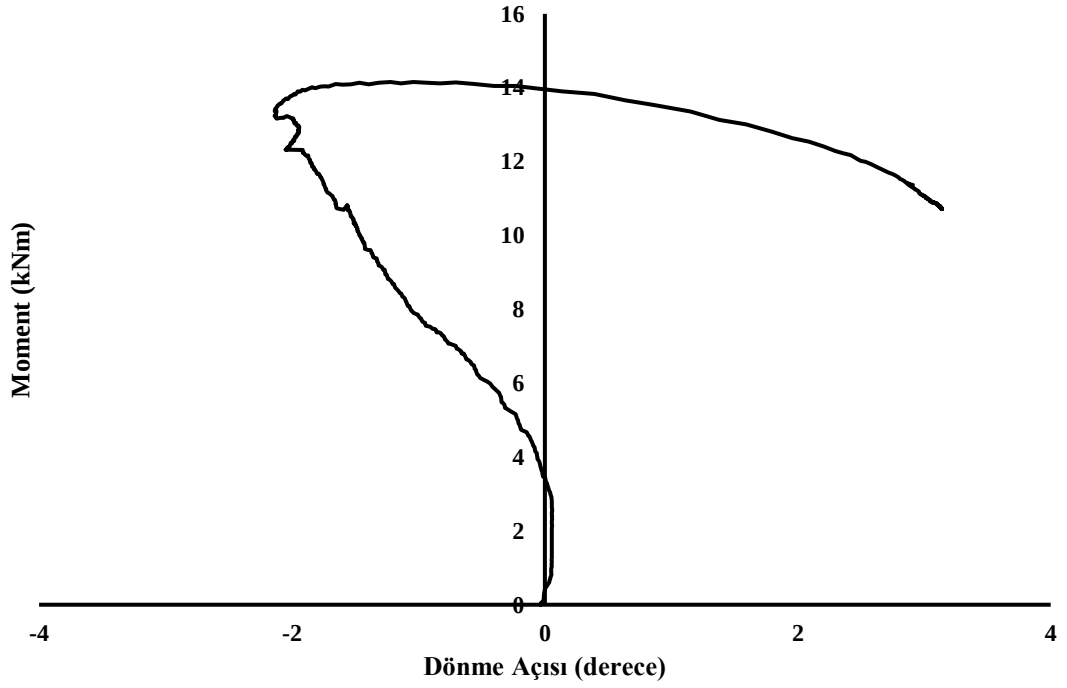


(c)

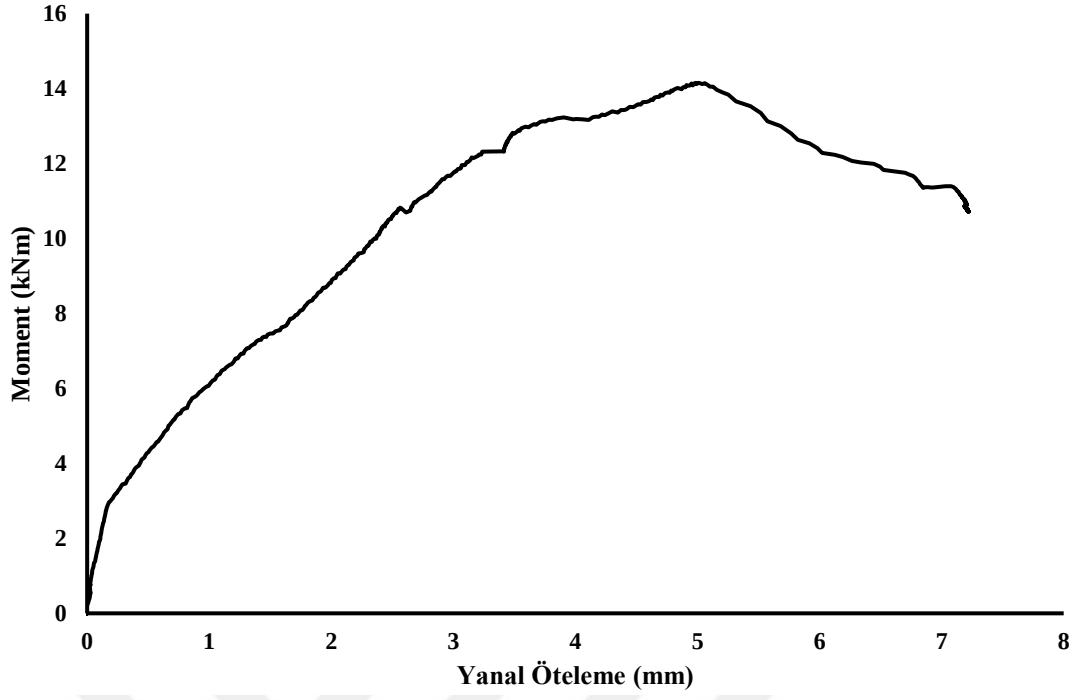
Şekil 4.34. Deney elemanının göçme şekli.



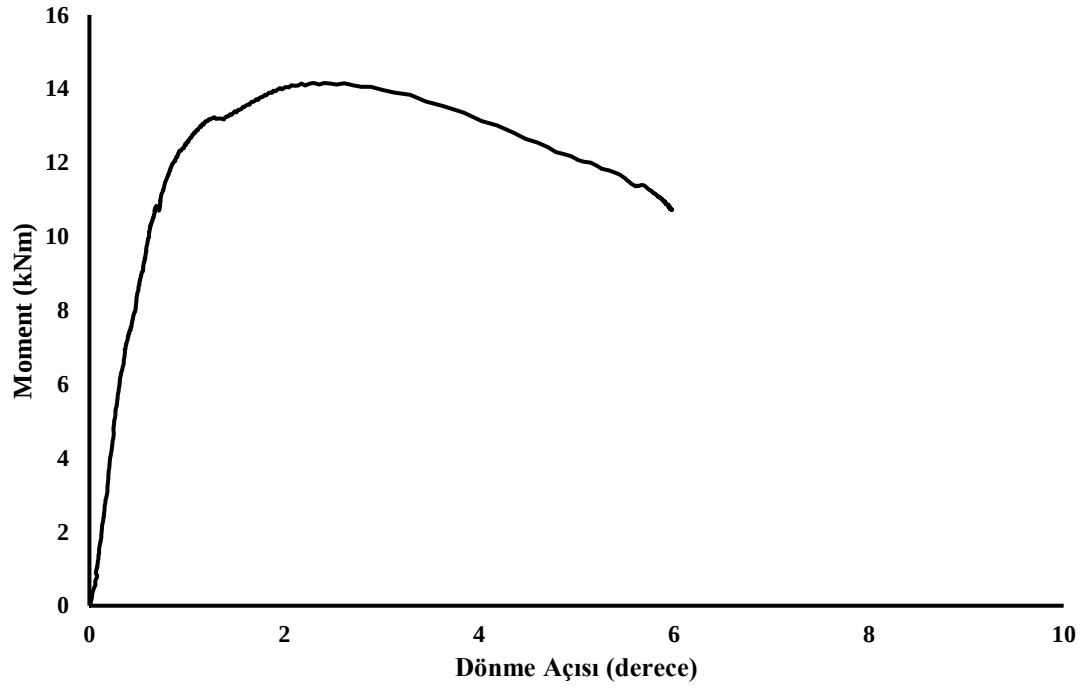
Şekil 4.35. AD900 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



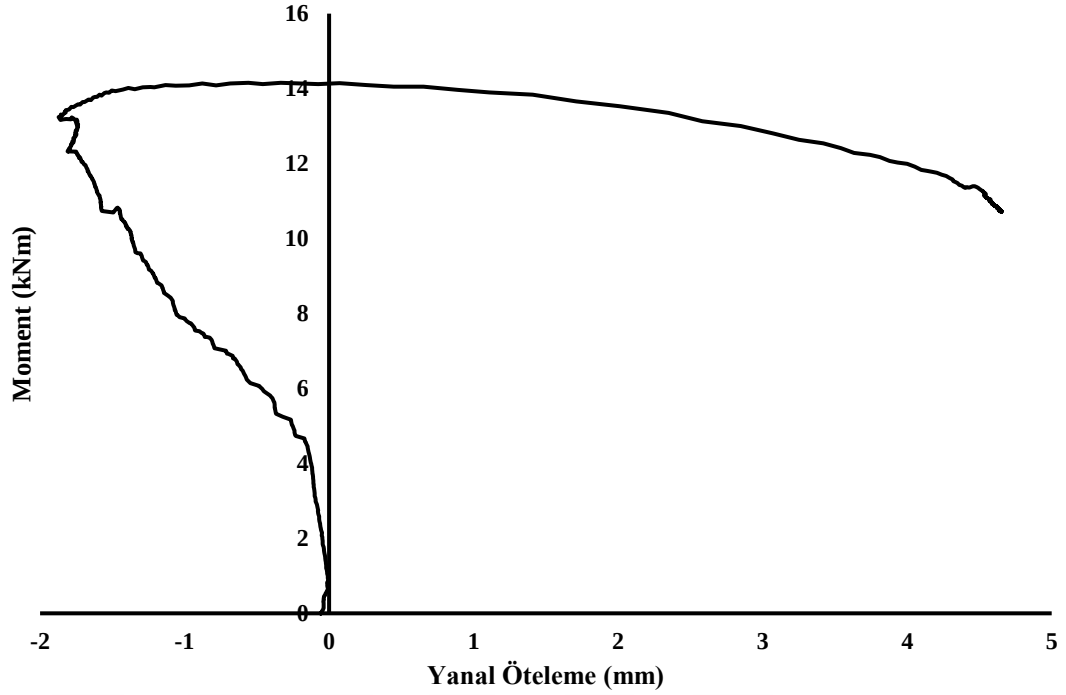
Şekil 4.36. Ön kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.



Şekil 4.37. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.38. Arka kirişe ait moment-yanal deplasman grafiği.



Şekil 4.39. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.6 TD900 deney elemanı

TD900 deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve 900 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan basit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 13 kNm moment seviyesine kadar artmış ve bu yük seviyesinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmaya başlamıştır. Yüklemeye devam edildiğinde, yük 14.5 kNm maksimum moment seviyesine kadar artmıştır. Yükleme noktalarının altında ön kirişin üst başlığı ve gövdesi ezilmeye başlayarak deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır (Şekil 4.40 (a)). Sabit moment bölgesinde kiriş üst başlığında distorsiyonel burkulma meydana gelmiştir (4.40(b)). Deney elemanına ait göçme fotoğrafı ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği sırasıyla Şekil 4.40 ve 4.41’de verilmiştir. Göçme sırasında ön kiriş 3.3° , arka kiriş ise 3.6° dönmüştür. Ön ve arka kirişlere ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.42 ve Şekil 4.44’te verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 8.4 mm, arka kirişte ise 2.6 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment-yanal öteleme grafiği Şekil 4.43 ve Şekil 4.45’te verilmiştir.



(a)

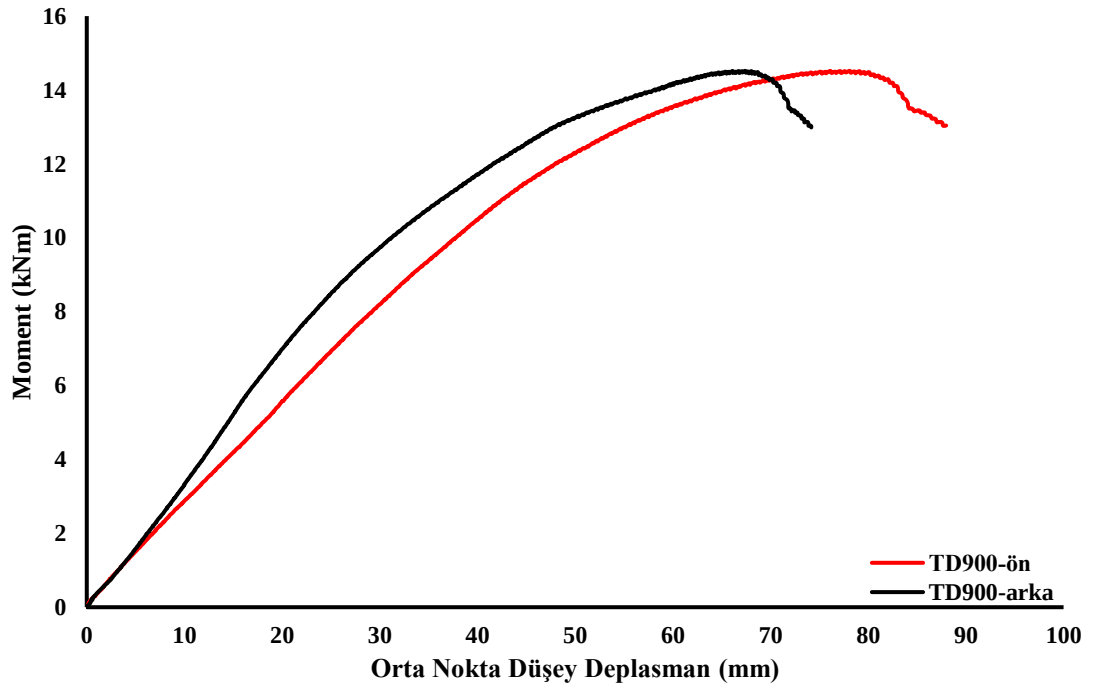


(b)

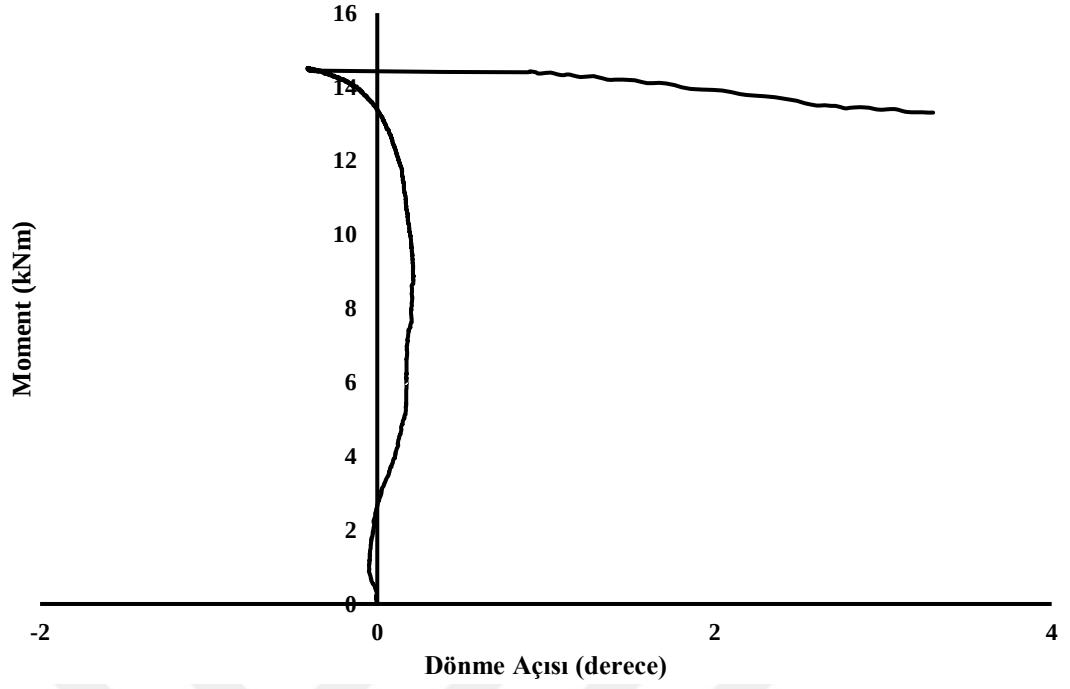


(c)

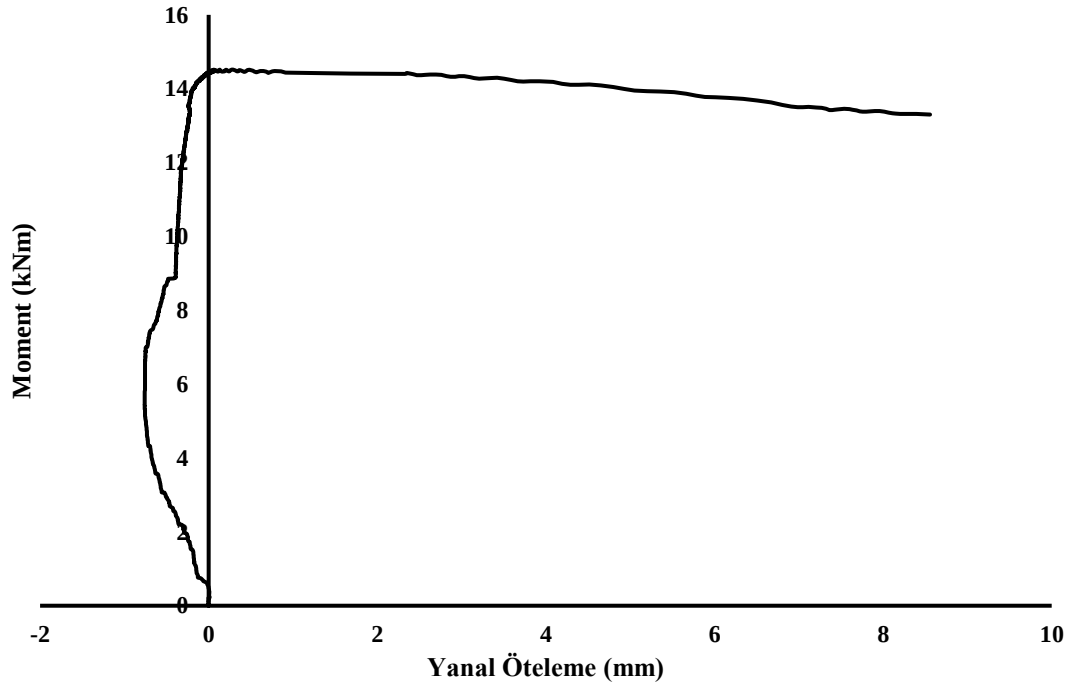
Şekil 4.40. Deney elemanına ait göçme şekli.



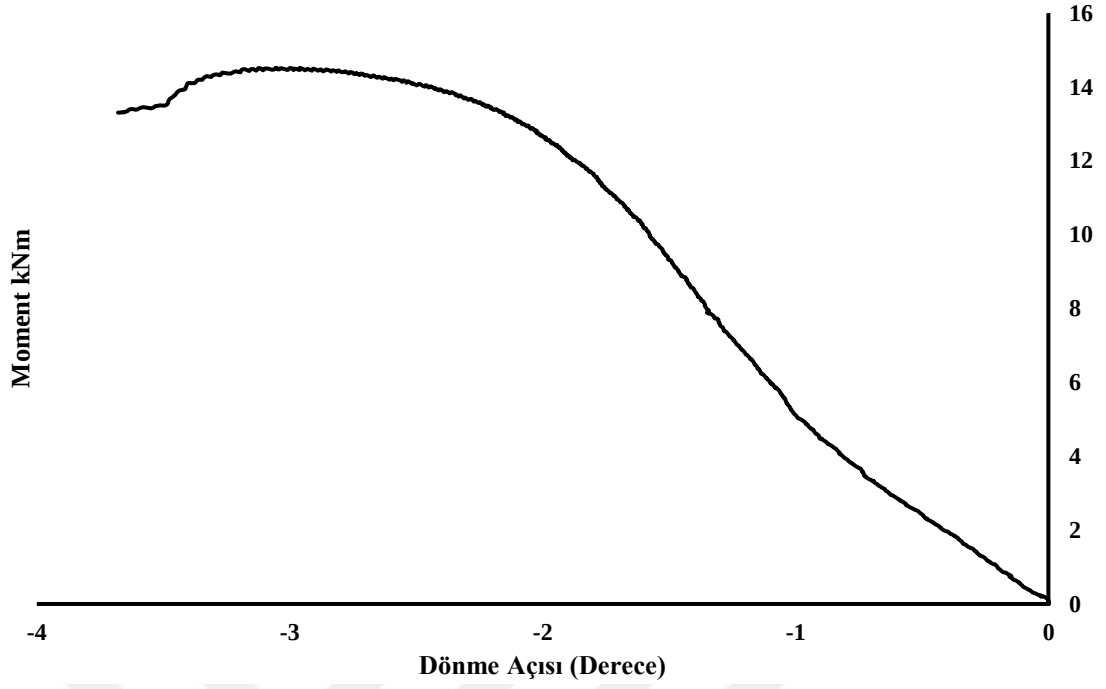
Şekil 4.41. TD900 deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



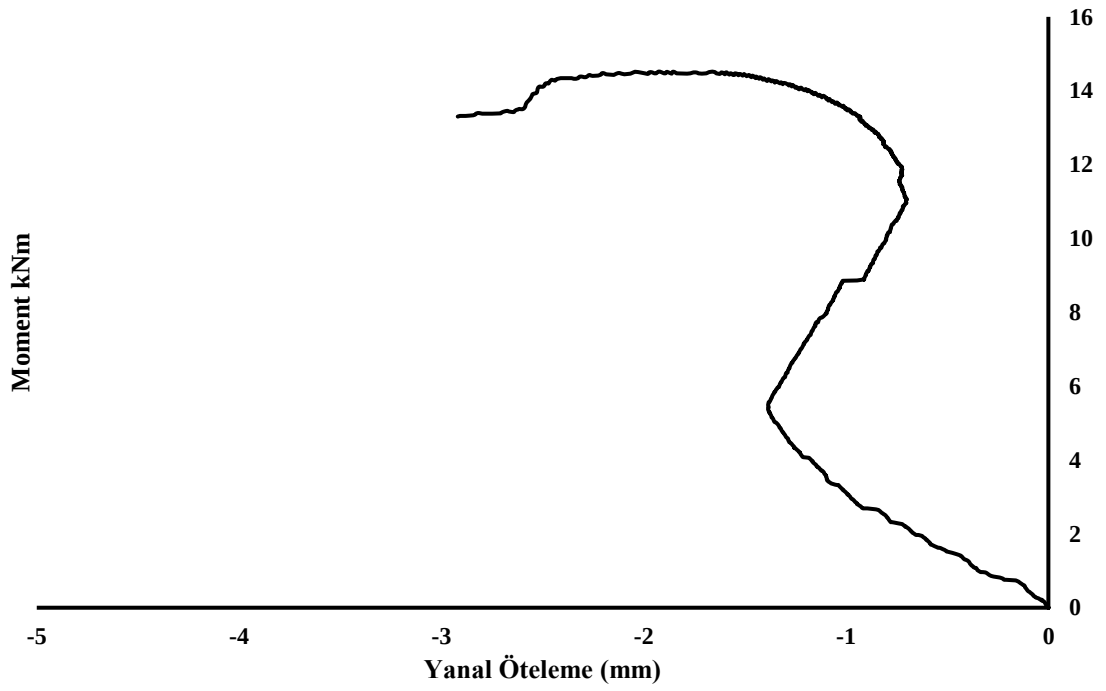
Şekil 4.42. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.43. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.44. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.45. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.7 AD1800SM deney elemanı

AD1800SM deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve 1800 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan sabit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 12 kNm moment seviyesine kadar artmış ve bu yük seviyesinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde yük 13.8 kNm maksimum moment düzeyine kadar artmış, bu yük seviyesinden sonra deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, yanal burulmalı burkulma ve sabit moment bölgesinde arka kiriş gövdesinde lokal burkulma oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.46'da ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.47'de verilmiştir. Yanal burulmalı burkulma davranışı bağlantı kirişlerinin arka kirişe bağlanan bağlantı levhasının üst bölgesini basınç etkisi altında bırakırken, alt bölgesini çekme etkisi altında bırakmaktadır. Bu çekme etkisi, arka kiriş bağlantı levhasının üst bölgesinde lokal ezilmelere yol açmıştır (Şekil 4.46 (c)). Göçme sırasında ön kiriş 8.8° , arka kiriş ise 16.3° dönmüştür. Ön ve arka kirişlere ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.48 ve Şekil 4.50'de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 8 mm, arka kirişte ise 20.9 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.49 ve Şekil 4.51'de verilmiştir.



(a)



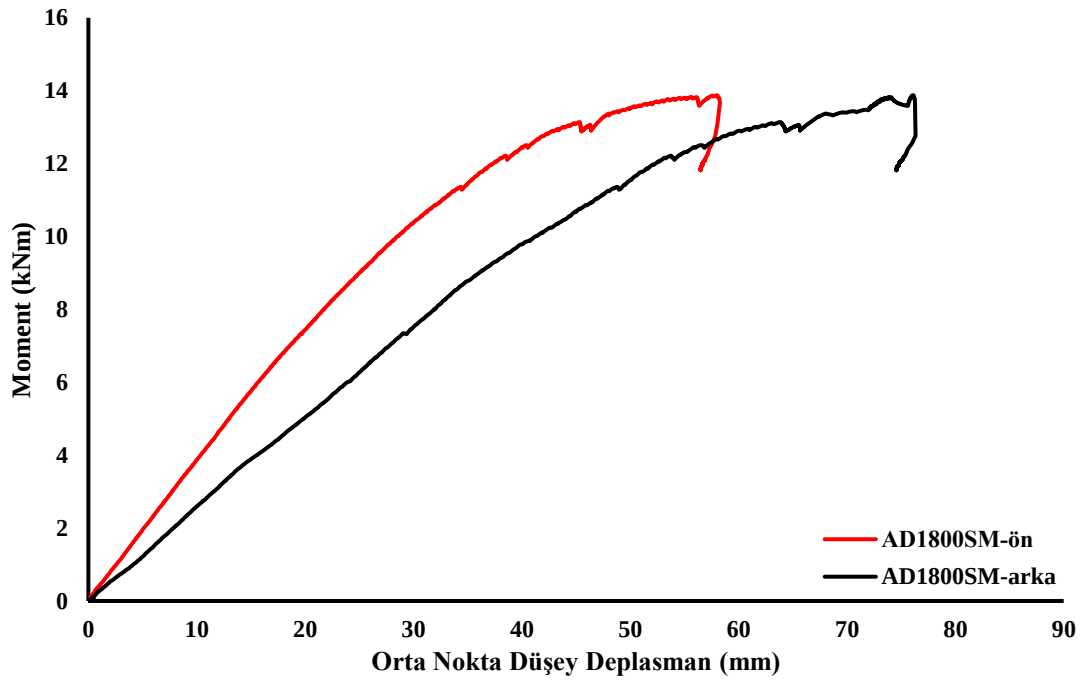
(b)

Şekil 4.46. Deney elemanın göçme şekli (a) ve (b).

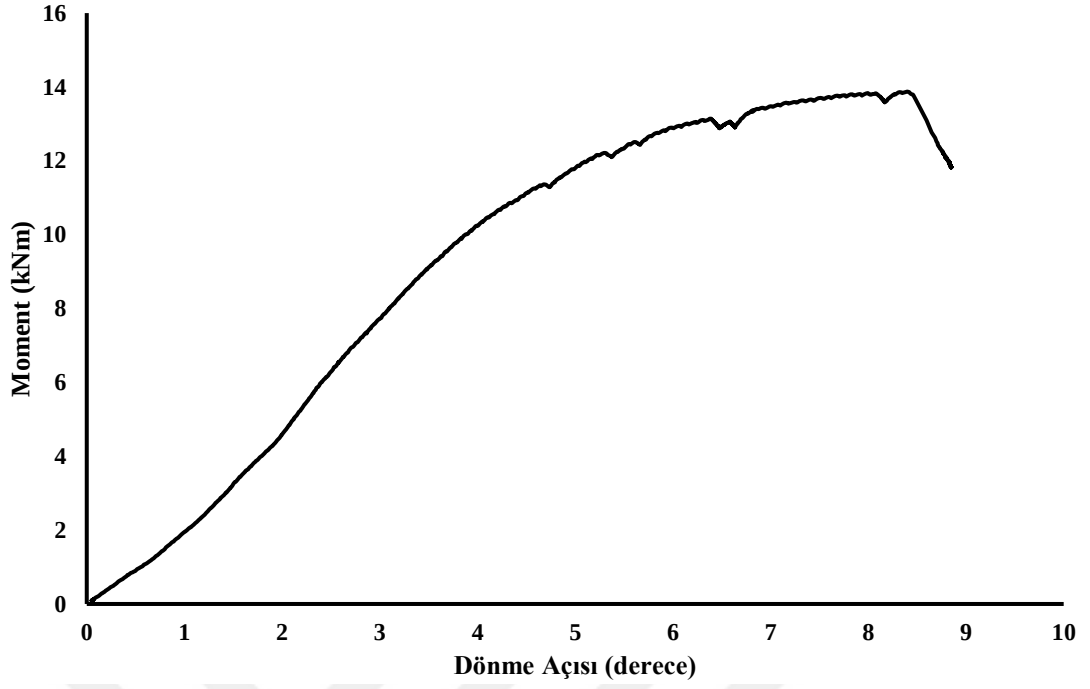


(c)

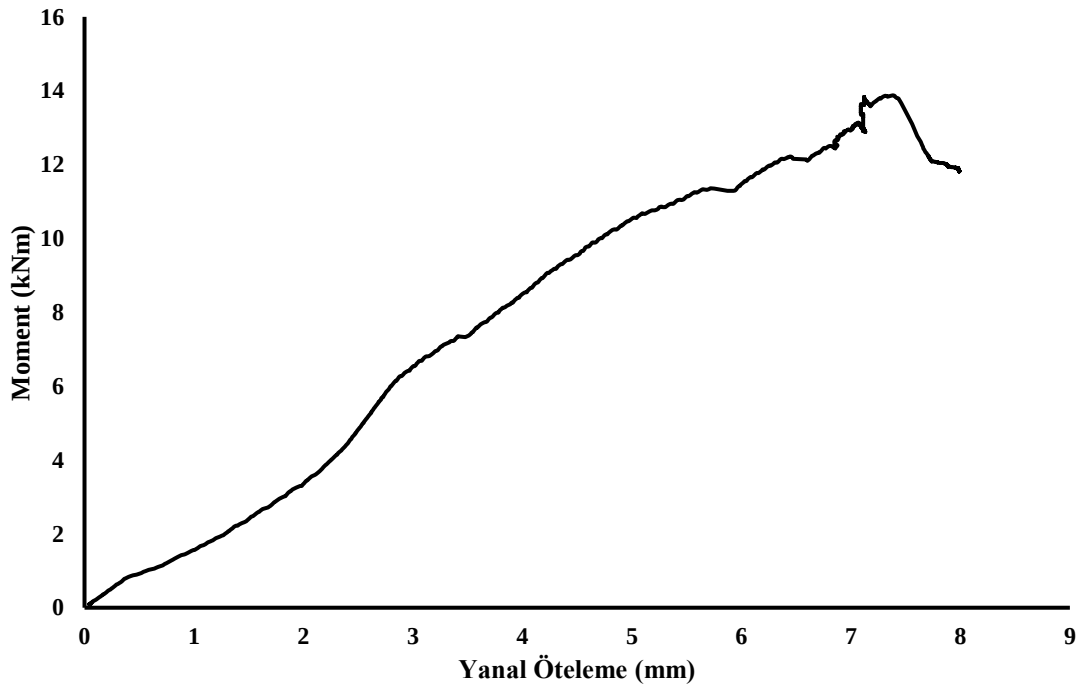
Şekil 4.46 (devam). Bağlantı kirişi levhasında oluşan lokal ezilme (c).



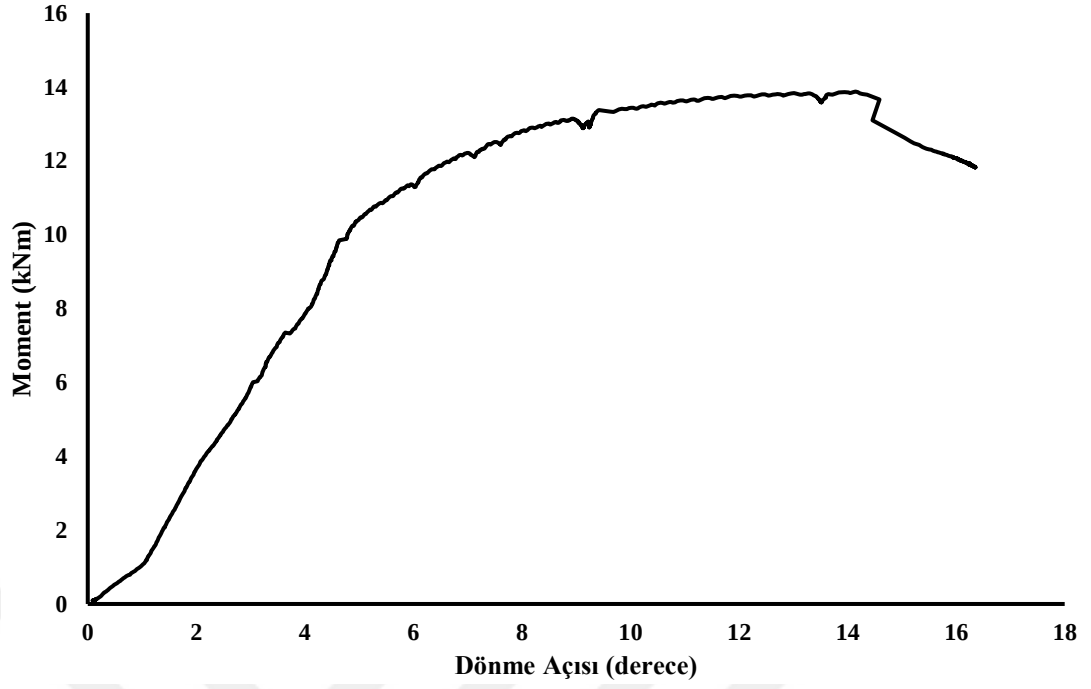
Şekil 4.47. AD1800SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



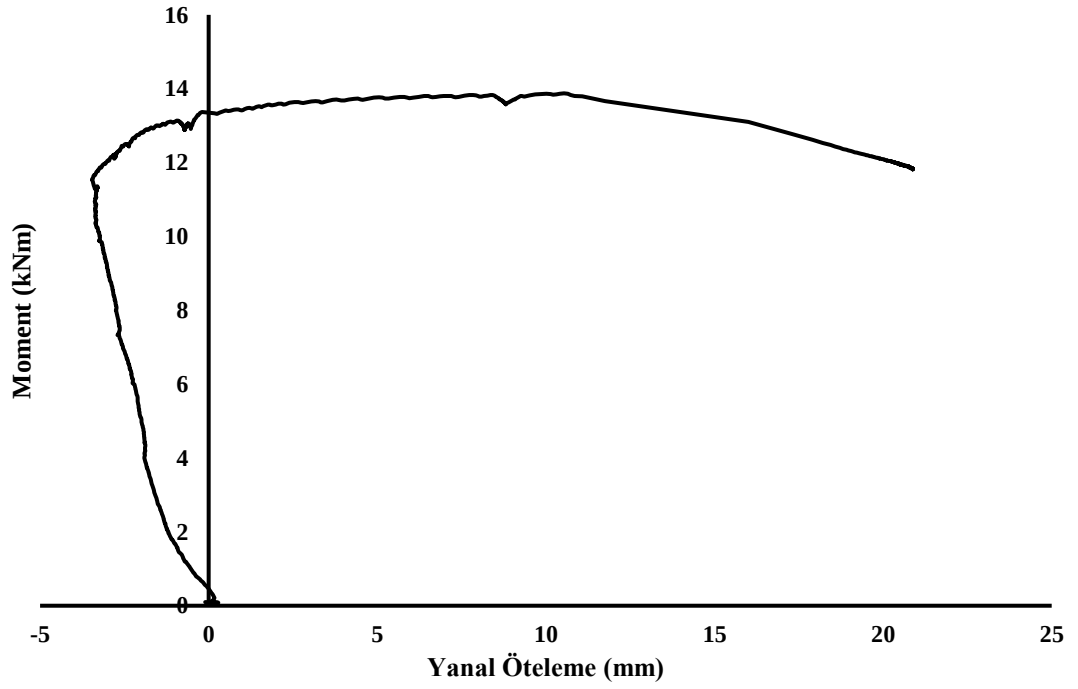
Şekil 4.48. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.49. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.50. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.51. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.8 TD1800SM deney elemanı

TD1800SM deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının ters doğrultuda olduğu ve 1800 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan sabit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 12.8 kNm moment düzeyine kadar artmış ve bu yük düzeyinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yüklemeye devam edildiğinde yük 14.1 kNm maksimum moment düzeyine kadar artmış ve deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, yanal burulmalı burkulmanın ve sabit moment bölgesinde arka kirişin gövdesinde lokal burkulmanın birlikte oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanının göçme fotoğrafı Şekil 4.52’de ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.53’te verilmiştir. Yanal burulmalı burkulma davranışı bağlantı kirişlerinin arka kirişe bağlanan bağlantı levhasının üst bölgesini basınç etkisi altında bırakırken, alt bölgesini ise çekme etkisi altında bırakmaktadır. Bu çekme etkisi, bağlantı levhasının alt bölgesinde lokal ezilmelere yol açmıştır (Şekil 4.52 (c)). Göçme sırasında ön kiriş 10°, arka kiriş ise 13.2° dönmüştür. Ön ve arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.54 ve Şekil 4.56’da verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 7.8 mm, arka kirişte ise 27.3 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment-yatay öteleme grafiği Şekil 4.55 ve Şekil 4.57’de verilmiştir.



(a)



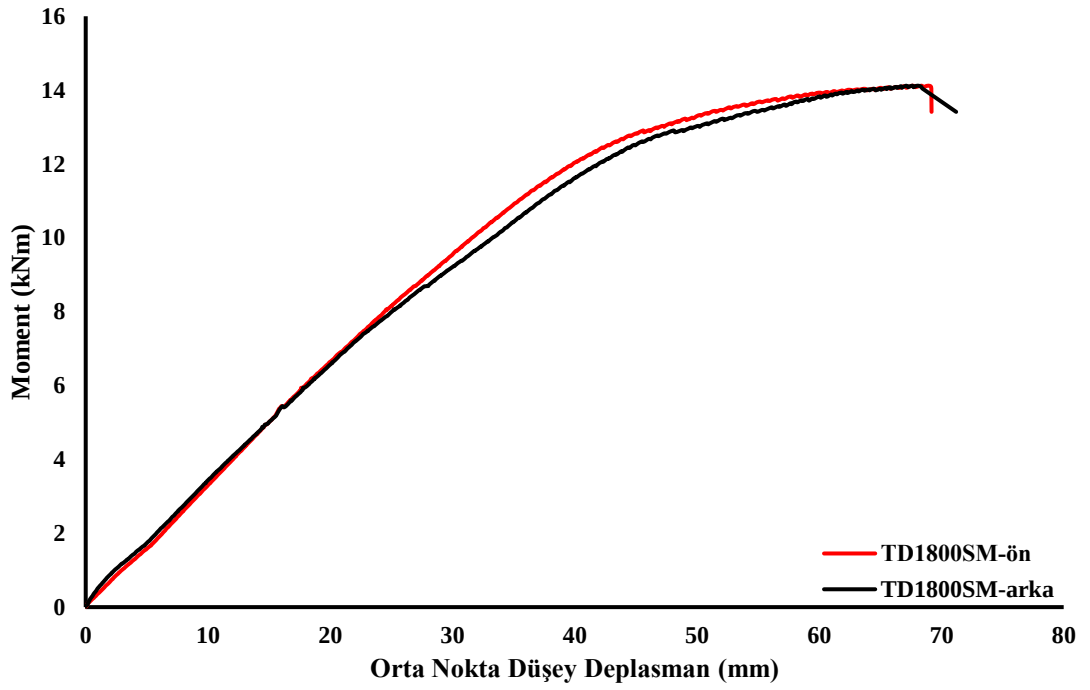
(b)

Şekil 4.52. Deney elemanın göçme şekli (a) ve (b).

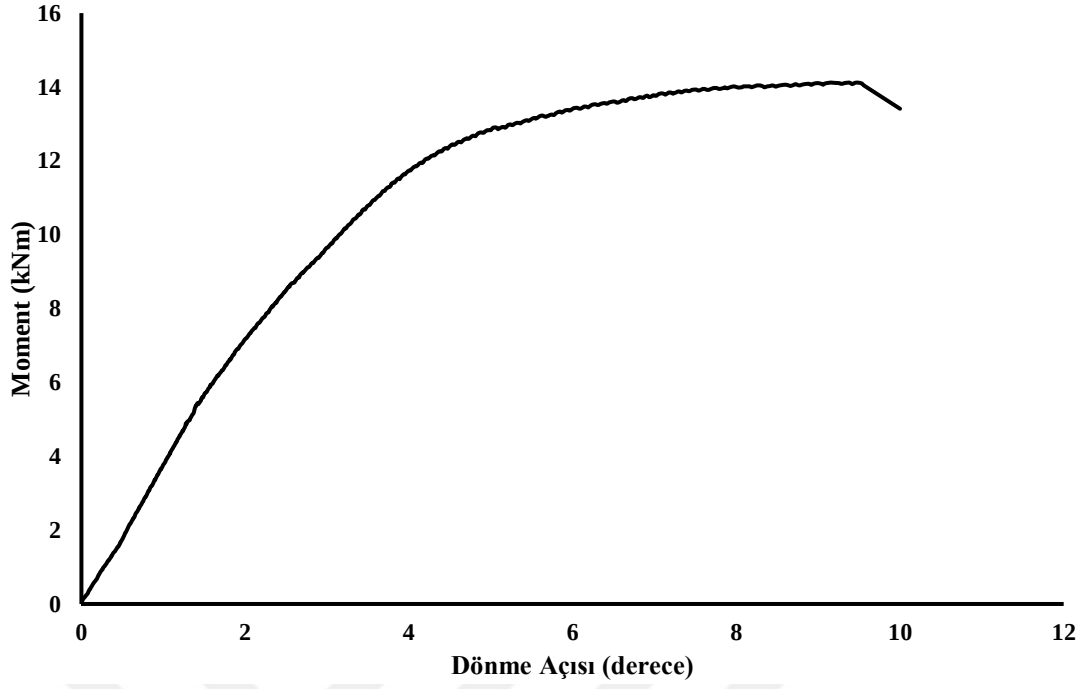


(c)

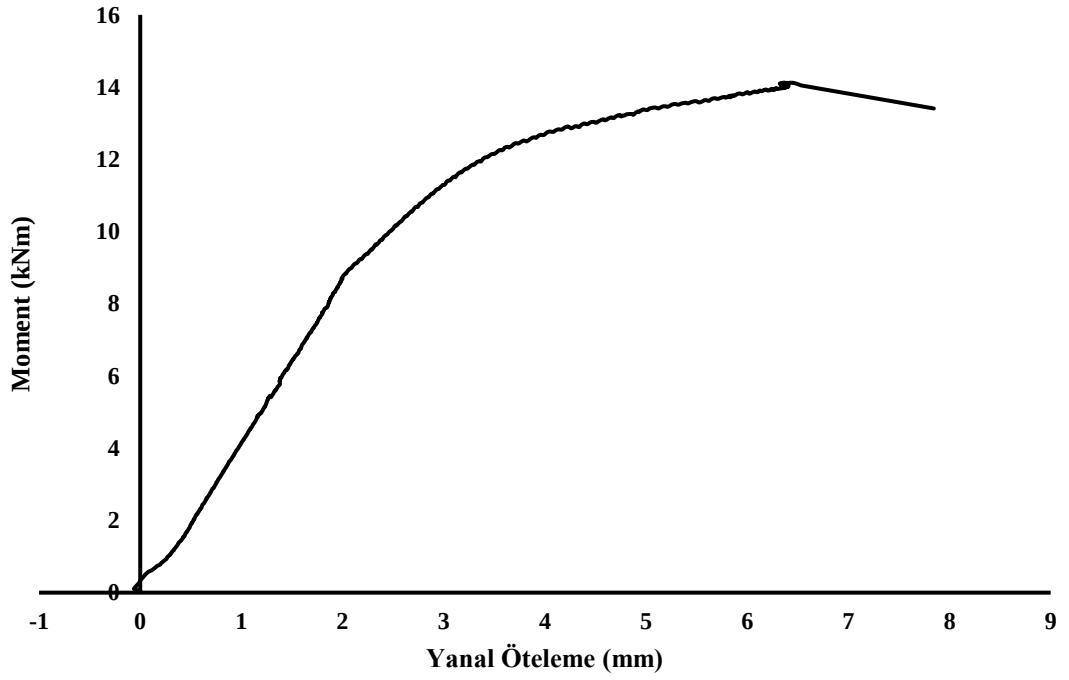
Şekil 4.52 (devam). Bağlantı kirişi levhasında oluşan lokal ezilme (c).



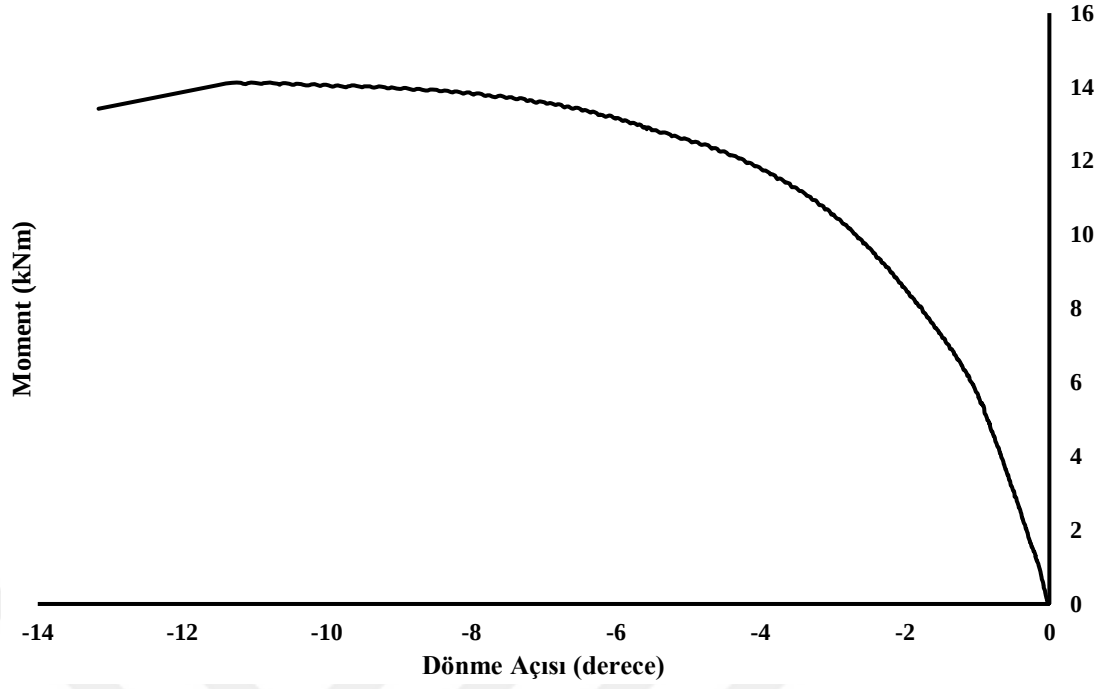
Şekil 4.53. TD1800SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



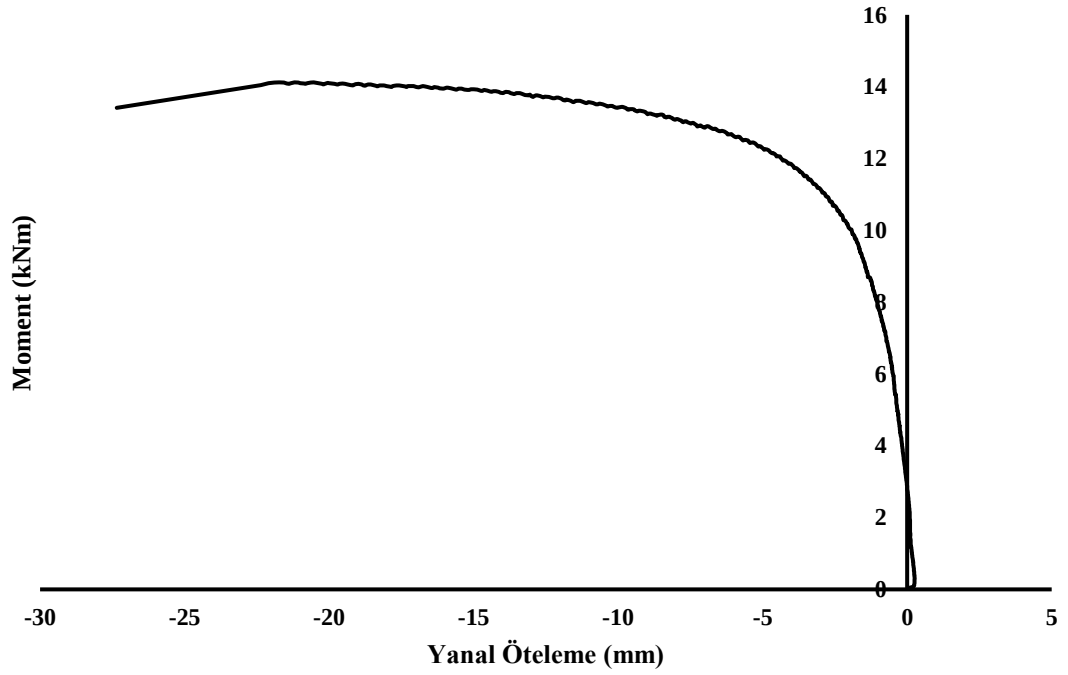
Şekil 4.54. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.55. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.56. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.57. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.9 AD900SM deney elemanı

AD900SM deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının aynı doğrultuda olduğu ve 900 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanılan sabit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 13 kNm moment düzeyine kadar artmış ve bu yük düzeyinden sonra ön ve arka kirişte rijitlik azalmıştır. Yükleme devam edildiğinde yük 13.4 kNm maksimum moment düzeyine kadar artmış ve bu yük düzeyinden sonra deney elemanı daha fazla yük taşıyamamıştır. Göçme, sabit moment bölgesinde arka kirişin gövdesinde lokal burkulma oluşması sonucunda gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.58’de ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiği ise Şekil 4.59’da verilmiştir. Göçme sırasında ön kiriş 3.4° , arka kiriş ise 9.7° dönmüştür. Ön ve arka kirişlere ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla Şekil 4.60 ve Şekil 4.62’de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 4 mm, arka kirişte ise 6.7 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişe ait moment- yanal öteleme grafiği Şekil 4.61 ve Şekil 4.63’te verilmiştir.

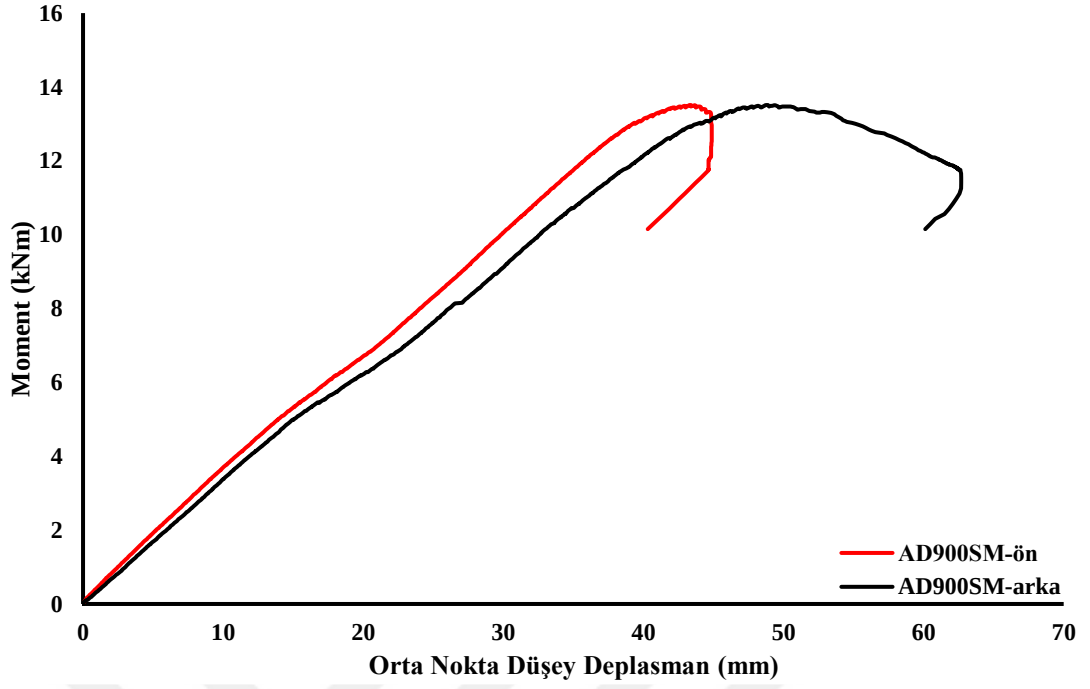


(a)

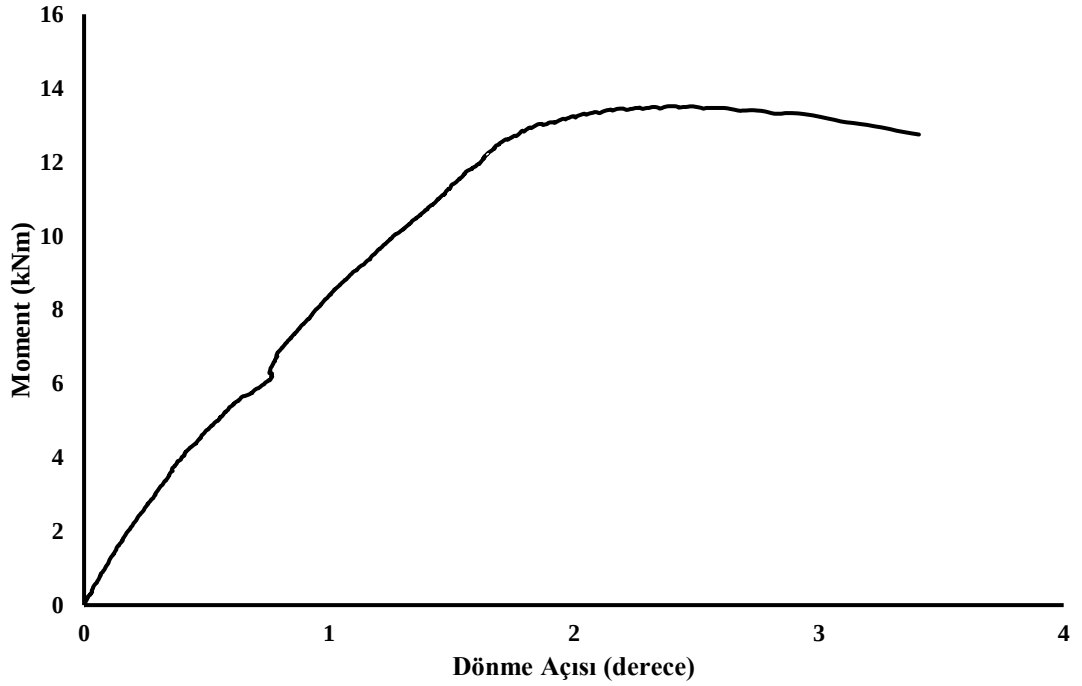


(b)

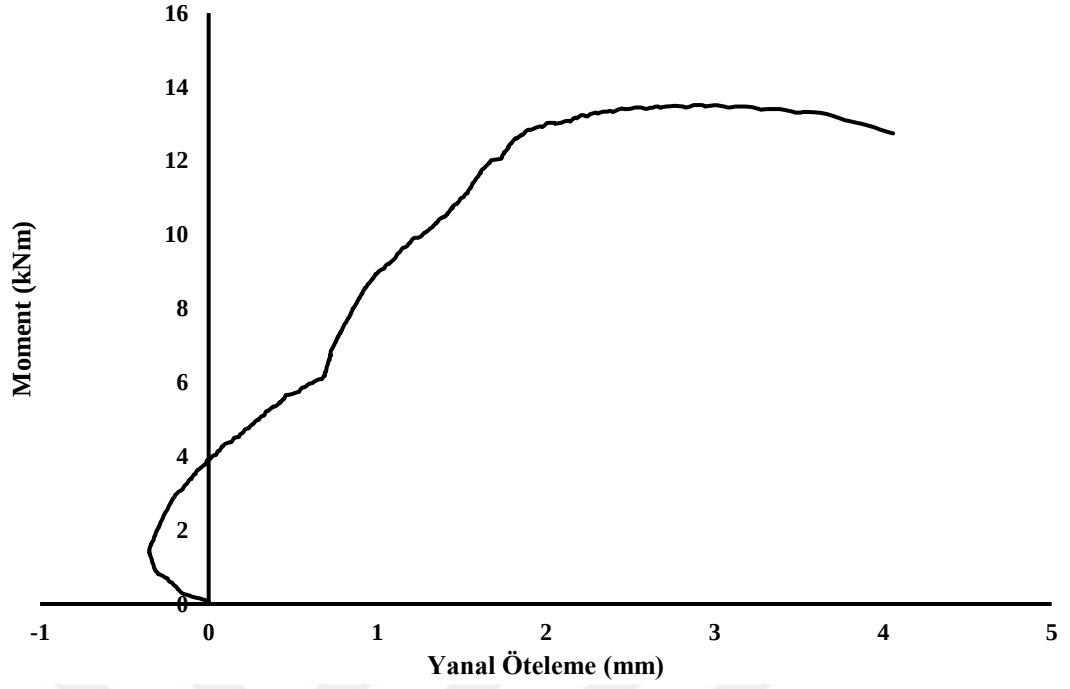
Şekil 4.58. Deney elemanının göçme şekli.



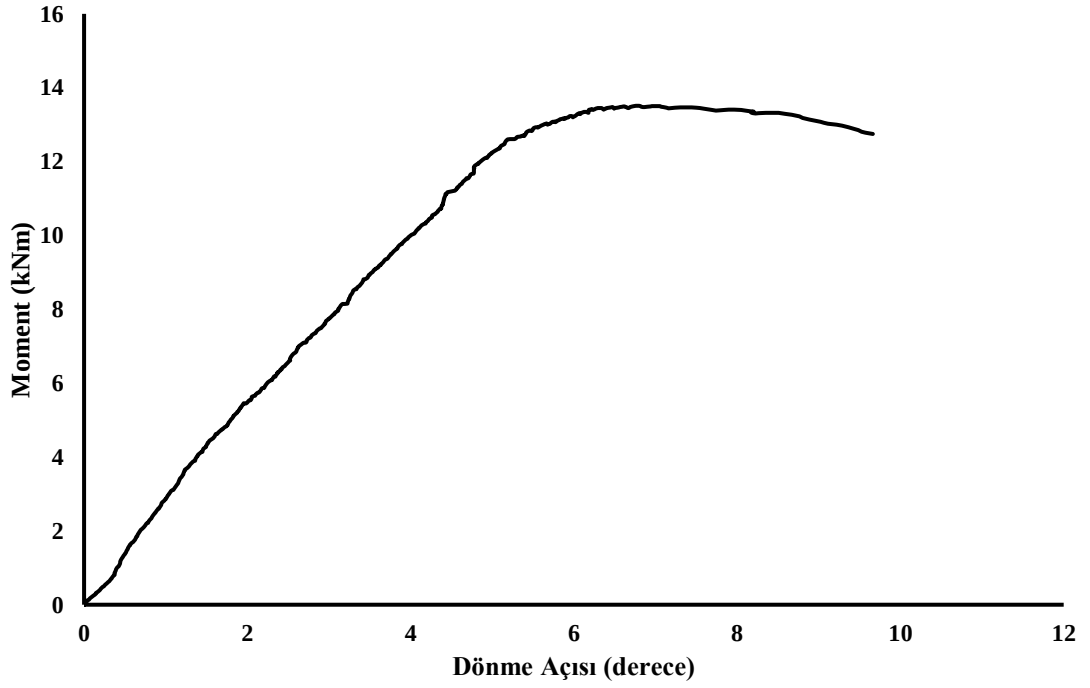
Şekil 4.59. AD900SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



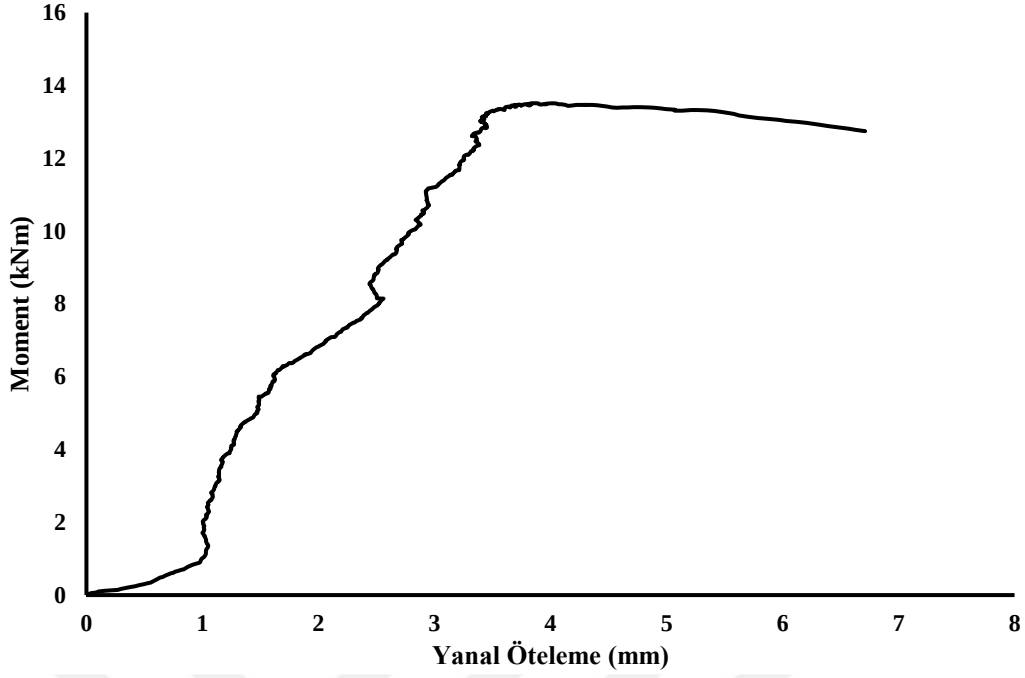
Şekil 4.60. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.61. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.62. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



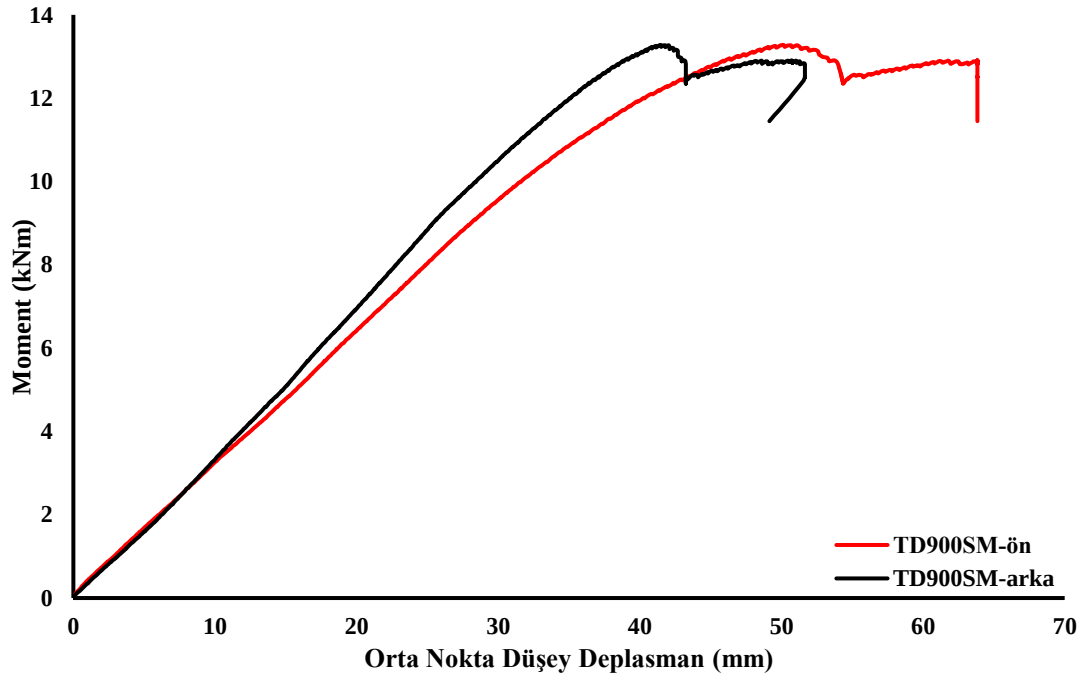
Şekil 4.63. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.3.10 TD900SM deney elemanı

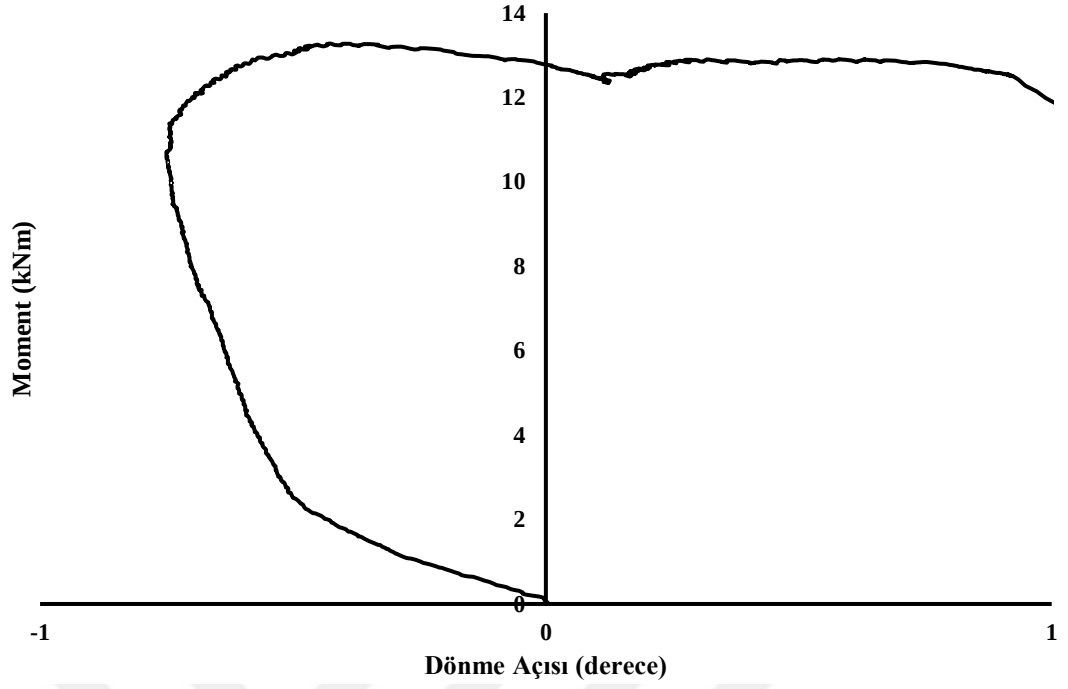
TD900SM deney elemanı, kirişlerinin açık kesit tarafının ters doğrultuda olduğu ve 900 mm aralıklarla bağlantı kirişleri kullanıldığı basit mesnetli deney elemanıdır. Deney elemanında yük 11.5 kNm moment düzeyine kadar artmış ve bu yük düzeyinden sonra rijitlik azalmaya başlamıştır. Yükleme devam edildiğinde, yük 13.4 kNm maksimum moment düzeyine kadar artmış, yükleme noktalarının altında ön kiriş üst başlığı ve gövdesi ezilmiştir. Deney elemanının kapasitesi azalsa da yük taşımaya devam etmiştir. Yük 12.8 kNm moment düzeyine düştüğünde ise eleman daha fazla yük taşıyamamıştır. Deney elemanına ait göçme fotoğrafı Şekil 4.64'te ve moment-orta nokta yanal deplasman grafiği ise Şekil 4.65'te verilmiştir. Göçme sırasında ön kiriş 0.1° , arka kiriş ise 4° dönmüştür. Ön ve arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği sırasıyla 4.66 ve Şekil 4.68'de verilmiştir. Ayrıca ön kirişte 4.1 mm, arka kirişte ise 5.6 mm düzlem dışı hareket gerçekleşmiştir. Ön ve arka kirişlere ait moment-yanal öteleme grafiği sırasıyla Şekil 4.67 ve Şekil 4.69'da verilmiştir.



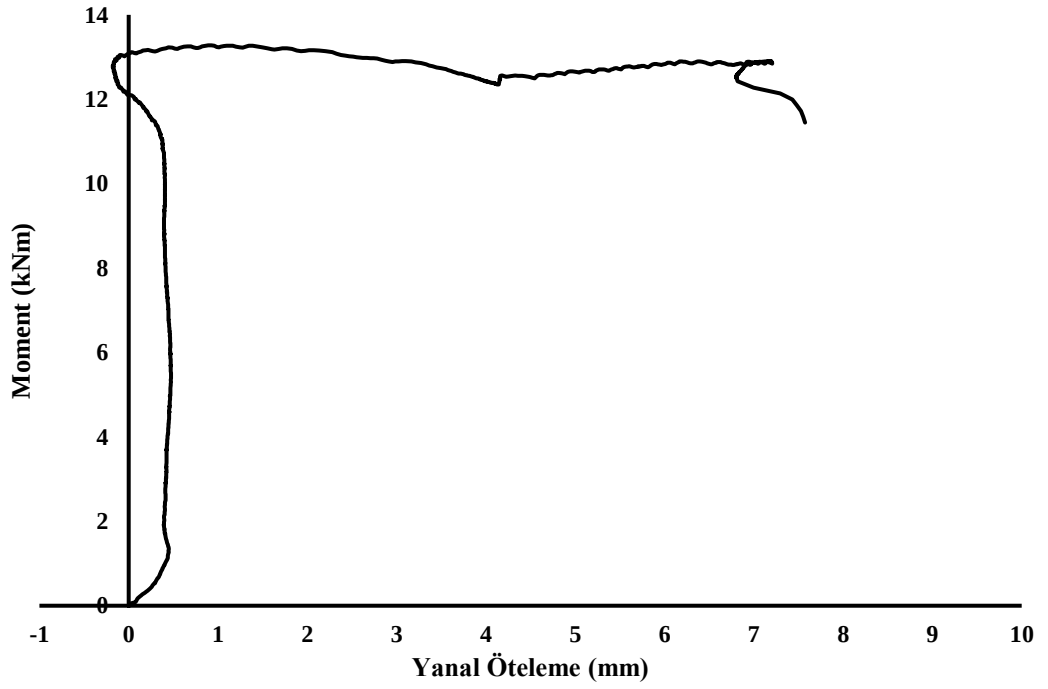
Şekil 4.64. Deney elemanının göçme şekli.



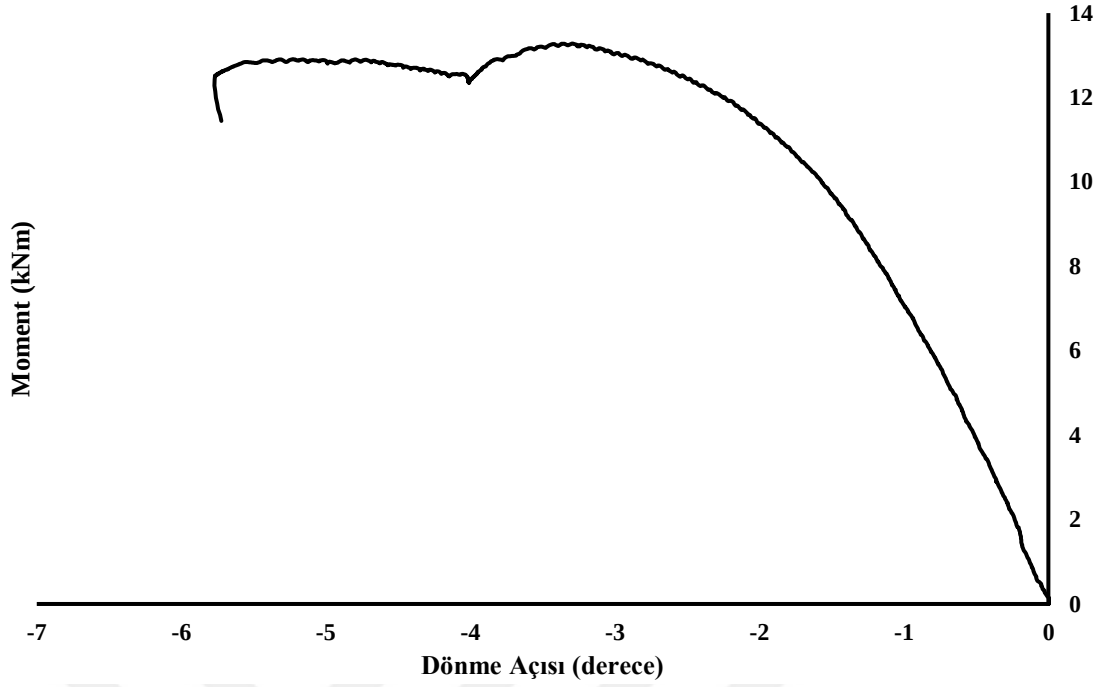
Şekil 4.65. TD900SM deney elemanına ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği.



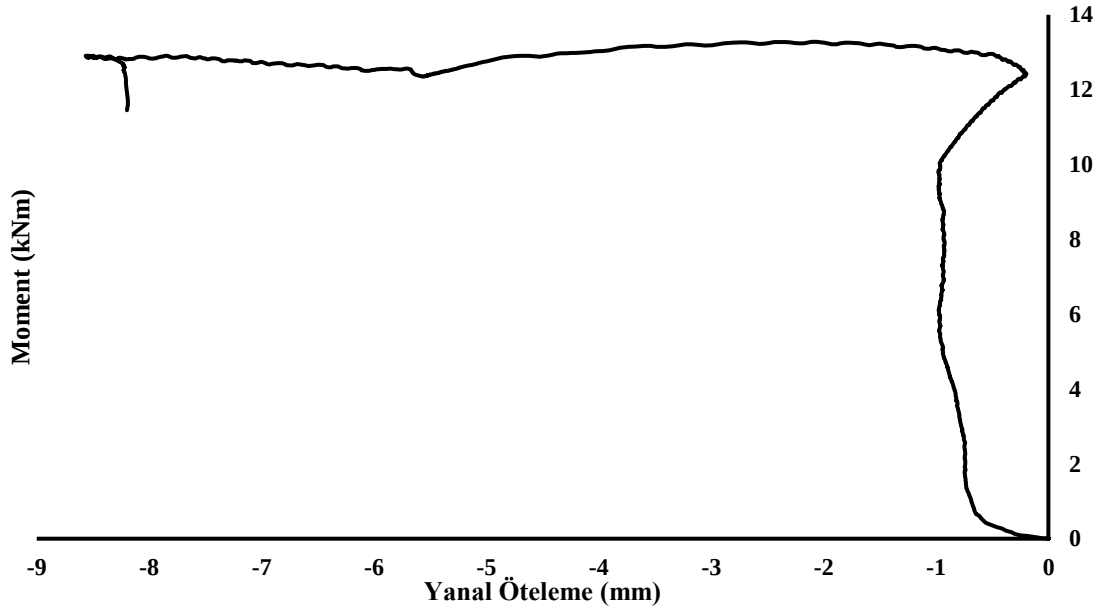
Şekil 4.66. Ön kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.67. Ön kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.



Şekil 4.68. Arka kirişe ait moment-dönme açısı grafiği.



Şekil 4.69. Arka kirişe ait moment-yanal öteleme grafiği.

4.4 Sonuçlar

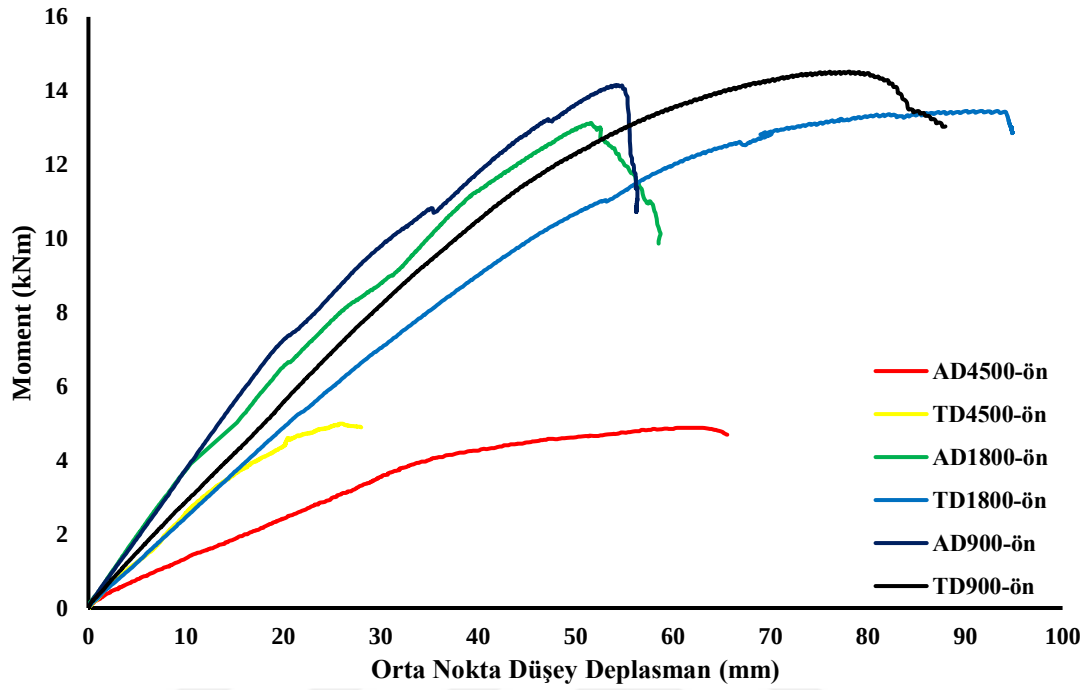
Deneysel çalışmalarda, konik silo çatısının bir parçası olarak tasarlanan kiriş sistemlerine basit ve sabit mesnetli olacak şekilde dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Basit ve sabit mesnetli deney elemanlarında değişken olarak kirişlerin yönlendirmesi ve bağlantı kirişleri arası mesafe dikkate alınmıştır. Bu değişkenlerin

kirişlerin moment taşıma kapasitesine, göçme davranışına, yanal deplasman ve dönme açısına olan etkisi incelenmiştir.

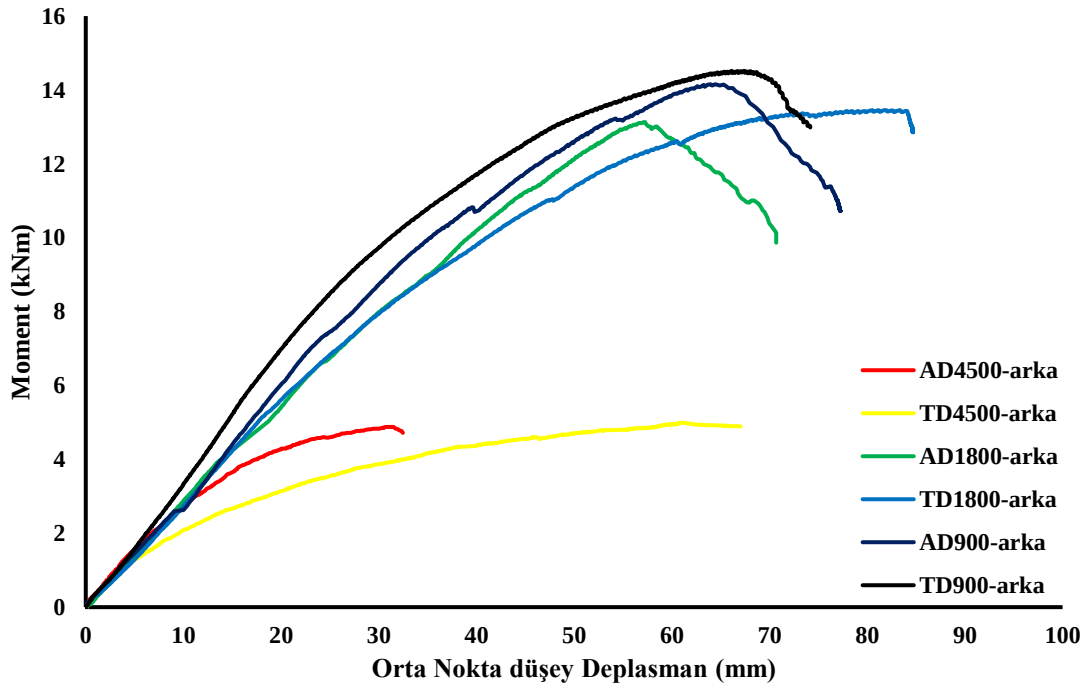
Basit mesnetli deney elemanlarının ön ve arka kirişlere ait moment-orta nokta düşey deplasman ilişkisi sırasıyla Şekil 4.70 ve Şekil 4.71’de karşılaştırılmıştır. Deney elemanlarında, yanal burulmalı burkulma (LTB), yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma (LTB-LB), lokal burkulma (LB) ve yükleme noktalarının ezilmesi ve distorsiyonel burkulma (BB-DB) modları gözlemlenmiştir. Bağlantı kirişleri kullanılmayan deney elemanlarında (AD4500 ve TD4500) LTB davranışı hakim olurken bağlantı kirişleri kullanılması ve bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasıyla göçme davranışı değişmiştir. En etkili bağlantı kirişleri arası mesafenin 900 mm olduğu belirlenmiştir. Deney elemanlarında, bağlantı kirişlerinin kullanılmasıyla ve bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasıyla birlikte kirişlerin moment kapasitesi artmaktadır. 900 mm aralıklarla bağlantı kirişi kullanılan deney elemanlarının maksimum moment kapasitesi bağlantı kirişi kullanılmayan deney elemanlarının maksimum moment kapasitesine göre yaklaşık 3 katına çıkmıştır. Ayrıca bağlantı kirişlerinin kullanımı ve kirişlerin ters doğrultuda olması kirişlerde hem yanal ötelemenin hem de dönme açısının belirgin düzeyde azalmasını sağlamaktadır. Kiriş yönlendirmesinde ise en etkili seçimin ters yönlendirme olduğu belirlenmiştir. Basit mesnetli deney elemanlarının göçme modu, göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Sabit mesnetli deney elemanlarında, ön ve arka kirişlere ait moment-orta nokta düşey deplasman ilişkisi ise sırasıyla Şekil 4.72 ve Şekil 4.73’te karşılaştırılmıştır. Deney elemanlarında, yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma (LTB-LB), lokal burkulma (LB) ve yükleme noktasının ezilmesi (BB) göçme modları gözlemlenmiştir. Bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasıyla deney elemanlarında göçme davranışı değişmiştir. En etkili bağlantı kirişleri arası mesafenin 900 mm olduğu belirlenmiştir. Deney elemanlarında maksimum moment kapasiteleri birbirlerine yakın elde edildiği için net bir tespit yapılamamıştır. Ancak bağlantı kirişleri arası mesafenin azalması ve kirişlerin ters doğrultuda olması, basit mesnetli deney elemanlarında olduğu gibi, kirişlerde yanal ötelemenin ve dönme açısının azalmasında etkili olmuştur. En etkili kiriş yönlendirmesinin ters yönlendirme olduğu belirlenmiştir. Sabit mesnetli deney

elemanlarının göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları Çizelge 5.5’te verilmiştir.



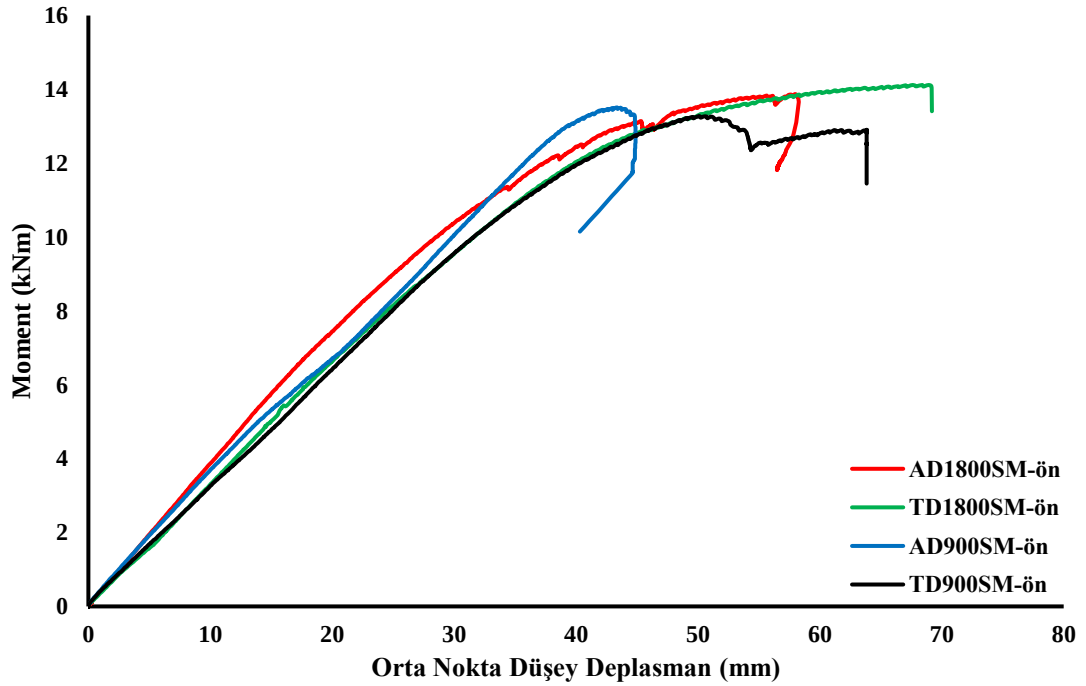
Şekil 4.70. Basit mesnetli deney elemanlarında ön kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.



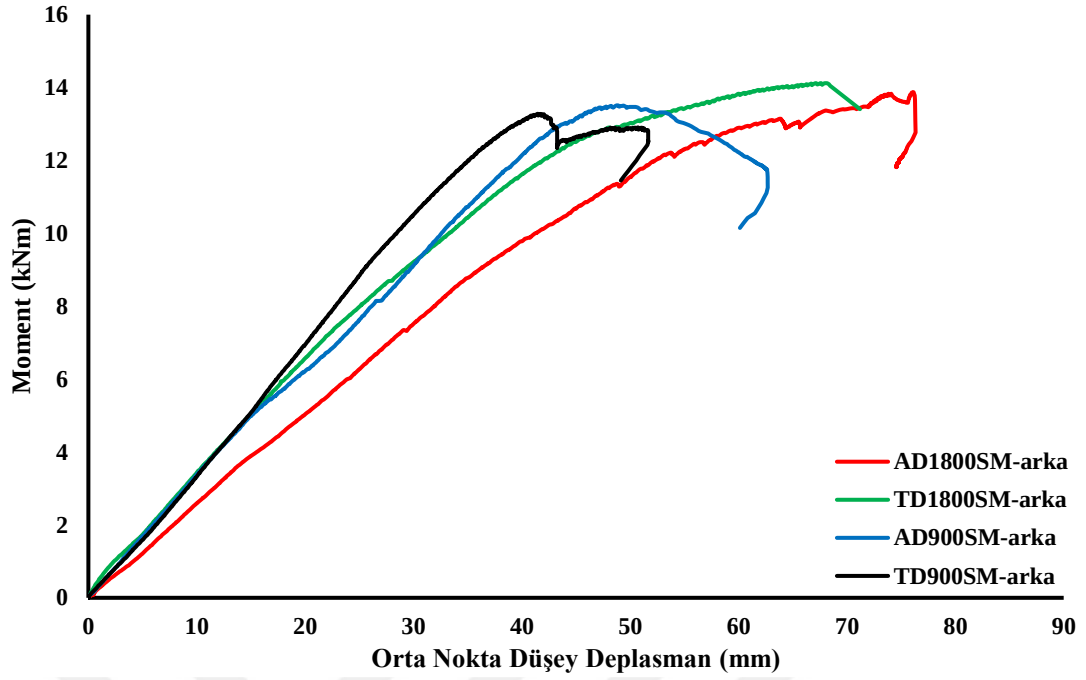
Şekil 4.71. Basit mesnetli deney elemanlarında arka kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.

Çizelge 4.4. Basit mesnetli deney elemanlarının göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları.

Deney Elemanı		Göçme Momenti (kNm)	Dönme Açısı	Yanal Öteleme (mm)	Ortalama Yanal Öteleme (mm)	Göçme Modu
AD4500	Ön	4.9	22.3°	46.5	36.5	LTB
	Arka		18.7°	26.2		
TD4500	Ön	5.0	29°	44	35.8	LTB
	Arka		29°	27.6		
AD1800	Ön	13.1	7°	8	22.7	LTB-LB
	Arka		10.7°	37.4		
TD1800	Ön	13.4	9°	18.6	14.9	LTB-LB
	Arka		8°	11.2		
AD900	Ön	14.1	3.1°	7.2	5.9	LB
	Arka		6°	4.6		
TD900	Ön	14.5	3.3°	8.4	5.5	BB-DB
	Arka		3.6°	2.6		



Şekil 4.72. Sabit mesnetli deney elemanlarında ön kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.



Şekil 4.73. Sabit mesnetli deney elemanlarında arka kiriş moment-düşey deplasman grafiği karşılaştırılması.

Çizelge 4.5. Sabit mesnetli deney elemanlarının göçme momenti, dönme açısı ve yanal öteleme sonuçları.

Deney Elemanı		Göçme Momenti (kNm)	Dönme Açısı	Yanal Öteleme (mm)	Ortalama Yanal Öteleme (mm)	Göçme Modu
AD1800SM	Ön	13.8	8.8°	8	14.5	LTB-LB
	Arka		16.3°	21		
TD1800SM	Ön	14.1	10°	7.8	17.6	LTB-LB
	Arka		13.2°	27.3		
AD900SM	Ön	13.4	3.4°	4	5.3	LB
	Arka		9.7°	6.7		
TD900SM	Ön	13.3	0.1°	4.1	4.9	BB
	Arka		4°	5.6		

5. NÜMERİK ÇALIŞMALAR

Bilgisayar teknolojisi ve bilgisayar programlarının hızla gelişmesi mühendislik, fizik ve bilimsel araştırmalarda sonlu elemanlar yönteminin (FEM) kullanımını önemli ölçüde artırmıştır (Zhao, 2014). Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi özellikle deneysel çalışmalarda pahalı olabilecek problemleri çözmek için güçlü bir hesaplama yöntemi sunmaktadır. Bu sebeple parametrik çalışmalarda sıklıkla tercih edilmekte ve daha ekonomik çözümler sunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde sistem sonlu eleman (finite element) olarak adlandırılan küçük bileşenlere ayrılmakta ve düğüm noktası olarak adlandırılan belirli bağlantı noktaları ile birbirlerine bağlı olduğu kabul edilmektedir. Genellikle matris denklemleri şeklinde olan sonlu eleman denklemlerinin çözülmesiyle düğüm noktasına ait değerler (deplasman, gerilme gibi) elde edilmektedir (Rao, 2017). Sonlu elemanlar analizinin yapıldığı genel amaçlı programlardan bir tanesi de ABAQUS programıdır. Bu tez çalışmasında deneysel çalışmaların doğrulanması ve parametrik çalışmaların uygulanması ABAQUS programı ile yapılmıştır (Abaqus, 2018). ABAQUS programında bir analiz üç basamaktan oluşmaktadır;

- Ön İşleme Aşaması (Pre-Processing): Bu aşamada probleme ait, fiziksel modelleme, malzeme özellikleri, yük ve mesnet koşulları, ağ modelinin oluşturulması gibi ön işlem basamakları tanımlanmaktadır.

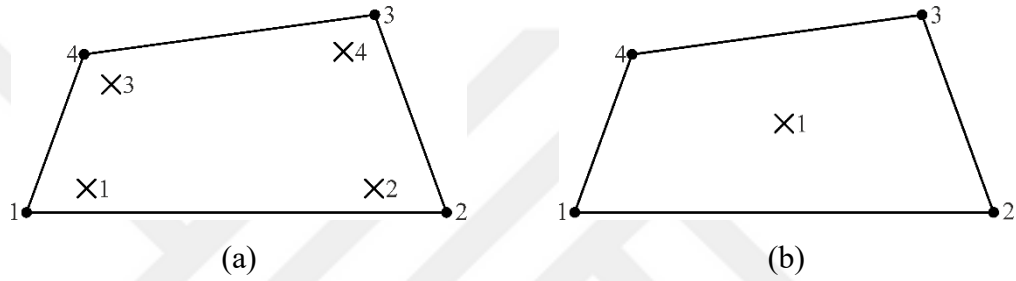
- Simulasyon Aşaması (Simulation): Girdi dosyasında tanımlanan sayısal problemin çözüldüğü aşamadır. Çözüm süresi bilgisayarın gücüne ve problemin boyutuna göre değişiklik gösterebilmektedir.

- İşlem Sonrası Aşaması (Postprocessing): Deformasyon şekillerinin, yük, deplasman, gerilme gibi analiz çıktılarının elde edildiği aşamadır.

5.1 Sonlu Eleman Ağ Modelleri

ABAQUS program kütüphanesinde kabuk elemanların tanımlanmasında S4, S4R ve S4R5 ağ modelleri bulunmaktadır. Bu elemanların isimlendirilmesinde “S” kabuk eleman olduğunu “shell”, “4” rakamı düğüm sayısını, “R” harfi kum saati kontrollü “hourglass control” azaltılmış integrasyon “reduced integration” uygulandığını ve “5” rakamı ise serbestlik derecesini ifade etmektedir (Şekil 5.1). S4 ve S4R ağ modelleri

sonlu membran şekil değiştirmeleri ve büyük dönmelerde uygulanabilirken S4R5 ağ modeli küçük şekil değiştirmelerde ve büyük dönmelerde uygulanmaktadır. Ayrıca S4 ağ modelinde, S4R ve S4R5 ağ modellerinden farklı olarak, azaltılmış integrasyon uygulaması yer almamaktadır. Azaltılmış integrasyon uygulaması, sonlu elemanlar probleminin çözümünde daha az sayıda Gauss noktasının (integrasyon noktası) kullanıldığını ifade etmektedir. Bu ağ modelleri hem kalın hem de ince kabuk modellerinde kullanılabilmekte ve enine kayma deformasyonuna izin vermektedir. Kabuk kalınlığı arttıkça kalın kabuk teorisi kullanılmakta ve kalınlık azaldıkça Kirchhoff ince kabuk elemanları haline gelmektedir (Abaqus, 2018). S4 ve S4R ağ elemanlarının karşılaştırılması yakınsama analizlerinde tartışılmıştır.



Şekil 5.1. Abaqus kütüphanesinde bulunan kabuk elemanlar (a) S4 ve (b) S4R.

5.2 Malzeme Modeli

Deney elemanlarının modellenebilmesi için malzeme modellerinin tanımlanması gerekmektedir. ABAQUS malzeme tanımında lineer elastik malzeme modeli tanımında akma dayanımı, Poisson oranı ve elastisite modülü gibi parametreler yeterli olmaktadır. Ancak lineer ötesi davranışın belirlenmesi için bu parametreler tek başına yeterli olmamakta malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine ihtiyaç duyulmaktadır. Malzeme gerilme-şekil değiştirme modeli elasto-plastik veya izotropik pekleşme tipinde olabilmektedir. Elasto-plastik modelde plastik deformasyon arttıkça akma gerilmesi değişmeden kalırken, izotropik pekleşme modelinde ise akma yüzeyinin boyutunun tüm yönlerde eşit olarak değiştiği anlamına gelir, böylece gerilme plastik şekil değiştirme ile artmaktadır.

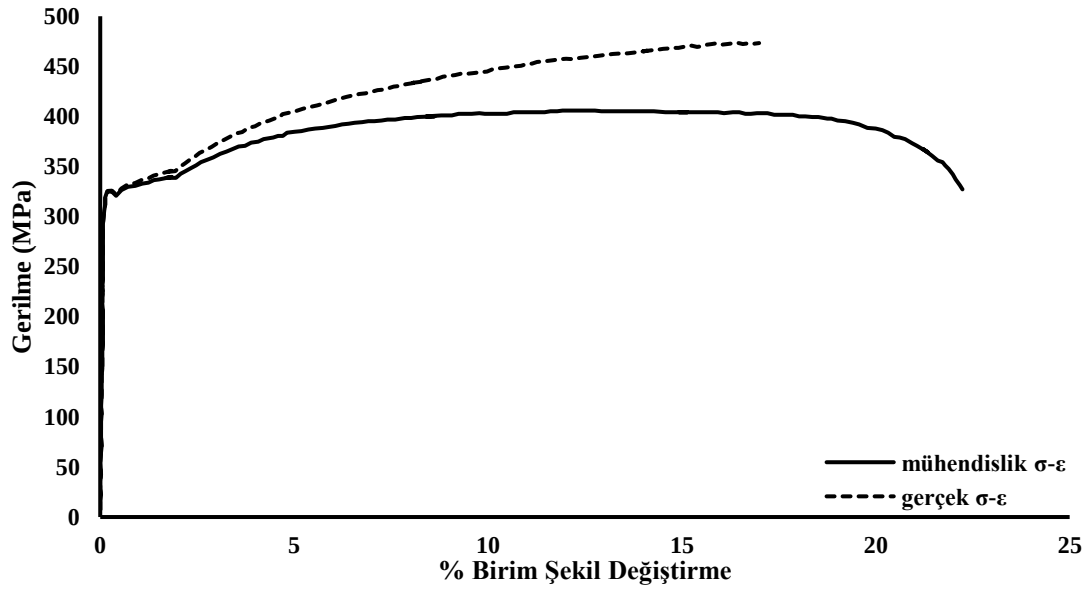
Doğrusal olmayan malzeme davranışı izotropik malzeme modeli ile ABAQUS programında tanımlanmıştır. Çekme testlerinden elde edilen mühendislik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi, Denklem 5.1 ve 5.2'deki dönüşümlerden yararlanılarak gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. Kirişlerin malzeme

modellemesinde elastisite modülü 200000 MPa, Poisson oranı 0.3 ve akma dayanımı 322 MPa olarak tanımlanmıştır. 2.5 ve 2 mm kalınlıktaki kirişlere ve bağlantı kirişlerine ait gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiği sırasıyla Şekil 5.2 ve 5.3'te verilmiştir.

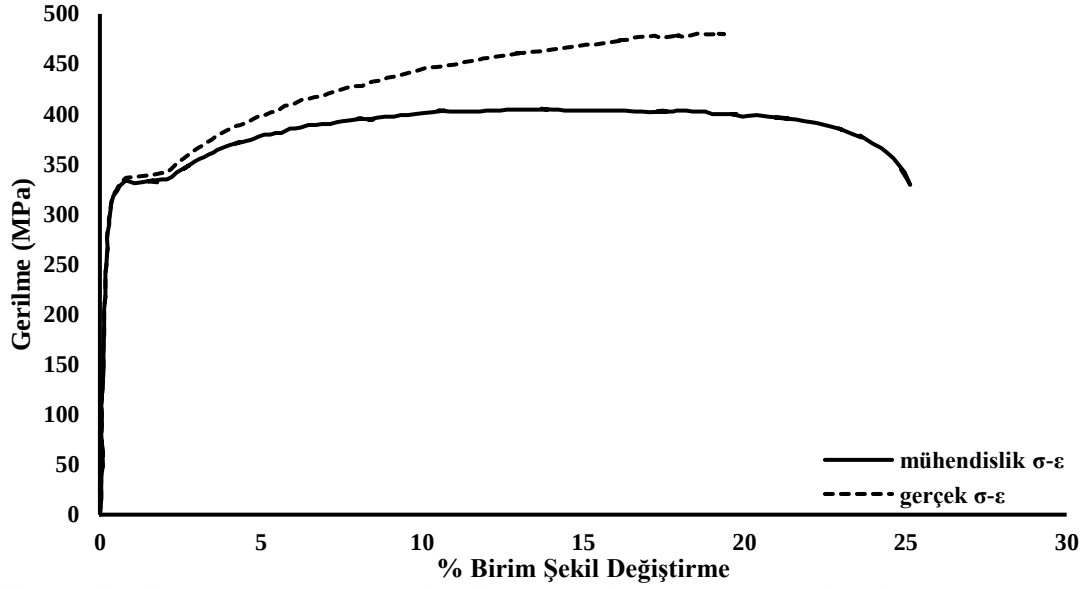
$$\sigma_{ger} = \sigma(1 + \epsilon) \quad (5.1)$$

$$\epsilon_{ger} = \ln(1 + \epsilon) - \frac{\sigma_{ger}}{E} \quad (5.2)$$

Yukarıdaki dönüşümlerde E elastisite modülünü, σ mühendislik gerilmesini, ϵ mühendislik birim şekil değiştirme değerini, σ_{ger} gerçek mühendislik gerilmesini ve ϵ_{ger} gerçek birim şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.



Şekil 5.2. 2.5 mm kalınlıktaki elemana ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.



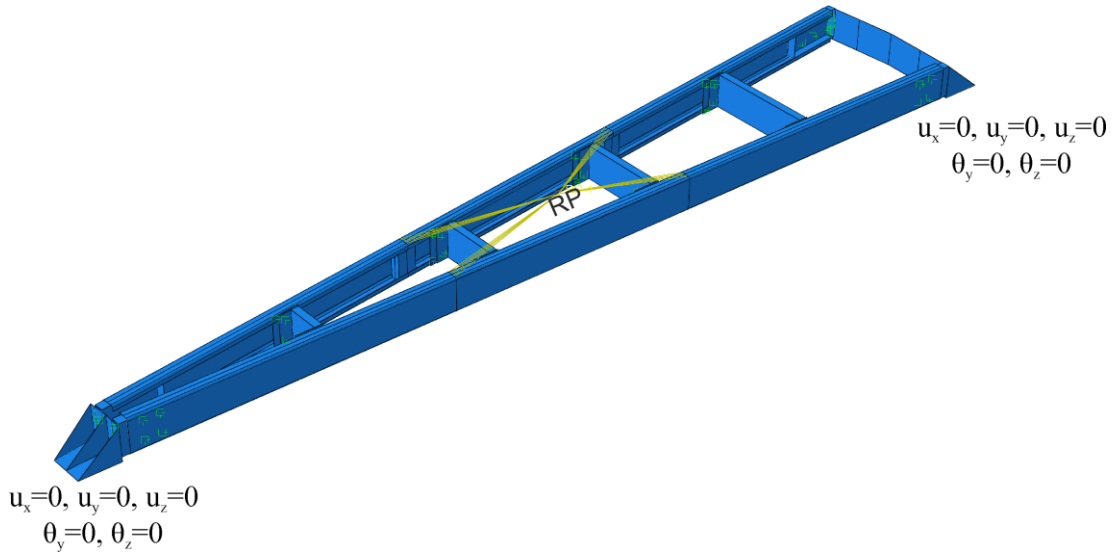
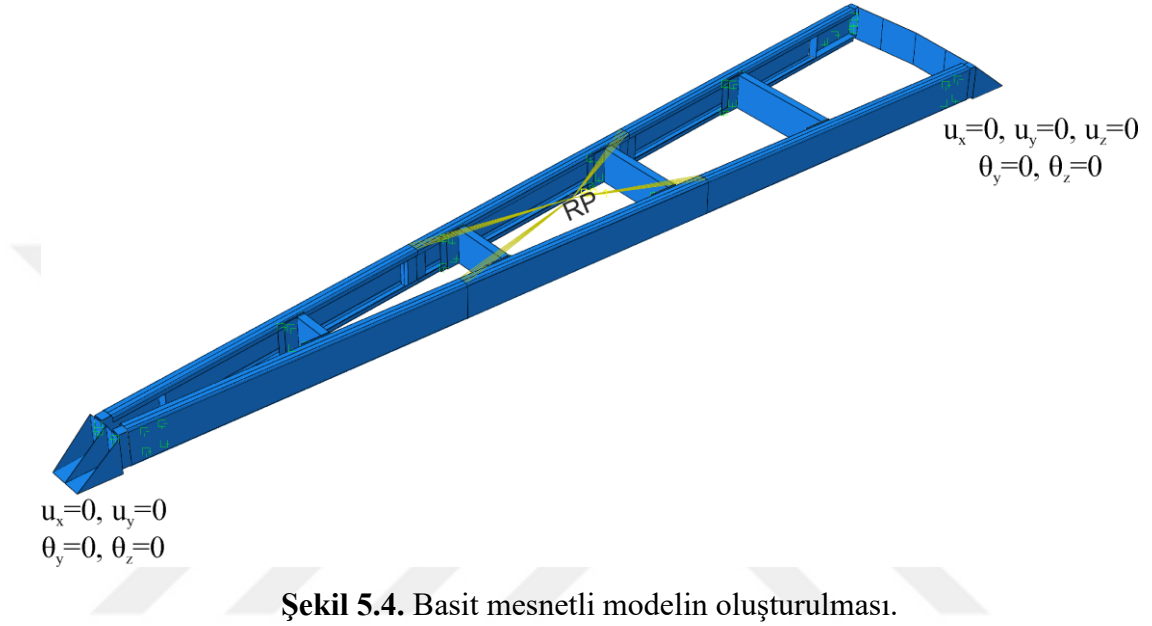
Şekil 5.3. 2 mm kalınlıktaki elemana ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

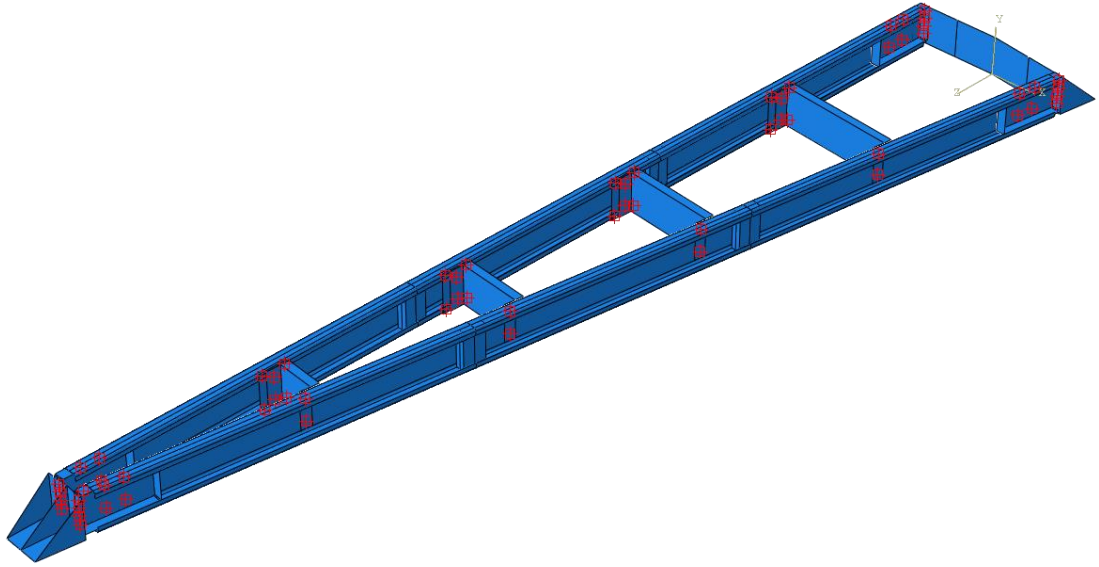
5.3 Mesnet Koşullarının ve Temas Yüzeylerinin Modellenmesi

Sonlu elemanlar modellerinde, basit mesnetli deney elemanlarında bir ucu kayıcı mesnet ($u_x=0$, $u_y=0$, $\theta_y=0$ ve $\theta_z=0$), diğer ucu ise sabit mesnet ($u_x=0$, $u_y=0$, $u_z=0$ $\theta_y=0$ ve $\theta_z=0$) şartlarını sağlayacak şekilde mesnet şartları tanımlanmıştır (Şekil 5.4). Sabit mesnetli deney elemanlarında ise her iki ucu da sabit mesnet şartını ($u_x=0$, $u_y=0$, $u_z=0$ $\theta_y=0$ ve $\theta_z=0$) sağlayacak şekilde mesnet şartları tanımlanmıştır (Şekil 5.5). Deneyde yükleme mesnetleri arası açıklığı 1300 mm olan rijit bir yükleme plakası ile yapılmıştır. Bu sistemi sonlu elemanlar modelinde uygulayabilmek için kirişler arasına referans noktası “reference point” tanımlanmıştır. Referans noktası ile de yüklemenin yapıldığı düğüm noktaları “Coupling” davranışı ile bağlanmıştır. “Coupling” davranışı için ABAQUS kütüphanesinde bulunan “Structural Coupling” seçilmiştir.

Temas yüzeyi özelliklerinin tanımında “Tangential Behavior” ve “Normal Behavior” davranışları aktif edilmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik malzemeler kullanıldığı için sürtünme katsayısı olarak 0.3 alınmış ve “Hard Contact” davranışı seçilmiştir. Ayrıca temastan sonra ayrılmaya izin verilmiştir. Kiriş-bağlantı kirişi, kiriş-uç bağlantı elemanı ve uç bağlantı elemanı-mesnet temas yüzeylerinin tanımlanmasında “Surface-to-Surface” modeli kullanılmıştır. Ayrıca kiriş-ağaç blok temas yüzeylerinde “Tie” modeli tanımlanmıştır.

Bulonların modellenmesine öncelikle ABAQUS kütüphanesinde bulunan konnektör elemanlar “Connector” tanımlanmıştır. Konnektör eleman kütüphanesinde temel eleman kategorisinde bulunan üç serbestlik derecesine sahip “Cartesian” tipi kullanılmıştır. Bulonlar nokta tabanlı olarak “point-based-fastener” modellenmiştir. Kirişlerin birbirine bağlanmasında kullanılan bulonların fiziksel yarıçapı 4 mm olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.6).





Şekil 5.6. Bulonlu birleşimlerin modellenmesi.

5.4 Geometrik Kusurlar

CFS elemanlarda kusurlar imalat sürecinden (rulolama işlemi ve soğukta şekil verme işlemi sırasında), nakliye ve depolamadan, inşaat aşamasındaki işlemlerden kaynaklanabilmektedir. Bu kusurlar ise yapı elemanının burkulma davranışını ve yük taşıma kapasitesini etkilemektedir (Dubina ve Ungureanu, 2002; Zeinoddini ve Schafer, 2012). Genel olarak geometrik kusurlar global ve kesitsel kusurlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Schafer ve Peköz (1998) çalışmalarında kesitsel kusurları lokal ve distorsiyonel kusurlar olacak şekilde iki kategori altında incelemişlerdir (Şekil 5.7). Burada lokal kusurlar (tip 1) d_1 olarak verilirken distorsiyonel kusurlar (tip 2) d_2 olarak ifade edilmiştir. Lokal ve distorsiyonel kusur büyüklüklerinin tanımlanabilmesi için bir tanım dönüşümler tavsiye edilmiştir. Tip 1 için;

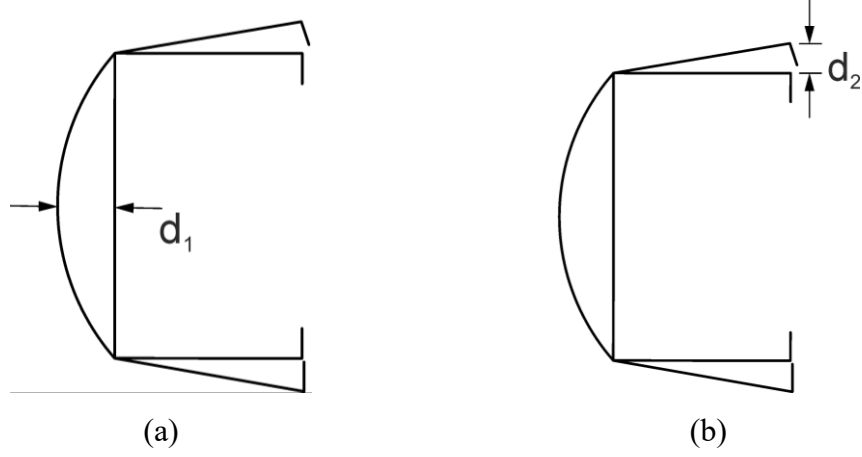
$$d_1 \approx 0.006w \quad (5.3)$$

alternatif olarak

$$d_1 \approx 6te^{-2t} \quad (5.4)$$

Tip 2 için;

$$d_2 \approx t \quad (5.5)$$



Şekil 5.7. Geometrik kusur türleri (a) lokal, (b) distorsiyonel (Schafer ve Peköz, 1998).

Ayrıca araştırmacılar basit kuralların kusur büyüklüğünün tam karakterizasyonunu sağlamada büyük farklılıklar olmasından dolayı alternatif olarak kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) değerlerini önermişler ve Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Maksimum geometrik kusurlar için CDF değerleri (Schafer ve Peköz, 1998).

$P(\Delta < d)$	Tip 1	Tip 2
	d_1/t	d_2/t
0.25	0.14	0.64
0.50	0.34	0.94
0.75	0.66	1.55
0.95	1.35	3.44
0.99	3.87	4.47

ABAQUS programında geometrik kusurların tanımlanması genel yaklaşım, burkulma modlarının belirlenmesi ve burkulma sonrası analizi gerçekleştirmek için aynı model tanımıyla iki analiz çalışmasını içermektedir. Bunlardan birincisi özdeğer burkulma analizidir “eigenvalue buckling analysis”. Özdeğer burkulma analizinde burkulma modları belirlenmektedir. İkinci analiz aşamasında ise elde edilen burkulma modları kusursuz geometriye ölçeklendirilip eklenerek geometride kusur elde edilmektedir. Burada genellikle en düşük burkulma modlarının en kritik kusurları sağladığı varsayılmaktadır (Abaqus, 2018). Geometrik kusurların matematiksel olarak geometriye uygulanması Denklem 5.6’da ifade edilmiştir.

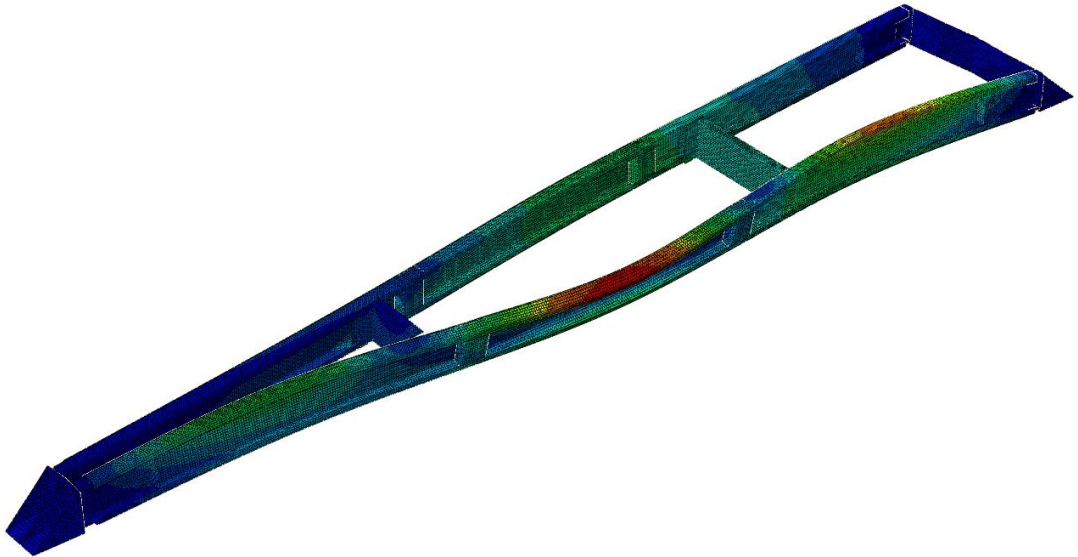
$$\Delta x_i = \sum_{i=1}^M w_i \phi_i \quad (5.6)$$

Burada x_i düğüm noktalarına karşılık gelen kusuru, w_i büyütme katsayısını ve ϕ_i mod şeklini tanımlamaktadır.

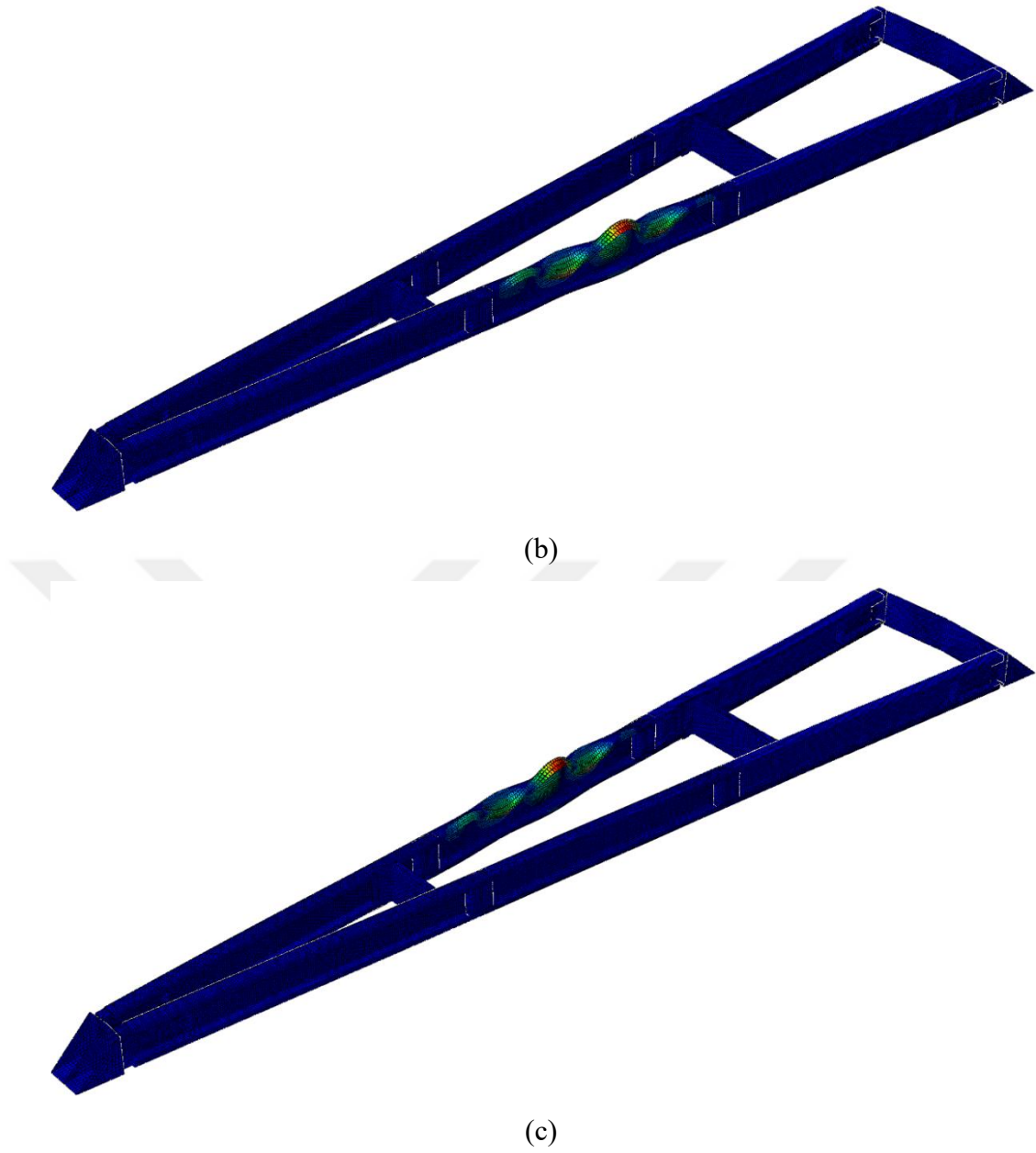
5.5 Analiz Yöntemi

Sonlu elemanlar analizleri iki aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada, geometrik kusurların modele işlenebilmesi amacıyla burkulma analizi “linear perturbation-buckling” gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda deney elemanına ait global ve lokal burkulma modları elde edilmiş ve Şekil 5.78(a-c)’de verilmiştir. Geometrik kusurların kusursuz modele işlenmesinde elde edilen burkulma modları yakınsama analizinde farklı ölçeklendirmeler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

İkinci aşamada ise geometrik kusurların tanımlandığı modellerin yüklenmesi deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. Bu aşamada, doğrusal olmayan geometrik analiz yapılabilmesi için NLGEOM seçeneği aktif edilmiştir. Statik analizde maksimum adım sayısı, ilk, minimum ve maksimum artış genişliği sırasıyla 100000, 0.01, 10^{-15} ve 0.1 olarak belirlenmiştir.



(a)



Şekil 5.8. Hakim burkulma modları (a) global, (b) ve (c) lokal burkulma.

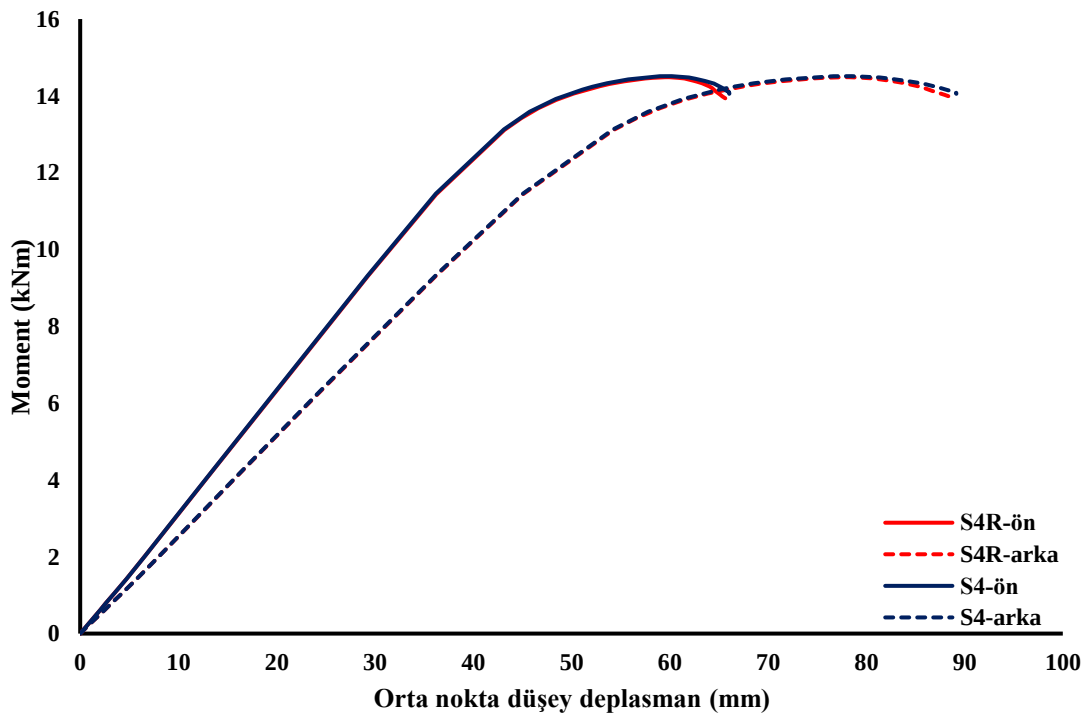
5.6 Yakınsama Analizleri

Deneyisel çalışmalar ile sonlu elemanlar modellemelerinin doğrulamasından önce yakınsama analizleri bağlantı kirişleri arası 1800 mm olan ve kirişlerin aynı yönlü olduğu deney elemanı ile yapılmıştır. Yakınsama analizlerinde ağ modeli tipleri, ağ boyutları ve farklı ölçeklerde geometrik kusurların etkileri incelenmiştir.

5.6.1 Ağ modeli tipleri

Modelde kiriş, bağlantı kirişleri, uç bağlantı elemanları ve mesnet levhalarının tanımlanmasında, ABAQUS kabuk kütüphanesinde bulunan, sonlu membran şekil değiştirmelerine ve büyük dönmelere olanak sağlayan S4 ve S4R ağ modelleri kullanılmıştır. Öte yandan bir diğer kabuk eleman olan ve daha ekonomik sonuçlar sunan (daha düşük dosya boyutları, daha kısa çözüm süresi gibi) S4R5 ağ modeli küçük şekil değiştirmeler ve büyük dönmelerde kullanılabilir olduğu için modelde uygulanamamıştır.

S4R ve S4 elemanların moment-deplasman ilişkisi incelenmiş ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Bu ağ modelleri için moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 14.48 ve 14.51 kNm olarak belirlenmiştir. Ayrıca ağ modelleri benzer moment-deplasman davranışı göstermiştir. Azaltılmış integrasyon uygulaması ile S4R elemanların üç boyutlu modellerde daha doğru sonuçlar vermesi ve çözüm süresine katkı sağlaması araştırmalar ile desteklenmiştir (Pham ve Hancock, 2010; Gunalan, 2011; Peiris ve Mahendran, 2021). Bu nedenle, ağ boyutları ve farklı ölçeklerdeki geometrik kusurların etkisinin incelenmesinde S4R eleman kullanılmıştır.

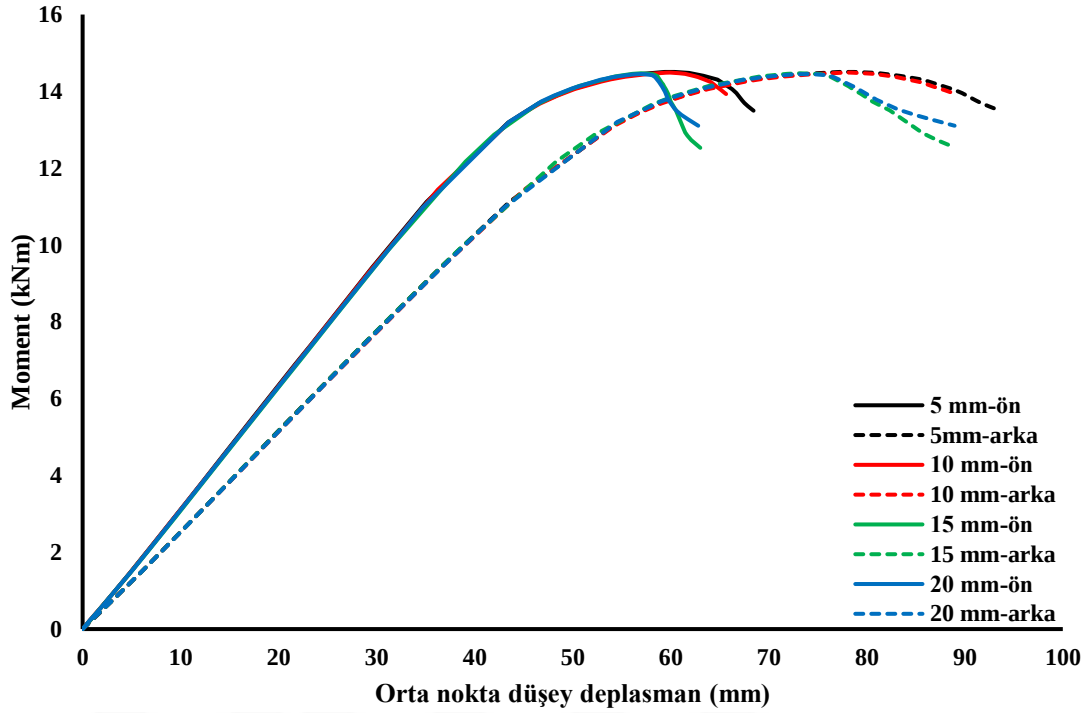


Şekil 5.9. S4 ve S4R eleman için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.

5.6.2 Ağ boyutları

Sonlu elemanlar modellemesinde ağ boyutları önemli bir parametredir. Bu parametrenin modele olan etkisini incelemek amacıyla S4R eleman modeli kullanılarak 5x5, 10x10, 15x15 ve 20x20 mm ağ eleman boyutlarına sahip analizler yapılmıştır. Ağ boyutlarının etkisi karşılaştırılarak moment-deplasman davranışları Şekil 5.10'da verilmiştir. Ağ boyutları için moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 14.50, 14.48, 14.47 ve 14.45 kNm olarak belirlenmiştir. Buna göre maksimum moment kapasitelerinde önemli bir farklılık olmamakta ancak moment-deplasman davranışları farklılık göstermektedir. 5 ve 10 mm'lik ağ boyutlarının moment-deplasman grafikleri birbirleri ile benzerlik gösterirken 15 ile 20 mm'lik ağ boyutları da birbirleri ile benzer davranışı göstermiştir.

Ağ boyutlarının daha sık olmasıyla birlikte çözüm süresi yaklaşık 9 kat artmıştır (Çizelge 5.2). 15 ve 20 mm'lik ağ modellerinde moment-deplasman eğrisinde maksimum moment kapasitesine erişildikten sonra ani bir yük kaybıyla göçme meydana gelmesi ve daha büyük ağ boyutlarının analiz sonuçlarının tutarlı olmasını sınırlandıracağı için bu boyutlar dikkate alınmamıştır. 5 ve 10 mm'lik ağ boyutları kıyaslandığında, 10 mm'lik ağ modelinin daha hızlı çözüm süresi sunduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, farklı ölçeklerdeki geometrik kusurların etkilerini incelemek amacıyla hazırlanacak modellerde 10 mm'lik ağ boyutu tercih edilmiştir.



Şekil 5.10. Ağ boyutları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.

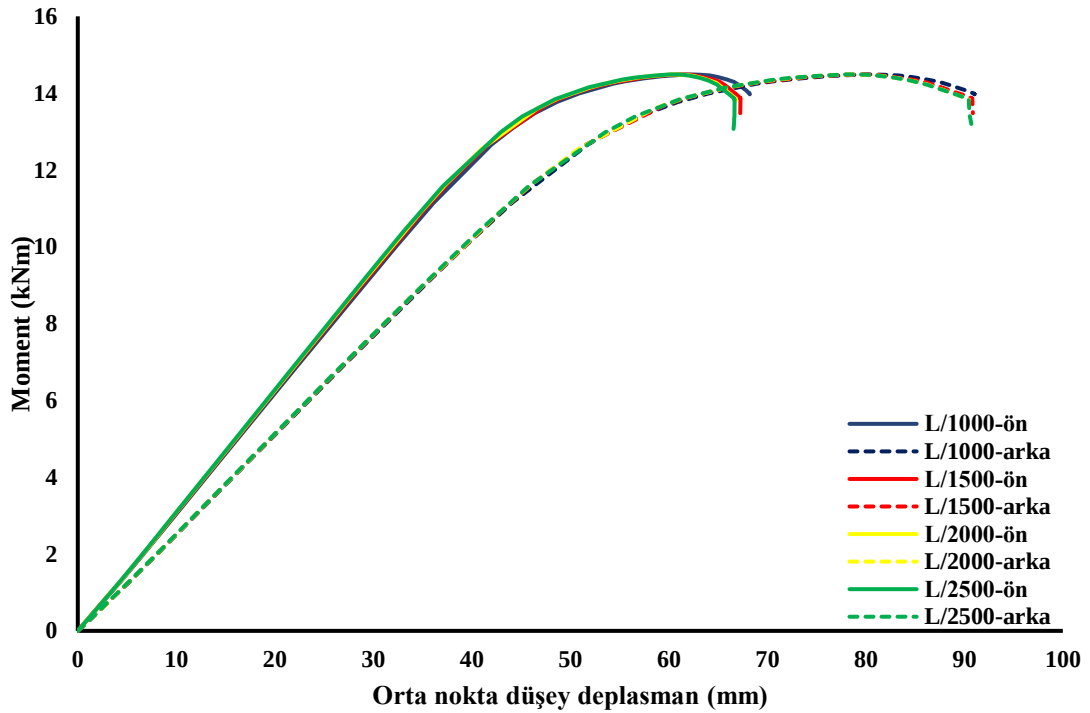
Çizelge 5.2. Ağ boyutlarına ait moment taşıma kapasitesi ve CPU süresi.

Ağ Boyutları (mm)	Moment Taşıma Kapasitesi (kNm)	CPU süresi (sn)
5	14.50	35973
10	14.48	23586
15	14.47	4400.5
20	14.45	4029.6

5.6.3 Geometrik kusurlar

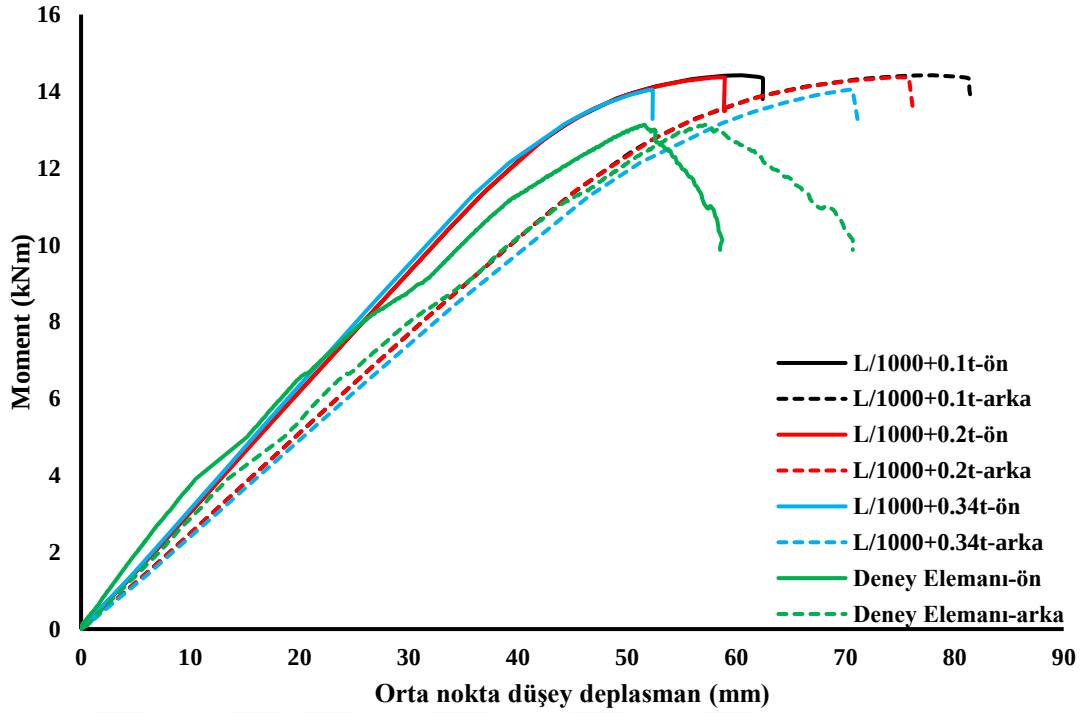
Geometrik kusurların farklı büyütme katsayıları ile ölçeklendirilerek incelenmesi iki aşamada değerlendirilmiştir. İlk olarak, özdeğer burkulma analizi sonucu elde edilen Şekil 5.8 (a)'da verilen global modlar $L/1000$, $L/1500$, $L/2000$ ve $L/2500$ farklı büyütme katsayıları ile ölçeklendirilmiş ve moment-deplasman grafiğinde karşılaştırılmıştır (Şekil 5.11). Analiz sonucunda büyütme katsayılarına göre moment taşıma kapasitesi değerleri sırasıyla 14.48, 14.48, 14.48 ve 14.49 kNm olarak elde edilmiştir. Global burkulma büyütme katsayılarının hem moment taşıma kapasitesinde hem de moment-deplasman davranışında önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle, deney elemanlarını modellemede yalnızca global kusurları tanımlamanın yeterli olmadığı, aynı zamanda lokal kusurların da bu modele eklenmesi gerektiği

sonucuna varılmıştır. Bir sonraki aşamada lokal kusurlar ile global kusurlar birleştirilirken L/1000 global büyütme katsayısı kullanılmıştır.

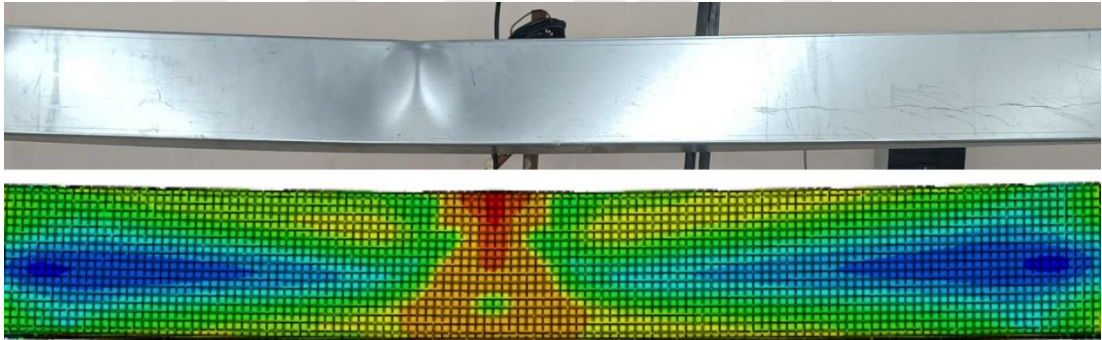


Şekil 5.11. Global kusur ölçeklendirme katsayıları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.

İkinci aşamada ise özdeğer burkulma analizi sonucunda elde edilen lokal burkulma modları (Şekil 5.8 (b-c)) global burkulma modları ile birleştirilerek 0.1t, 0.2t, ve 0.34t büyütme katsayıları ile ölçeklendirilmiştir. Büyütme katsayılarının etkisi moment-deplasman grafiğinde karşılaştırılmıştır (Şekil 5.12). Schafer ve Peköz (1998) tarafından kümülatif dağılım fonksiyonunda aşılma olasılığı %50 olan 0.34t değeri hedef büyütme katsayısı olarak dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda, büyütme katsayılarına göre moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 14.42, 14.36, 14.0 kNm olarak elde edilmiştir. 0.1t ve 0.2t büyütme katsayılarına sahip modellerin moment taşıma kapasiteleri (M_{fea}), deney elemanının moment kapasitesi (M_{den}) ile karşılaştırıldığında M_{fea}/M_{den} yaklaşık %10 civarında olduğu belirlenmiştir. 0.34t büyütme katsayısı uygulanan modelde ise M_{fea}/M_{den} yaklaşık %7'dir. Ayrıca 0.34t büyütme katsayısı uygulanan model ile deney elemanının göçme modlarının uyum içerisinde olduğu belirlenmiş ve Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Lokal kusur ölçeklendirme katsayıları için moment-deplasman grafiğinin karşılaştırılması.



Şekil 5.13. Deney ile sonlu elemanlar modeli göçme modlarının karşılaştırılması.

5.6.4 Sonuçlar

Yakınsama analizlerinde ağ model tiplerinin, ağ boyutlarının ve farklı büyütme katsayılarının uygulandığı global ve lokal geometrik kusurların etkisi incelenmiştir. S4R ağ modeli tipinin azaltılmış integrasyon uygulamasına sahip olması, üç boyutlu modellerde daha tutarlı sonuç vermesi ve kabuk elemanların tanımlanmasında birçok araştırmacı tarafından tercih edilmesi sebebiyle modelde kullanılmasına karar verilmiştir. Ağ boyutlarının azalmasıyla çözüm süresinde önemli ölçüde artış görülmüş, bu da analizin ekonomik olmaktan çıkmasına neden olmuştur. Test edilen ağ boyutları arasında daha ekonomik ve doğru sonuçlar veren 10 mm'lik ağ boyutu

tercih edilmiştir. Bu tercih, hem analizin optimize edilmesi hem de doğruluk seviyesinin korunması amacını taşımaktadır.

Geometrik kusurların etkisi incelendiğinde, deney elemanının modellenmesinde yalnızca global kusurların tanımlanmasının yeterli olmadığı, lokal kusurların da eklenmesi gerektiği belirlenmiştir. Global ve lokal kusurların birlikte etkisi dikkate alındığında en etkili yaklaşımın $L/1000+0.34t$ büyütme katsayısında olduğu belirlenmiştir. Bu yaklaşım, hem global hem de lokal kusurların etkisini uygun bir şekilde hesaba katarak modelin doğruluğunu artırmaktadır.

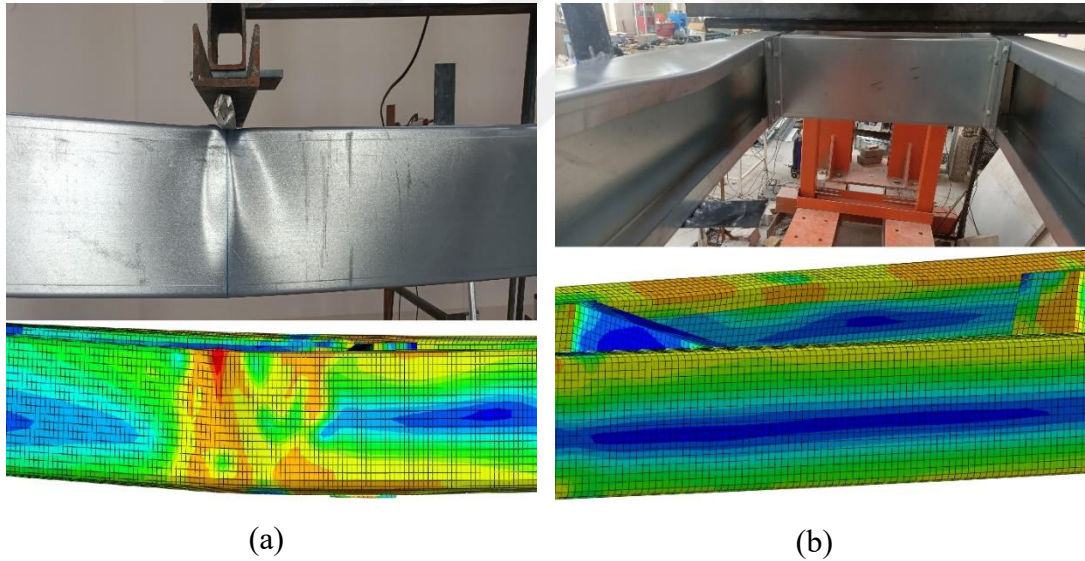
5.7 Sonlu Elemanlar Analizlerinin Doğrulanması

Sonlu elemanlar analizlerinin doğrulanmasında, yakınsama analizleri sonucunda belirlenen $L/1000+0.34t$ büyütme katsayılı global ve lokal kusurlar, modellerde birleştirilerek uygulanmıştır. Doğrulama sürecinde, modellerin moment-deplasman grafiği ve göçme şekilleri, basit mesnetli ve sabit mesnetli deneysel sonuçlarla ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, sonlu elemanlar modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olup olmadığını değerlendirmek için yapılmıştır.

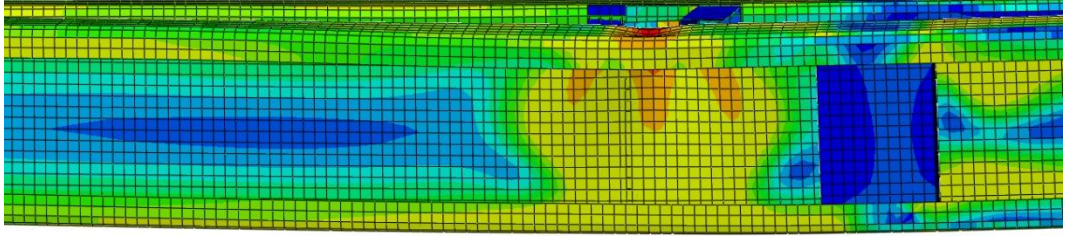
5.7.1 Basit mesnetli modellerin doğrulanması

Sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması için basit mesnetli deney elemanları modellenmiş ve moment-deplasman eğrileri ile göçme modları karşılaştırılarak modellemelerin doğruluğu değerlendirilmiştir (Şekil 5.14). Sonlu elemanlar analizleri sonucunda, deneylerle uyumlu olarak yanal burulmalı burkulma (LTB), yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma (LTB-LB), lokal burkulma (LB) ve yükleme noktasının ezilmesi ve distorsiyonel burkulma (BB-DB) göçme modları elde edilmiştir. AD4500 ve TD4500 deney elemanlarında moment taşıma kapasitesi sırasıyla 5.3 ve 5.6 kNm olarak elde edilmiş ve göçme yanal burulmalı burkulma (LTB) modunda gerçekleşmiştir (Şekil 5.14 (f-g)). AD1800 ve TD1800 deney elemanlarında moment taşıma kapasitesi sırasıyla 14.0 ve 14.3 kNm olarak elde edilmiş ve göçme yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma modunda (LTB-LB) gerçekleşmiştir (Şekil 5.14 (d-e)). AD900 deney elemanında moment taşıma kapasitesi 13.8 kNm olarak elde edilmiştir. Modelde göçme, sabit moment bölgesinde kiriş gövdesinde lokal burkulma oluşması sonucunda gerçekleşmiştir (Şekil 5.14 (c)). TD

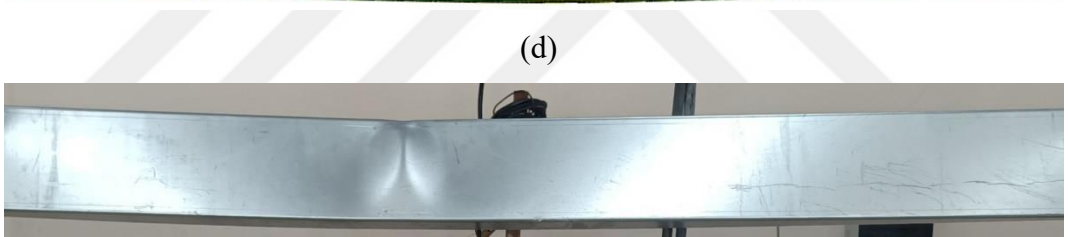
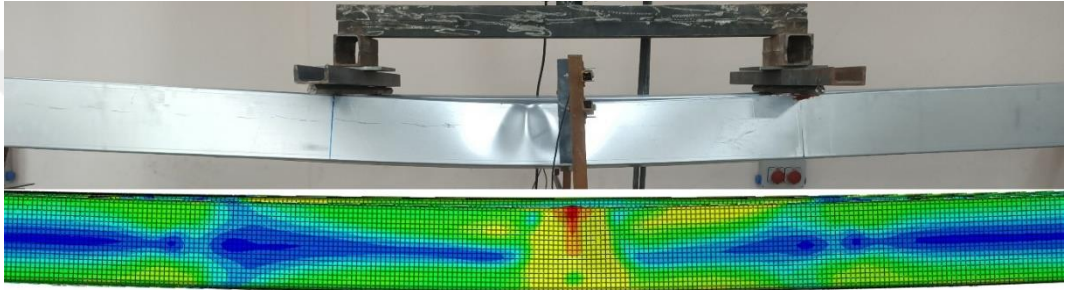
900 deney elemanında ise moment taşıma kapasitesi 15.6 kNm olarak elde edilmiştir. Modelde göçme, yükleme noktalarının ezilmesi ve açıklık ortasında kiriş üst başlığının distorsiyonel burkulması (BB-DB) sonucunda meydana gelmiştir (Şekil 5.14 (a-b)). Çizelge 5.3'te modellerin göçme modları ve maksimum moment değerleri verilmiştir. Deneyler ile sonlu elemanlar analizlerinin moment taşıma kapasitesi değerlerinin oransal olarak (M_{fea}/M_{den}) en düşük, en yüksek ve ortalaması sırasıyla 0.98, 1.12 ve 1.06 (değişim katsayısı $COV=0.044$) olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile deneyler arasındaki farklılık oluşmasının sebebi gerçekteki gibi deney düzeneğinin modele tam olarak aktarılamaması, fabrikadan getirilen deney elemanlarının malzemelerinin belirsizliği, deney elemanlardaki kusurların ölçülememesi, yükleme noktasındaki kaçıklıklar gibi belirsizlikler olduğu düşünülmektedir. Deney elemanlarının sonlu elemanlar analizleri ile moment-orta nokta düşey deplasman eğrileri karşılaştırılması Şekil 5.15-20'de verilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile deney sonuçlarının tutarlı olduğu tespit edilmiştir.



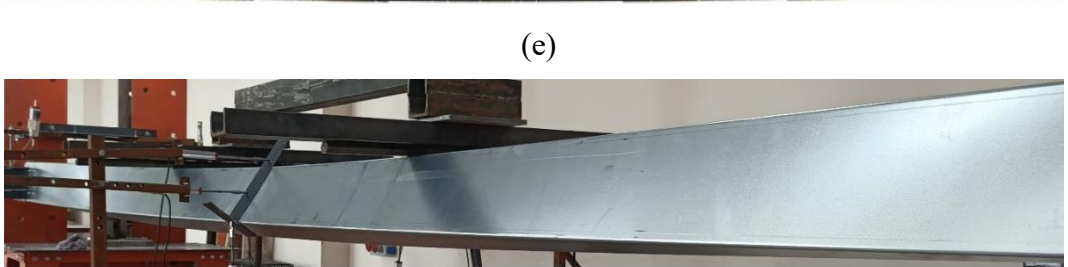
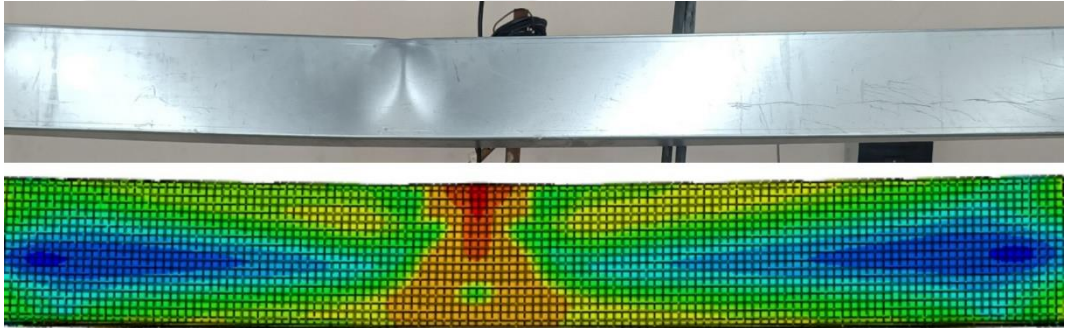
Şekil 5.14. Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (a) ve (b) TD900.



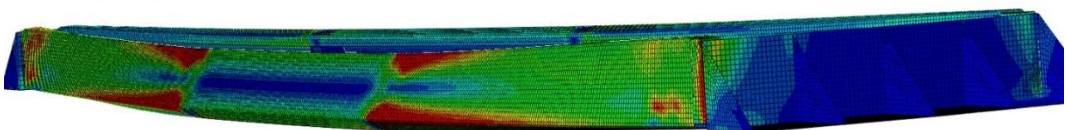
(c)



(d)

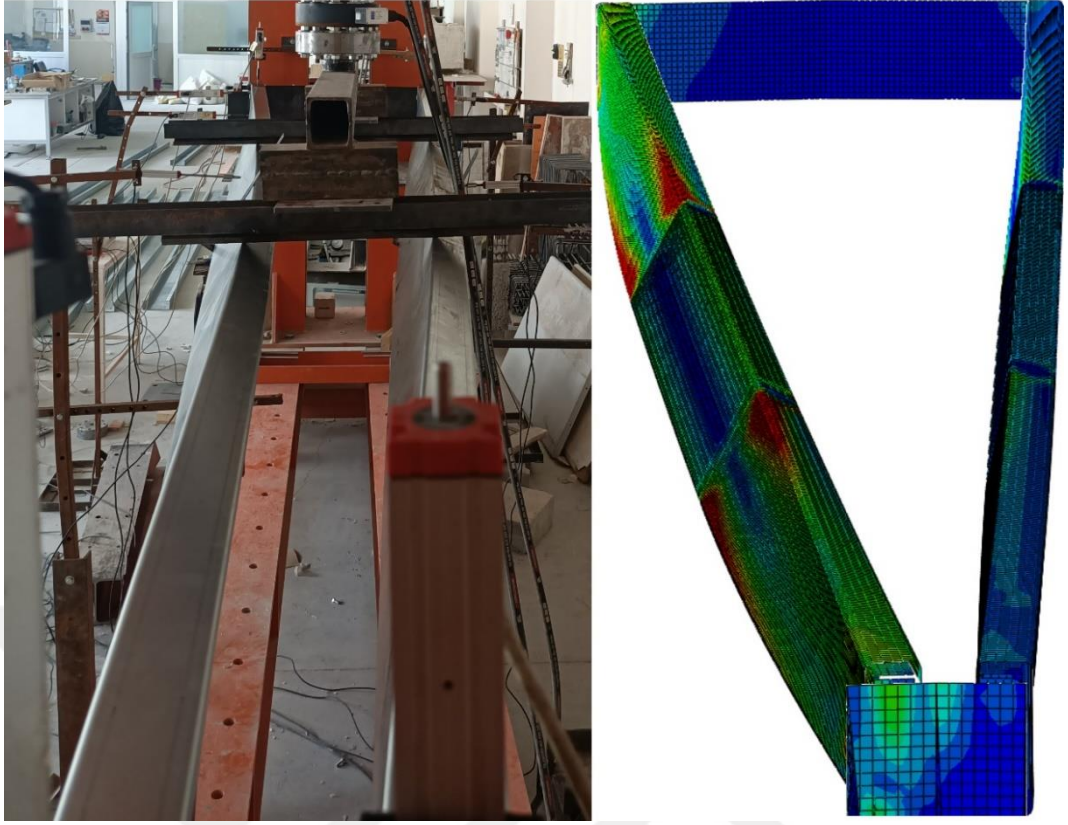


(e)



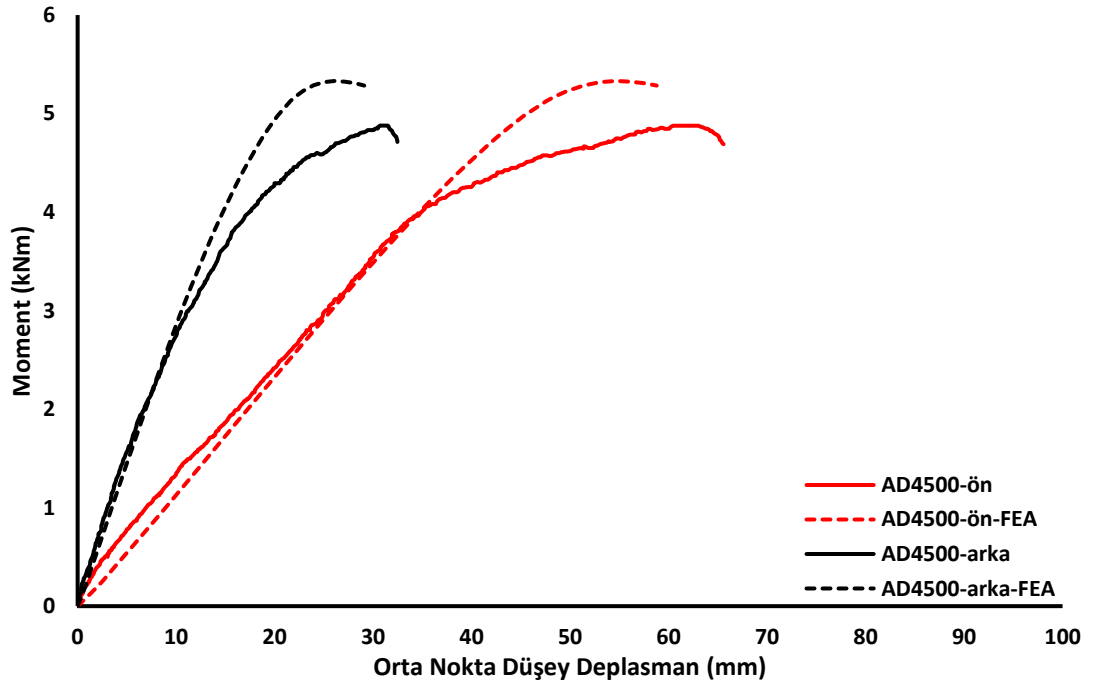
(f)

Şekil 5.14 (devam). Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (c) AD900, (d) TD1800 (e) AD1800 (f) TD4500.

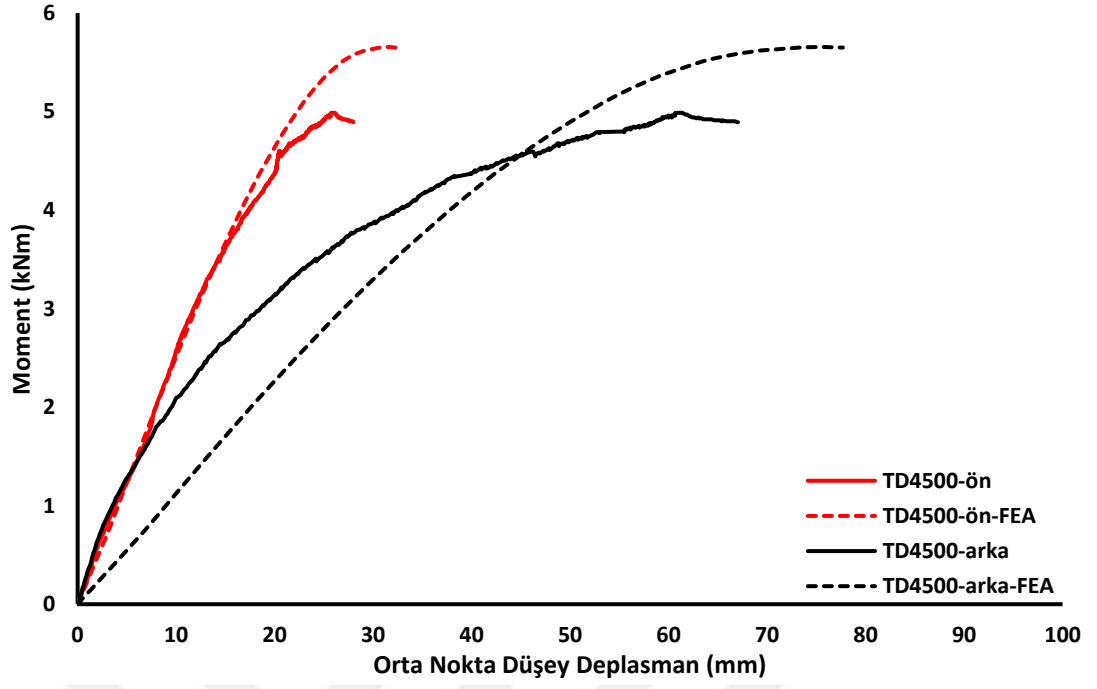


(g)

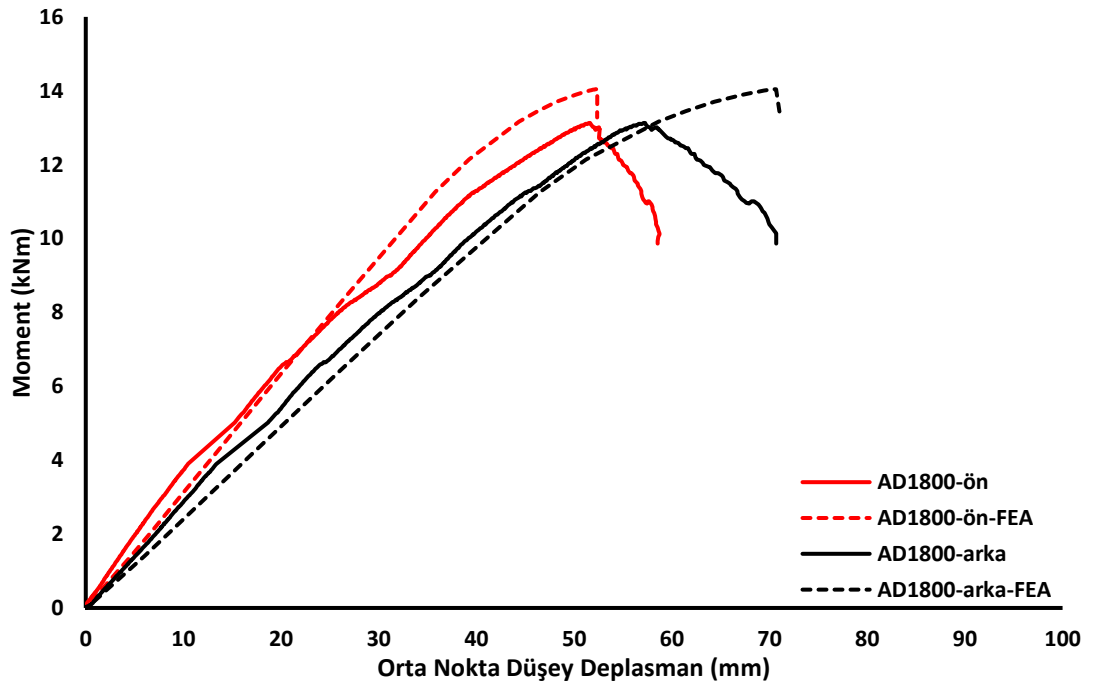
Şekil 5.14 (devam). Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (g) AD4500.



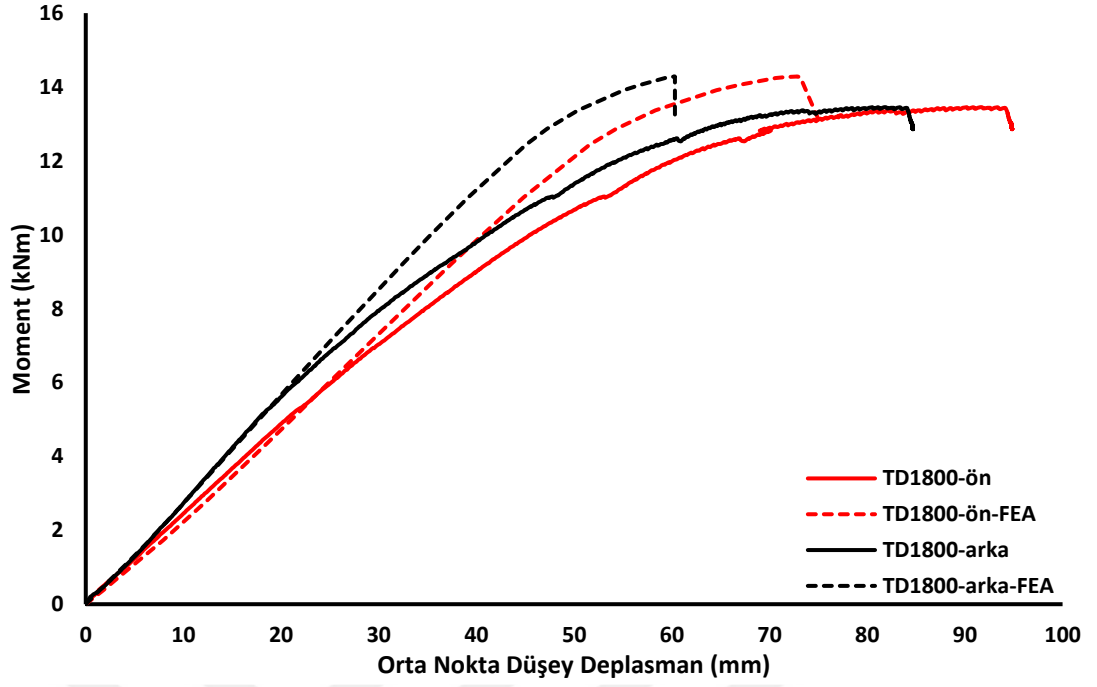
Şekil 5.15. AD4500 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



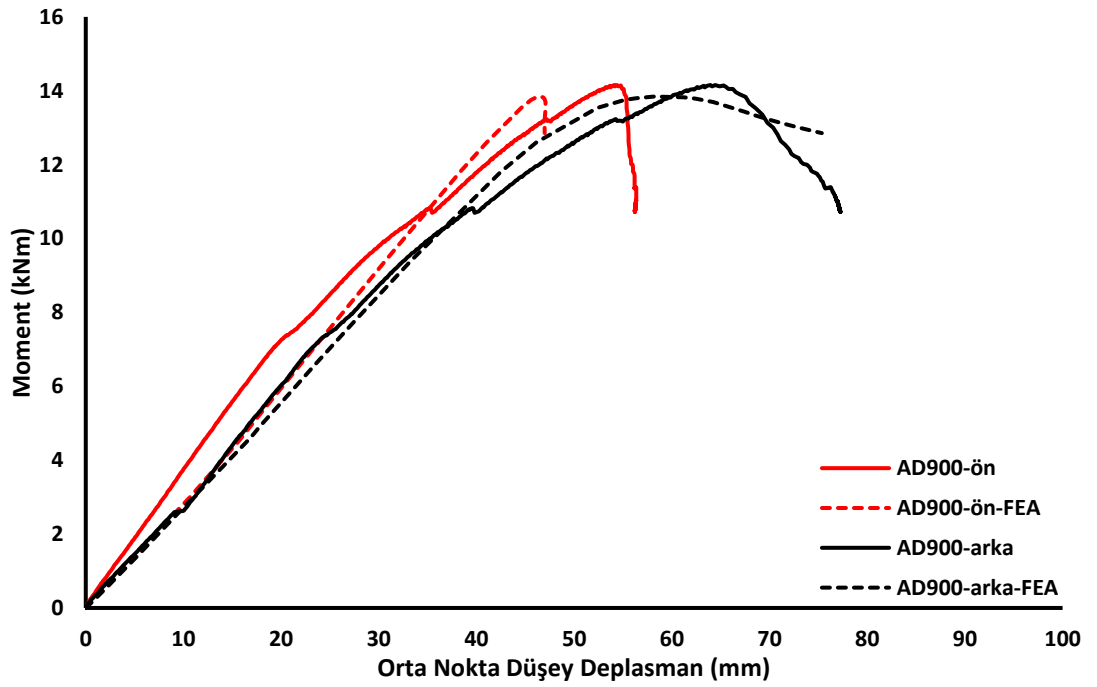
Şekil 5.16. TD4500 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



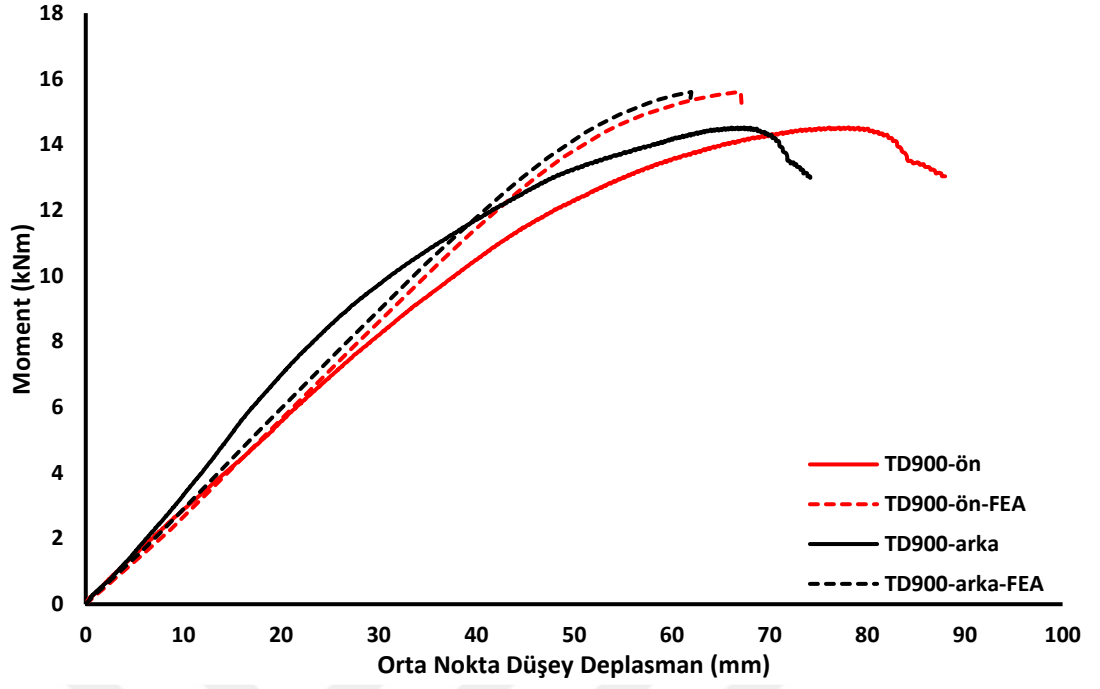
Şekil 5.17. AD1800 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



Şekil 5.18. TD1800 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



Şekil 5.19. AD900 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



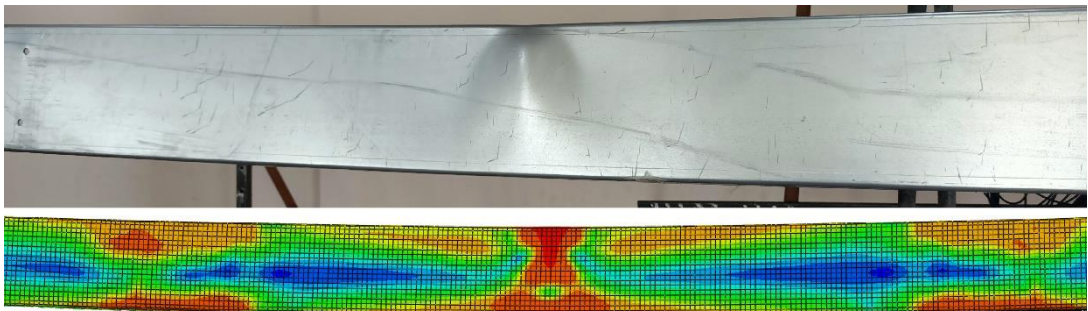
Şekil 5.20. TD900 deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.

Çizelge 5.3. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney Elemanı	L_{br}	Kiriş Yönlendirmesi	Narinlik Oranı ($\lambda_1 - \lambda_d$)	Göçme Momenti Deneyisel (kNm)	Deneyisel Göçme Modu	Göçme Momenti FEA (kNm)	FEA Göçme Modu	M_{fea}/M_{den}
AD4500	4500	Aynı Yön	0.53-0.6	4.9	LTB	5.3	LTB	1.08
TD4500	4500	Ters Yön	0.53-0.6	5.0	LTB	5.6	LTB	1.12
AD1800	1800	Aynı Yön	0.53-0.6	13.1	LTB-LB	14.0	LTB-LB	1.06
TD1800	1800	Ters Yön	0.53-0.6	13.4	LTB-LB	14.3	LTB-LB	1.06
AD900	900	Aynı Yön	0.53-0.6	14.1	LB	13.8	LB	0.98
TD900	900	Ters Yön	0.53-0.6	14.5	BB-DB	15.6	BB-DB	1.07
En düşük								0.98
En yüksek								1.12
Ortalama								1.06
Standart Sapma								0.047
Değişim Katsayısı (COV)								0.044

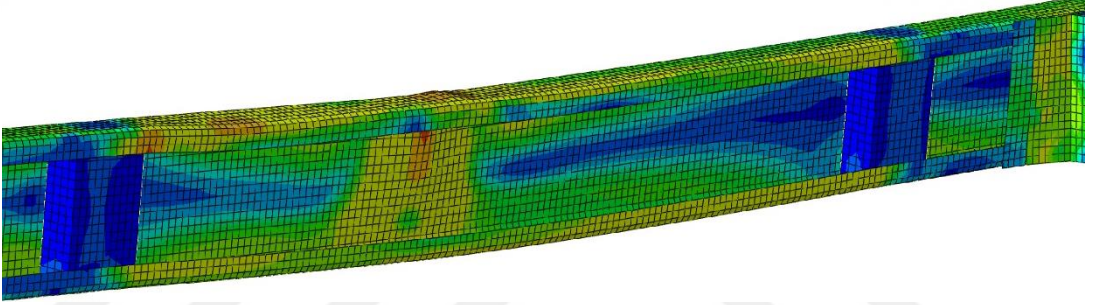
5.7.2 Sabit mesnetli modellerin doğrulanması

Sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması için sabit mesnetli deney elemanlarının hepsi modellenerek moment deplasman eğrileri ve elemanların göçme modları karşılaştırılarak modellemelerin doğrulanması yapılmıştır ve Şekil 5.21’de verilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonucunda, deneyler ile benzer şekilde yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma (LTB-LB), lokal burkulma (LB) ve yükleme noktasının ezilmesi (BB) göçme modları elde edilmiştir. AD1800SM ve TD1800SM deney elemanlarında moment taşıma kapasitesi sırasıyla 14.1 ve 14.4 kNm olarak elde edilmiş ve göçme yanal burulmalı burkulma ve lokal burkulma modunda gerçekleşmiştir (LTB-LB). AD900SM deney elemanında moment taşıma kapasitesi 14.0 kNm olarak elde edilmiştir. Modelde göçme, sabit moment bölgesinde giriş gövdesinde lokal burkulma oluşması sonucunda gerçekleşmiştir (Şekil 5.21 (c)). TD900SM deney elemanı ise moment taşıma kapasitesi 14.1 kNm olarak elde edilmiş ve göçme yükleme noktasının ezilmesi sonucu meydana gelmiştir (Şekil 5.21 (d)). Çizelge 5.4’te modellerin göçme modları ve maksimum moment değerleri verilmiştir. Deneyler ile sonlu elemanlar analizlerinin moment taşıma kapasitesi değerlerinin oransal olarak (M_{fea}/M_{den}) en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri sırasıyla 1.02, 1.06 ve 1.035 (değişim katsayısı $COV=0.018$) olarak elde edilmiştir. Deney elemanları ile sonlu elemanlar analizlerine ait moment-orta nokta düşey deplasman eğrileri Şekil 5.22-25’te verilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinin deney sonuçları ile tutarlı olduğu belirlenmiştir.

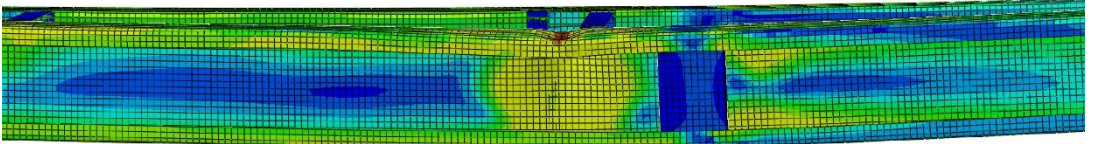


(a)

Şekil 5.21. Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (a) AD1800SM.

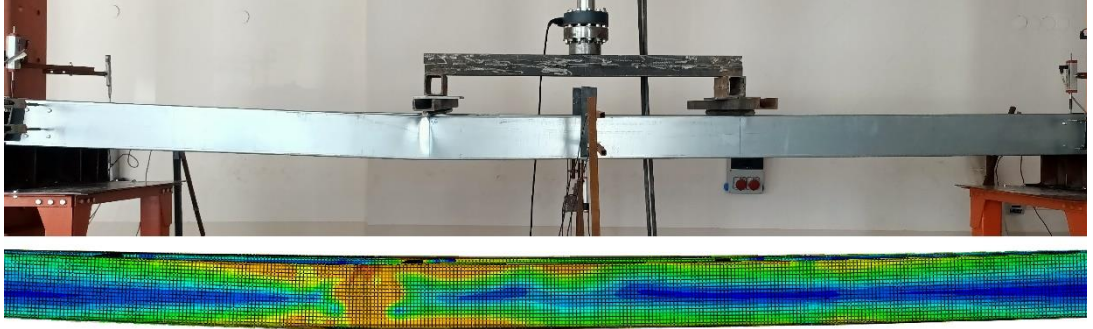


(b)



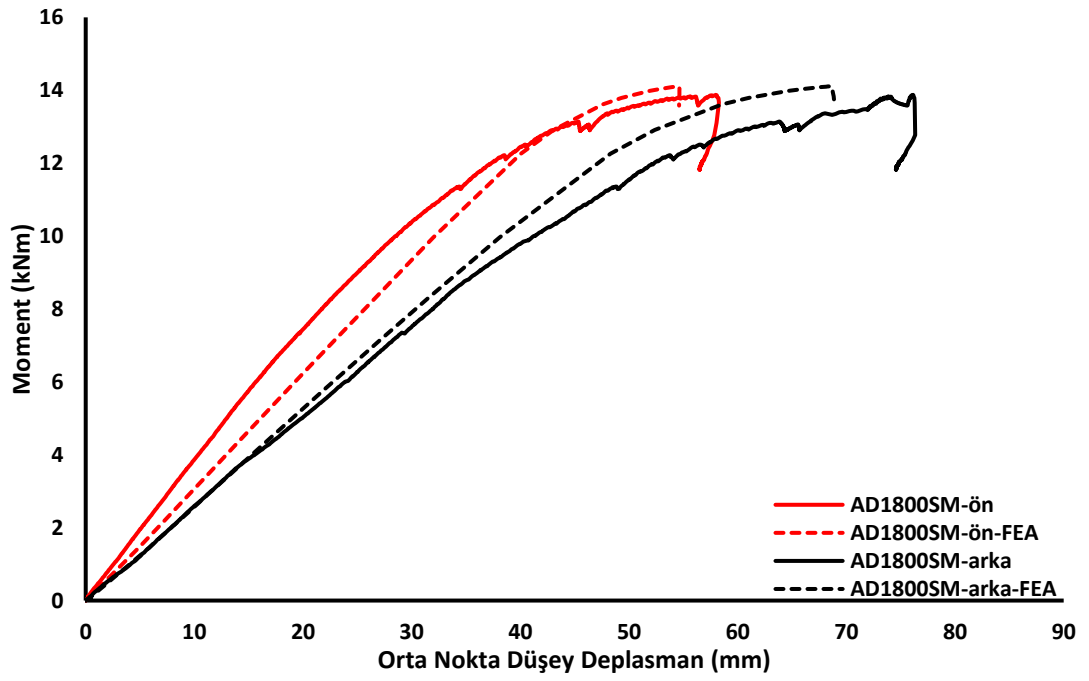
(c)

Şekil 5.21 (devam). Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (b) TD1800SM ve (c) AD900SM.

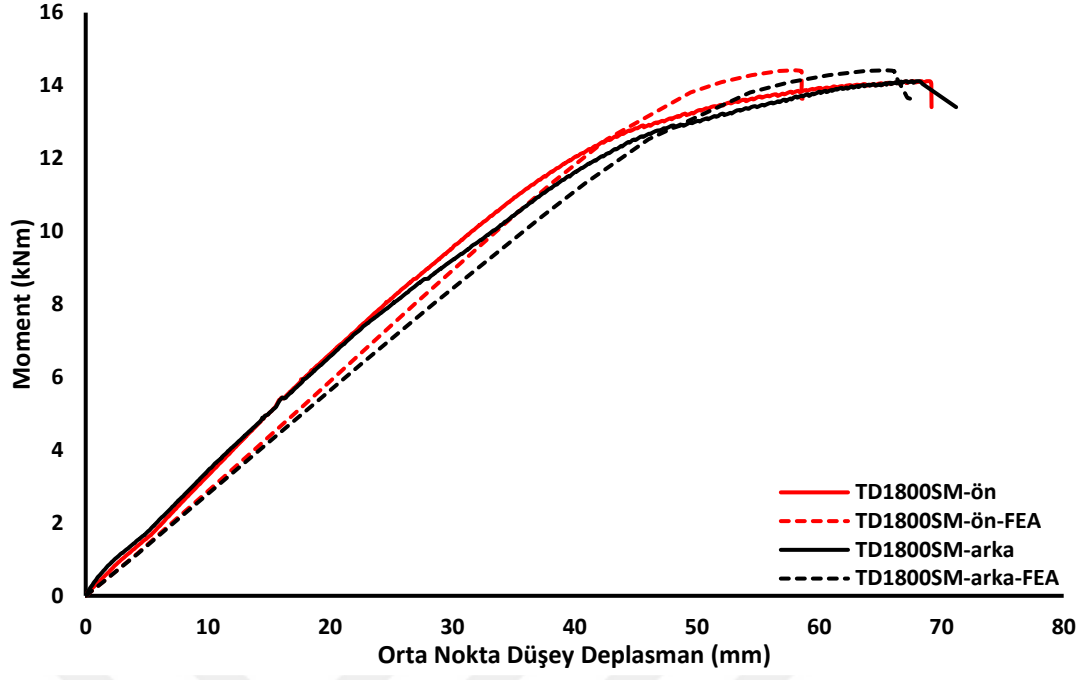


(d)

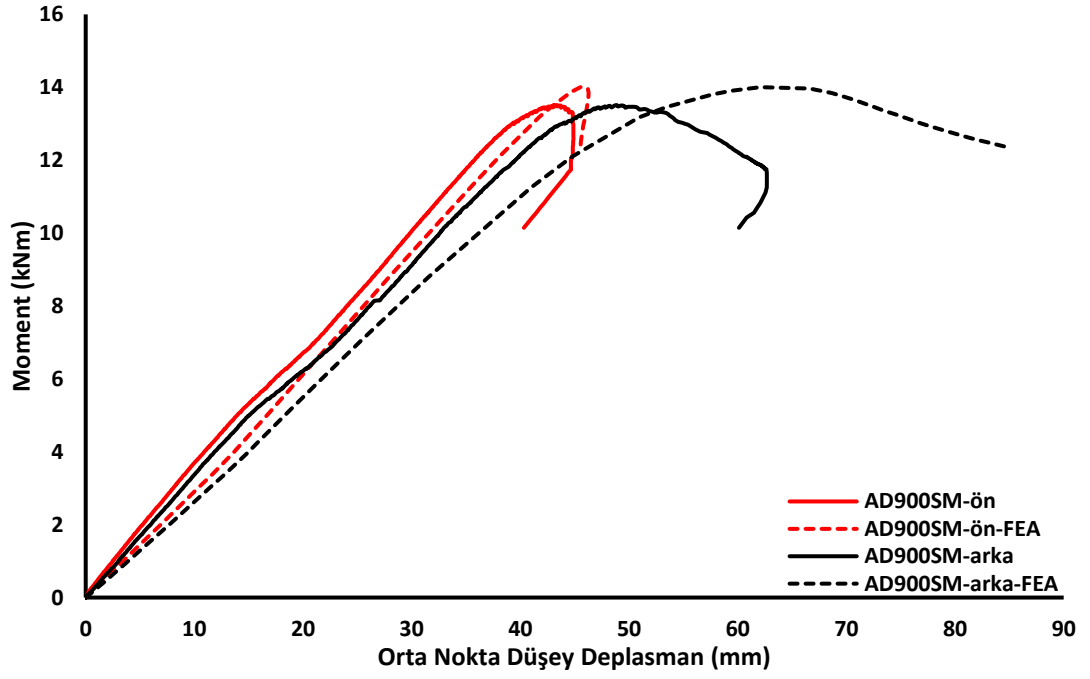
Şekil 5.21 (devam). Deney ile sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen göçme modlarının karşılaştırılması (d) TD900SM.



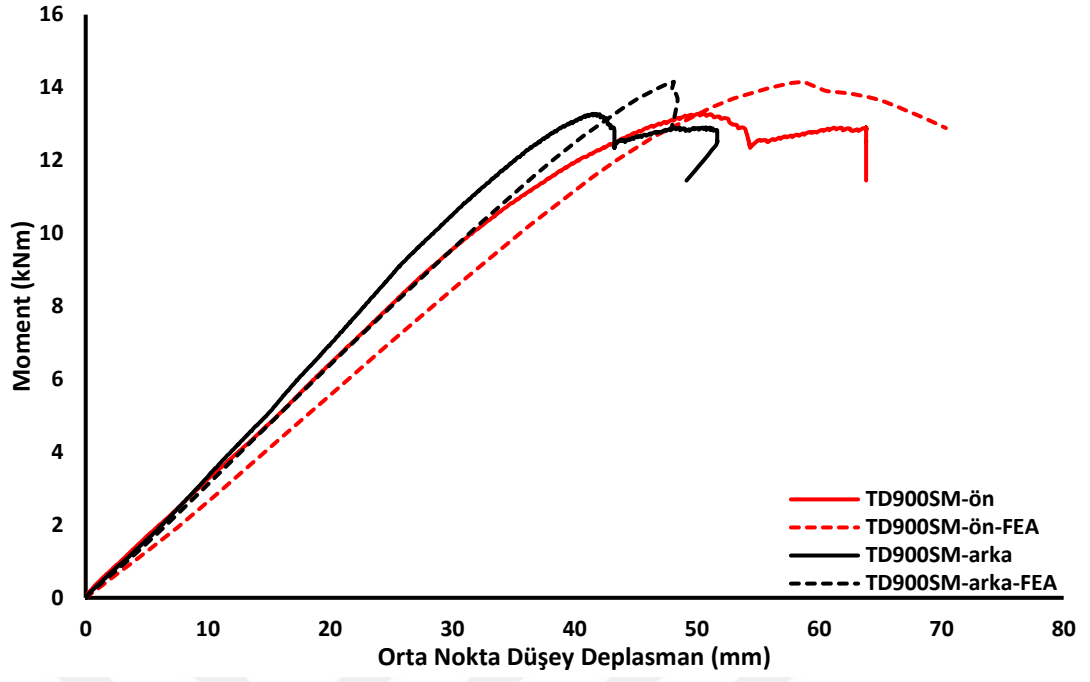
Şekil 5.22. AD1800SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



Şekil 5.23. TD1800SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.



Şekil 5.24. AD900SM deney elemanına ait moment deplasman eğrisi.



Şekil 5.25. TD900SM deney elemanına ait moment-deplasman eğrisi.

Çizelge 5.4. Sabit mesnetli deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırılması.

Deney Elemanı	L_{br}	Kiriş Yönlendirmesi	Narinlik Oranı (λ_t- λ_d)	Göçme Momenti Deneyisel (kNm)	Deneyisel Göçme Modu	Göçme Momenti FEA (kNm)	FEA Göçme Modu	M_{fea}/M_{den}
AD1800SM	1800	Aynı Yön	0.53-0.6	13.8	LTB-LB	14.1	LTB-LB	1.02
TD1800SM	1800	Ters Yön	0.53-0.6	14.1	LTB-LB	14.4	LTB-LB	1.02
AD900SM	900	Aynı Yön	0.53-0.6	13.4	LB	14.0	LB	1.04
TD900SM	900	Ters Yön	0.53-0.6	13.3	BB	14.1	BB	1.06
En düşük								1.02
En yüksek								1.06
Ortalama								1.035
Standart Sapma								0.018
Değişim Katsayısı (COV)								0.018

5.8 Parametrik Çalışmalar

Sonlu elemanlar modellerinin deneysel çalışmalar ile doğrulanması sonucunda parametrik çalışmalar yapılmıştır. Parametrik çalışmaların yapılmasının amacı deneysel çalışmada incelenmeyen değişkenlerin araştırılmasıdır. Parametrik modellerde değişken olarak kirişlerin kesit yüksekliğinin kesit kalınlığına oranı (h/t) ve bağlantı kirişleri kesit kalınlıklarının kirişlerin moment taşıma kapasitesine ve göçme davranışına olan etkisi incelenmiştir. Parametrik çalışmalarda basit ve sabit mesnetli modellerde kullanılan kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri Çizelge 5.5'te özetlenmiştir.

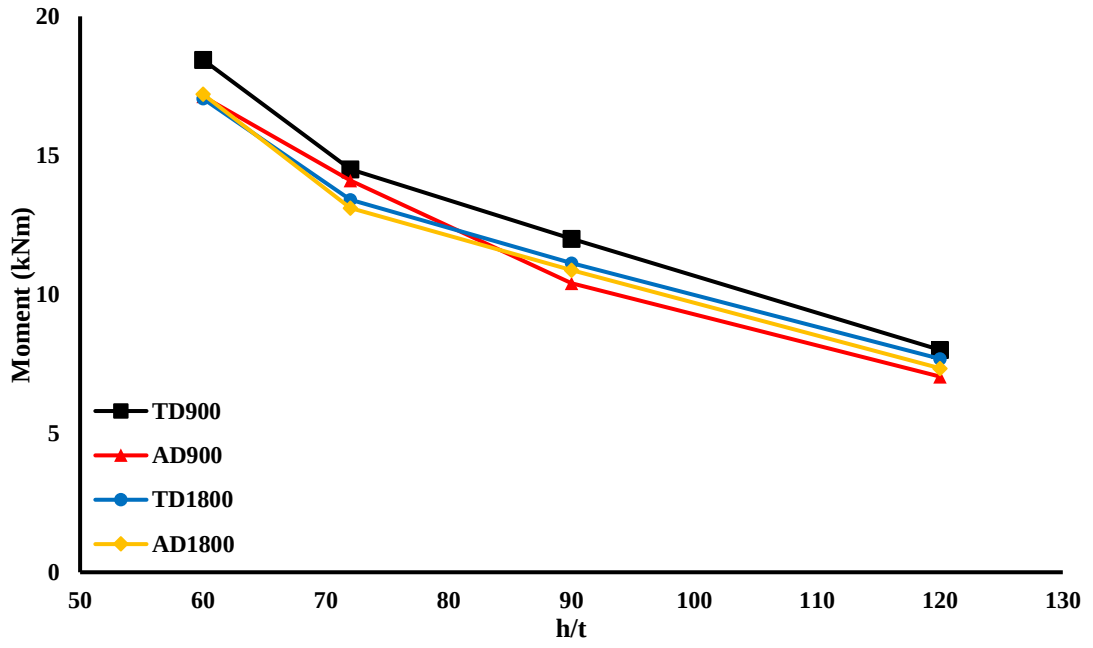
Yapılan parametrik çalışma kapsamında h/t oranının değişiminin moment taşıma kapasitesine etkisi belirlenmiştir (Şekil 5.26-27). Deneysel çalışmada kullanılan kirişlerin h/t oranı 72'dir. Narinlik oranı ile h/t oranı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Basit mesnetli modellerde h/t oranı 60 olan modeller dikkate alındığında ortalama moment taşıma kapasiteleri h/t oranı 72 olan modellere göre %28 daha fazladır. Öte yandan h/t oranı 90 olan modellerin ortalama moment taşıma kapasitesi %20 daha az elde edilirken, h/t oranı 120 olan modellerde ise %45 daha az elde edilmiştir. Sabit mesnetli modellerde ise, h/t oranı 60 olan modellerin moment taşıma kapasitesi %22 daha fazladır. Narinlik oranının artmasıyla birlikte, h/t oranı 90 olan modeller ortalama moment taşıma kapasitesi %23 daha az elde edilirken, h/t oranı 120 olan modellerde %49 daha az elde edilmiştir. Sonuç olarak h/t oranının artmasıyla moment taşıma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Farklı kesit kalınlıklarında bağlantı kirişleri kullanmanın dört noktalı eğilme testinde kirişlerin moment taşıma kapasitesinde ve göçme modlarına etkisinin çok sınırlı olduğu belirlenmiştir. Farklı yükleme durumu için bağlantı kirişlerinin davranışa olan etkisi incelenmesi önerilmektedir. Basit ve sabit mesnetli modellerde parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen göçme modları ve moment kapasiteleri Çizelge 5.6-5.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.5. Parametrik çalışmalarda kullanılan kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri.

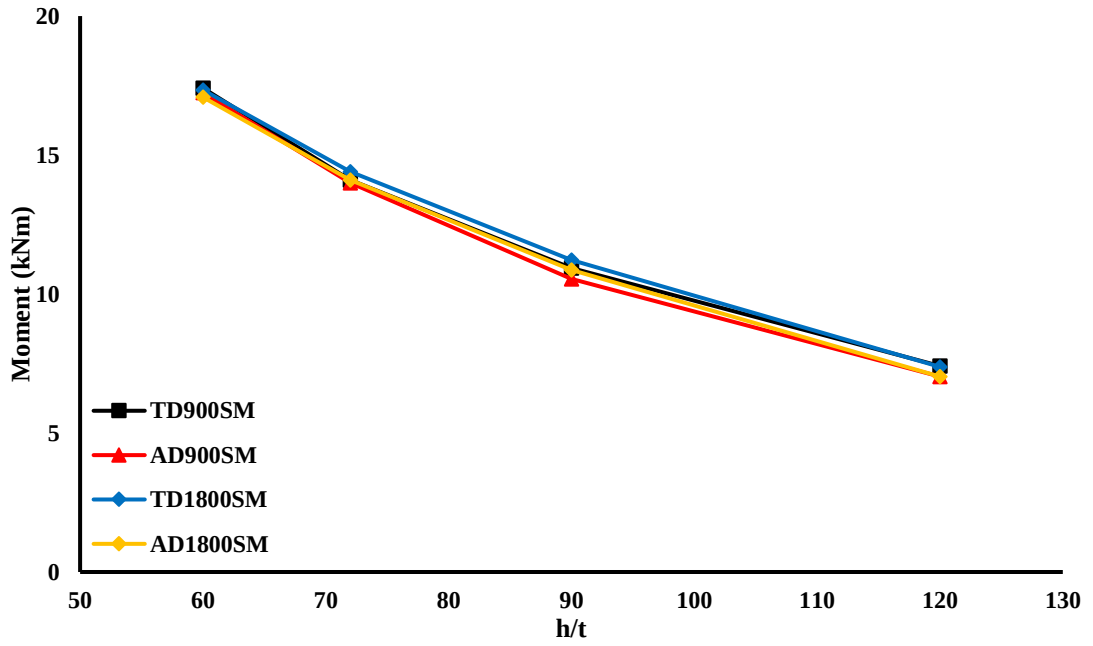
Eleman Adı	Kiriş					Bağlantı Kirişi			
	Gövde (mm)	Başlık (mm)	Tırnak (mm)	Kalınlık (mm)	Narinlik Oranı ($\lambda_1-\lambda_d$)	Gövde (mm)	Başlık (mm)	Tırnak (mm)	Kalınlık (mm)
AD1800-1.5-2	180	64	28	1.5	0.83-0.79	175	40	28	2
AD1800-2-2				2	0.64-0.68				
AD1800-3-2				3	0.44-0.54				
TD1800-1.5-2				1.5	0.83-0.79				
TD1800-2-2				2	0.64-0.68				
TD1800-3-2				3	0.44-0.54				
AD900-1.5-2				1.5	0.83-0.79				
AD900-2-2				2	0.64-0.68				
AD900-3-2				3	0.44-0.54				
TD900-1.5-2				1.5	0.83-0.79				
TD900-2-2				2	0.64-0.68				
TD900-3-2				3	0.44-0.54				

Çizelge 5.5. (devam). Parametrik çalışmalarda kullanılan kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri.

AD1800-2.5-1.5	180	64	28	2.5	0.53-0.6	175	40	28	1.5
AD1800-2.5-2.5									2.5
AD1800-2.5-3									3
TD1800-2.5-1.5									1.5
TD1800-2.5-2.5									2.5
TD1800-2.5-3									3
AD900-2.5-1.5									1.5
AD900-2.5-2.5									2.5
AD900-2.5-3									3
TD900-2.5-1.5									1.5
TD900-2.5-2.5									2.5
TD900-2.5-3									3



Şekil 5.26. Basit mesnetli modeller için moment-h/t ilişkisi.



Şekil 5.27. Sabit mesnetli modeller için moment-h/t ilişkisi.

Çizelge 5.6. Basit mesnetli modeller için göçme moment kapasiteleri ve göçme modu.

	Eleman Adı	Narinlik Oranı ($\lambda_1-\lambda_d$)	Göçme Momenti FEA (kNm)	FEA Göçme Modu
Gövde yüksekliği kalınlık oranı (h/t)	FF1800-1.5-2	0.83-0.79	7.34	LTB-LB
	FF1800-2-2	0.64-0.68	10.87	LTB-LB
	FF1800-3-2	0.44-0.54	17.2	LTB-LB
	FB1800-1.5-2	0.83-0.79	7.68	LTB-LB
	FB1800-2-2	0.64-0.68	11.12	LTB-LB
	FB1800-3-2	0.44-0.54	17.04	LTB-LB
	FF900-1.5-2	0.83-0.79	7.04	LB
	FF900-2-2	0.64-0.68	10.37	LB
	FF900-3-2	0.44-0.54	17.12	LB-DB
	FB900-1.5-2	0.83-0.79	8.01	BB
	FB900-2-2	0.64-0.68	11.98	BB
	FB900-3-2	0.44-0.54	18.44	BB
Farklı bağlantı kirişleri gövde kalınlıkları	FF1800-2.5-1.5	0.53-0.6	13.72	LTB-LB
	FF1800-2.5-2.5	0.53-0.6	14.02	LTB-LB
	FF1800-2.5-3	0.53-0.6	14.04	LTB-LB
	FB1800-2.5-1.5	0.53-0.6	14.04	LTB-LB
	FB1800-2.5-2.5	0.53-0.6	14.28	LTB-LB
	FB1800-2.5-3	0.53-0.6	14.31	LTB-LB
	FF900-2.5-1.5	0.53-0.6	13.72	LB
	FF900-2.5-2.5	0.53-0.6	13.76	LB
	FF900-2.5-3	0.53-0.6	13.68	LB
	FB900-2.5-1.5	0.53-0.6	15.35	BB-DB
	FB900-2.5-2.5	0.53-0.6	15.73	BB-DB
	FB900-2.5-3	0.53-0.6	15.77	BB-DB

Çizelge 5.7. Sabit mesnetli modeller için göçme moment kapasiteleri ve göçme modu.

Eleman Adı		Narinlik Oranı ($\lambda_l-\lambda_d$)	Göçme Momenti FEA (kNm)	FEA Göçme Modu
Gövde yüksekliği kalınlık oranı (h/t)	FF1800SM-1.5-2	0.83-0.79	7.03	LTB-LB
	FF1800SM-2-2	0.64-0.68	10.86	LTB-LB
	FF1800SM-3-2	0.44-0.54	17.08	LTB-LB
	FB1800SM-1.5-2	0.83-0.79	7.38	LTB-LB
	FB1800SM-2-2	0.64-0.68	11.22	LTB-LB
	FB1800SM-3-2	0.44-0.54	17.34	LTB-LB
	FF900SM-1.5-2	0.83-0.79	7.03	LB
	FF900SM-2-2	0.64-0.68	10.54	LB
	FF900SM-3-2	0.44-0.54	17.24	LB
	FB900SM-1.5-2	0.83-0.79	7.41	BB
	FB900SM-2-2	0.64-0.68	10.94	BB
	FB900SM-3-2	0.44-0.54	17.41	BB
Farklı bağlantı kirişleri gövde kalınlıkları	FF1800SM-2.5-1.5	0.53-0.6	13.74	LTB-LB
	FF1800SM-2.5-2.5	0.53-0.6	14.16	LTB-LB
	FF1800SM-2.5-3	0.53-0.6	14.22	LTB-LB
	FB1800SM-2.5-1.5	0.53-0.6	14.20	LTB-LB
	FB1800SM-2.5-2.5	0.53-0.6	14.43	LTB-LB
	FB1800SM-2.5-3	0.53-0.6	14.32	LTB-LB
	FF900SM-2.5-1.5	0.53-0.6	13.80	LB
	FF900SM-2.5-2.5	0.53-0.6	13.96	LB
	FF900SM-2.5-3	0.53-0.6	14.06	LB-DB
	FB900SM-2.5-1.5	0.53-0.6	14.26	BB
	FB900SM-2.5-2.5	0.53-0.6	14.30	BB
	FB900SM-2.5-3	0.53-0.6	14.26	BB

6. AISI S100-16 ŞARTNAME YAKLAŞIMI

AISI S100-16, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından yayınlanan “North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members” adlı şartnamenin 2016 yılı revizyonunu ifade etmektedir. Bu şartname, CFS kirişler, kolonlar ve diğer yapısal elemanların tasarımı, burkulma modlarının değerlendirilmesi, bağlantı elemanlarının tasarımı, malzeme özelliklerini ve test yöntemlerini kapsamaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Meksika’da CFS elemanların tasarımında kullanılmaktadır.

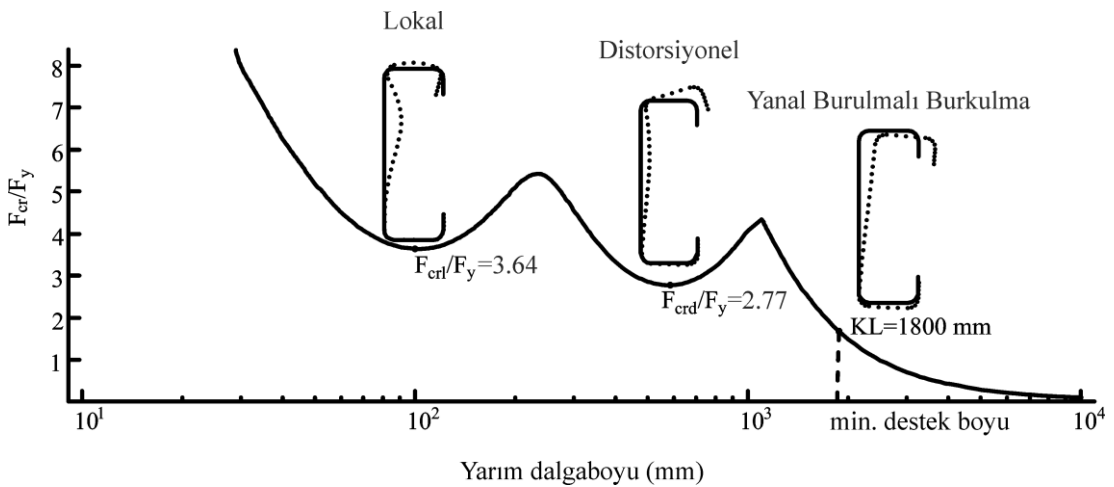
CFS kirişler ince cidarlı doğaları gereği tasarımlarının yapılması ve davranışlarının belirlenmesi karmaşılaşmaktadır. CFS kirişler elastik burkulma analizleri sonucunda; lokal, distorsiyonel ve yanal burulmalı burkulma davranışları gösterebilmekte ve bu burkulma modları kirişlerin tasarımlarının yapılmasında dikkate alınması gerekmektedir. Soğukta şekilde verilmiş çelik kiriş elemanların tasarımlarının yapılmasında Etkili Genişlik Yöntemi “Effective Width Method” (EWM) ve Doğrudan Dayanım Yöntemi “Direct Strength Method (DSM) yöntemleri kullanılmaktadır.

1910 yılında von Karman tarafından plakaların burkulma sonrası davranışları analiz edilmiş ve plaka burkulmaları için diferansiyel denklemler üretilmiştir (Yu vd., 2019). Ancak burkulma sonrası davranışın “post-buckling behavior” teorik analizi için geliştirilen denklemin karmaşık olması ve plakaların göçme modlarının belirlenmesinin zor olmasından dolayı von Karman vd. (1932) etkili genişlik yöntemini geliştirmişlerdir. Düzgün yayılı basınç yüklemesi altında basit mesnetli bir plaka için burkulma yüküne erişilmeden önce plaka üzerindeki gerilme dağılımı sabittir. Plaka burkulmaya başladığında, gerilme merkezden kenarlara aktarılır ve plaka üzerinde düzensiz bir gerilme meydana gelir. Etkili genişlik yöntemine göre, düzensiz gerilme dağılımını tüm plaka genişliği üzerinde değerlendirmek yerine toplam yükün fiktif bir genişlik ile taşındığı varsayımı yapılmıştır (Şekil 6.1) (Yu vd., 2019). Etkili genişlik yöntemi AISI S100-16 şartnamesinde güncel olarak kullanılmaktadır.

Doğrudan dayanım yöntemi (DSM) ise tüm kesit için burkulma modlarının dayanımlarının ayrı ayrı hesaplanmasına olanak sağlayan elastik burkulma

belirlenmesine dayanan bir yöntem olarak geliştirilmiştir (Cheung, 1976; Schafer ve Peköz, 1998; Hancock vd., 2001). FEM yöntemi elemanların sonlu elemanlara ayrılarak polinom yaklaşımlarının lineer denklem çözümlerine indirgendiği bir yöntemdir. Diğer yöntemlere göre daha kapsamlı çözümler sunmaktadır. Schardt (1994) tarafından geliştirilen GBT yöntemi ise deplasman fonksiyonlarının kullanıldığı prizmatik yapıların mekanik davranışlarını içeren yöntemdir (Jiang ve Davies, 1996; Silvestre ve Camotim, 2004).

AISI S100-16 şartnamesinde çözüm yöntemi olarak kullanılan DSM yöntemi elastik burkulma çözümlerinde sonlu şerit yönteminin kullanımını vurgulamaktadır. FSM yöntemi kullanılarak, açık kaynak kodlu bilgisayar programı olan CUFSM John Hopkins Üniversitesi'nde geliştirilmiştir (Schafer ve Adany, 2006). CUFSM uygulaması elastik burkulma analizi sonucunda çıktı olarak yarım dalga boylarına karşılık gelen yük faktörü (F_{cr}/F_y) ve bu yarım dalga boylarına karşılık gelen burkulma modlarını çıktı olarak vermektedir. Deney elemanlarında kullanılan ana kirişe ait elastik burkulma analizi çıktısı Şekil 6.2'de verilmiştir. Eğrinin üzerindeki minimum noktalar, belirli bir burkulma modunun meydana geldiği en düşük yük seviyesini göstermektedir. Yarım dalga boyu ise, belirli bir kesit mod şeklinin uzunluğu boyunca nasıl değiştiğini gösterir. Burada lokal burkulma için 90 mm yarım dalga boyuna karşılık gelen kritik lokal burkulma dayanımı ile akma dayanımı ilişkisi ($F_{cr1}=3.64F_y$) ve distorsiyonel burkulma için 580 mm yarım dalga boyuna karşılık gelen kritik distorsiyonel burkulma dayanımı ile akma dayanımı ilişkisi ($F_{crd}=2.77F_y$) görüntülenmektedir.



Şekil 6.2. Kirişe ait CUFSM programında elastik burkulma analizi çıktısı.

AISI S100-16 şartnamesine göre kirişlerin moment kapasitesi elastik burkulma analizleri yapılarak DSM yöntemi ile hesaplanmıştır. AISI S100-16 şartnamesine göre kirişlerin moment taşıma kapasitesi aşağıda incelenmiştir.

6.1 Akmanın Başlaması ve Global Burkulma Tasarımı

Düşük genişlik kesit kalınlığı oranına sahip (w/t) soğukta şekil verilmiş kirişlerde göçme eğilme momenti etkisiyle kesitin akmasıyla gerçekleşebilmektedir. Akma moment kapasitesi Denklem 6.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$M_y = S_{fy}F_y \quad (6.1)$$

Burada M_y akma momenti, S_{fy} akmanın olduğu en uçtaki life göre kesit modülü ve F_y akma dayanımını ifade etmektedir.

İlk akmaya kadar olan kapasite dikkate alınarak akma ve global burkulma için nominal eğilme momenti kapasitesi Denklem 6.2'ye göre hesaplanmaktadır.

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad (6.2)$$

Burada M_{ne} akma ve global burkulma için nominal eğilme dayanımı ve S_f en uzak basınç lifine göre kesit modülü olarak ifade edilmektedir. F_n ise aşağıdaki denklemlere göre hesaplanmaktadır.

$$F_{cre} \geq 2.78F_y$$

$$F_n = F_y \quad (6.3)$$

$$2.78F_y > F_{cre} > 0.56F_y$$

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right) \quad (6.4)$$

$$F_{cre} < 0.56F_y$$

$$F_n = F_{cre} \quad (6.5)$$

Burada F_{cre} kritik elastik yanal burulmalı burkulma gerilmesini ifade etmektedir. Tek ve iki simetrik eksenli kesitler için F_{cre} Denklem 6.6'ya göre hesaplanmaktadır.

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y} \right)^2} \quad (6.7)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (6.8)$$

Burada C_b moment düzeltme katsayısını, r_y y eksenine göre atalet yarıçapını, r_o kayma merkezine göre polar atalet yarıçapını, A kesit alanını, S_f elastik kesit modülünü, σ_{ey} eğilmeli burkulma gerilmesini, σ_t burulmalı burkulma gerilmesini, C_w çarpılma sabitini, $K_y L_y$ y eksenini etrafında burkulma için etkili burkulma boyunu ve $K_t L_t$ burulma için etkili boyu ifade etmektedir.

6.2 Lokal Burkulma Kapasitesi

DSM yöntemi lokal burkulma kapasitesini kritik lokal burkulma momenti (M_{cr1}) ve akma dayanımının (F_y) fonksiyonu olarak ele almaktadır. Kritik lokal burkulma momenti CUFSM programı kullanılarak Şekil 6.2'de akma dayanımının bir karşılığı olarak ($3.64M_y$) elde edilmiştir. Kirişlerde lokal burkulma için narinlik oranının (λ_l) bulunduğu aralığa göre aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda_l \leq 0.776$$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (6.9)$$

$$\lambda_l \leq 0.776 \text{ ya da } M_{ne} \geq M_y$$

$$M_{nl} = M_y + \left(1 + \frac{1}{C_{y1}^2} \right) (M_p - M_y) \quad (6.10)$$

$$\lambda_l > 0.776$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (6.11)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (6.12)$$

$$C_{yl} = \sqrt{\frac{0.776}{\lambda_l}} \quad (6.13)$$

Burada M_{ne} yanal burulmalı burkulma için nominal eğilme moment değerini, M_{nl} lokal burkulma ve global burkulma etkileşimi için eğilme momentini, M_{crl} elastik lokal burkulma momentini, λ_l lokal burkulma için narinlik oranını, M_p plastik moment kapasitesini ve C_{yl} basınç birim şekil değiştirme faktörünü ifade etmektedir.

6.3 Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi

Distorsiyonel burkulma modu, elastik burkulma analizlerinde genellikle lokal burkulma modlarına göre daha uzun dalga boyuna sahipken yanal burulmalı burkulma modlarına göre ise daha kısa dalga boyuna sahiptir. Kritik distorsiyonel burkulma momenti CUFSM programı kullanılarak Şekil 6.2’de akma dayanımının bir karşılığı olarak ($2.77M_y$) elde edilmiştir. Kirişlerde distorsiyonel burkulma kapasitesi DSM yöntemi ile distorsiyonel burkulma için narinlik oranının (λ_d) bulunduğu aralığa göre aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda_d \leq 0.673$$

$$M_{nd} = M_y \quad (6.14)$$

$$\lambda_d > 0.673$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (6.15)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (6.16)$$

Burada M_{nd} distorsiyonel burkulma için eğilme momenti, M_{crd} elastik distorsiyonel burkulma momenti ve λ_d distorsiyonel burkulma için narinlik oranı olarak ifade edilmiştir.

6.4 Sonuçlar

Bu bölümde AISI S100-16 şartnamesine göre soğukta şekil verilmiş kirişlerin moment taşıma kapasitelerinin hesaplanması incelenmiştir. Çalışmada deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları, AISI S100-16 şartnamesinin önerileriyle karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme ile deneysel ve nümerik sonuçların şartnameye uygunluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. AISI S100-16 şartnamesine göre bağlantı kirişleri kullanılmayan deney elemanları ($L_{br}=4500$ mm) için $M_{ne}=5.5$ kNm, bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm olan deney elemanları için ($L_{br}=1800$ mm) $M_{ne}=13.5$ kNm ve 900 mm olanlar için ise $M_{ne}=14.4$ kNm olarak hesaplanmıştır. Lokal burkulma ve distorsiyonel burkulma moment kapasiteleri ise 14.4 kNm olarak hesaplanmıştır. Bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm olan deney elemanlarının moment kapasitesi en düşük $\{M_{ne}, M_{nl}, M_{nd}\}=13.5$ kNm'dir. 900 mm olan deney elemanları için ise en düşük $\{M_{ne}, M_{nl}, M_{nd}\}=14.4$ kNm'dir. Yapılan hesaplamalar ile deney sonuçları ve sonlu elemanlar analiz sonuçları karşılaştırılmıştır ve basit mesnetli ve sabit mesnetli deney elemanları için sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de özetlenmiştir. Basit mesnetli deney elemanları akma moment kapasitesine göre kıyaslandığında AD4500 ve TD4500 deney elemanlarında bağlantı kirişleri kullanılmadığı için bu deney elemanlarında akma kapasitesinin çok altında, sırasıyla $0.34M_y$ ve $0.35M_y$, yanal burulmalı burkulma sonucunda göçme meydana gelmişti. Bu sebeple, akma kapasitesine göre karşılaştırmada hata payı daha fazladır (standart sapma:0.32 ve COV:0.43). Öte yandan DSM yöntemine göre yapılan hesaplamalarda en düşük 0.9, en yüksek 1.01 ve ortalama $0.98 M_{den}/M_{dsm}$ elde edilmiştir (standart sapma:0.02 ve COV:0.02). Sonlu elemanlar analizleri kıyaslandığında ise en düşük 0.96, en yüksek 1.08 ve ortalama $1.02 M_{fea}/M_{dsm}$ elde edilmiştir (standart sapma:0.05 ve COV:0.05). Sabit mesnetli deney elemanlarında ise deney sonuçları ile DSM hesaplamaları kıyaslandığında en düşük 0.92, en yüksek 1.04 ve ortalama $0.98 M_{den}/M_{dsm}$ elde edilmiştir (standart sapma:0.06 ve COV:0.06). Sonlu elemanlar analiz sonuçları kıyaslandığında ise en düşük 0.97, en yüksek 1.06 ve ortalama $1.01 M_{fea}/M_{dsm}$ elde edilmiştir (standart sapma:0.04 ve COV:0.04). Ayrıca parametrik çalışma sonuçları

DSM yöntemi ile yapılan hesaplamalar ile karşılaştırılmış ve basit mesnetli ve sabit mesnetli elemanlar için Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'te verilmiştir. Basit mesnetli parametrik çalışmalarda en düşük 0.90, en yüksek 1.1 ve ortalama 1.02 M_{fea}/M_{dsm} elde edilmiştir (standart sapma:0.05 ve COV: 0.05). Sabit mesnetli parametrik çalışmalarda ise en düşük 0.90, en yüksek 1.07 ve ortalama 1.0 M_{fea}/M_{dsm} oranı elde edilmiştir (standart sapma:0.05 ve COV:0.05). Basit mesnetli ve sabit mesnetli deney elemanlarının deney sonuçları AISI S100-16 eğrileri ile karşılaştırılmıştır ve Şekil 6.3 ve 6.5'te x ve y eksenleri birimsiz formatta çizdirilmiştir. Y ekseninde deney sonucunda elde edilen maksimum moment kapasitesi ile akma moment kapasiteleri oranları (M_{den}/M_y) verilirken x ekseninde narinlik oranı (M_y/M_{cr})^{0.5} verilmiştir. Basit mesnetli deney elemanlarında bağlantı kirişleri kullanılmamış deney elemanları (AD4500 ve TD4500) yanal burulmalı burkulma sonucu göçme meydana geldiği için bu elemanların deney sonuçları elastik burkulma eğrisi ile sadece Şekil 6.3'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca basit mesnetli ve sabit mesnetli parametrik çalışmalar da AISI S100-16 eğrileri ile karşılaştırılmıştır ve sırasıyla Şekil 6.4 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Deneysel çalışmalardan farklı olarak bu eğrinin çizilmesinde y ekseninde sonlu elemanlar analiz sonuçlarında elde edilen moment değerleri ile akma moment kapasiteleri (M_{fea}/M_y) oranı verilmiştir. Narinlik oranının hesaplanmasında kullanılan M_{cr} DSM yöntemi ile hesaplanmıştır. Hem deney elemanları hem de parametrik çalışmalarda kullanılan elemanların kompakt kesit özelliklerine sahip olması ile elemanların moment kapasiteleri akma moment kapasitesine yakın elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre DSM sonuçlarının deney sonuçları ve sonlu elemanlar analizleri ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. Basit mesnetli deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile AISI S100-16 şartname sonuçlarının karşılaştırılması.

Deney Elemanı	L_{br}	Kiriş Yönlendirmesi	Narinlik Oranı (λ_1-λ_d)	M_{den}/M_y	M_{den}/M_{dsm}	M_{fea}/M_{den}	M_{fea}/M_{dsm}
AD4500	4500	Aynı yön	0.53-0.6	0.34	0.9	1.08	0.96
TD4500	4500	Ters yön	0.53-0.6	0.35	1.0	1.12	1.02
AD1800	1800	Aynı yön	0.53-0.6	0.92	0.97	1.06	1.04
TD1800	1800	Ters yön	0.53-0.6	0.93	0.99	1.06	1.06
AD900	900	Aynı yön	0.53-0.6	0.98	0.98	0.98	0.96
TD900	900	Ters yön	0.53-0.6	1.01	1.01	1.07	1.08
DSM-L=4500	4500			5.5			
DSM-L=1800	1800			13.5			
DSM-L=900	900			14.4			
M _y				14.4			
En düşük				0.34	0.9	0.98	0.96
En yüksek				1.01	1.01	1.12	1.08
Ortalama				0.76	0.98	1.06	1.02
Standart Sapma				0.32	0.02	0.04	0.05
COV				0.43	0.02	0.04	0.05

Çizelge 6.2. Sabit mesnetli deney ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile AISI S100-16 şartname sonuçlarının karşılaştırılması.

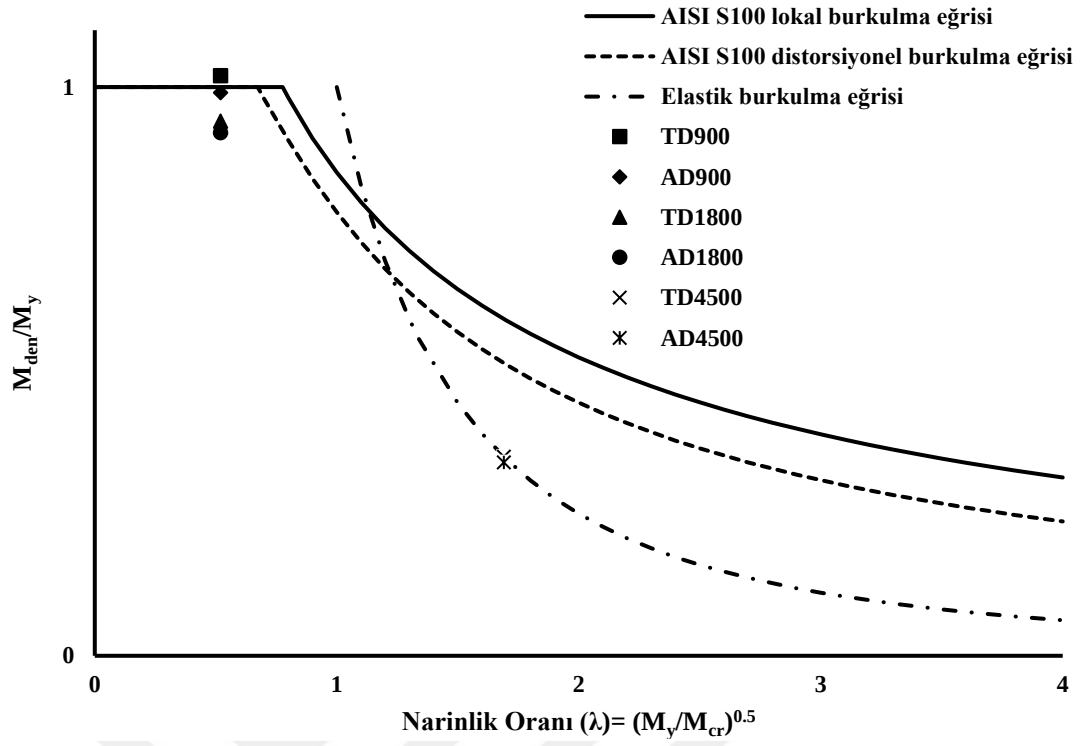
Deney Elemanı	L _{br}	Kiriş Yönlendirmesi	Narinlik Oranı (λ - λ_d)	M _{den} /M _y	M _{den} /M _{dsm}	M _{fea} /M _{den}	M _{fea} /M _{dsm}
AD1800SM	1800	Aynı yön	0.53-0.6	0.96	1.02	1.02	1.04
TD1800SM	1800	Ters yön	0.53-0.6	0.98	1.04	1.02	1.06
AD900SM	900	Aynı yön	0.53-0.6	0.93	0.93	1.04	0.97
TD900SM	900	Ters yön	0.53-0.6	0.92	0.92	1.06	0.98
DSM-L=1800	1800			13.5			
DSM-L=900	900			14.4			
M _y				14.4			
En düşük				0.92	0.92	1.02	0.97
En yüksek				0.98	1.04	1.06	1.06
Ortalama				0.95	0.98	1.035	1.01
Standart Sapma				0.03	0.06	0.018	0.04
COV				0.03	0.06	0.018	0.04

Çizelge 6.3. Basit mesnetli parametrik çalışmaların DSM ile karşılaştırılması.

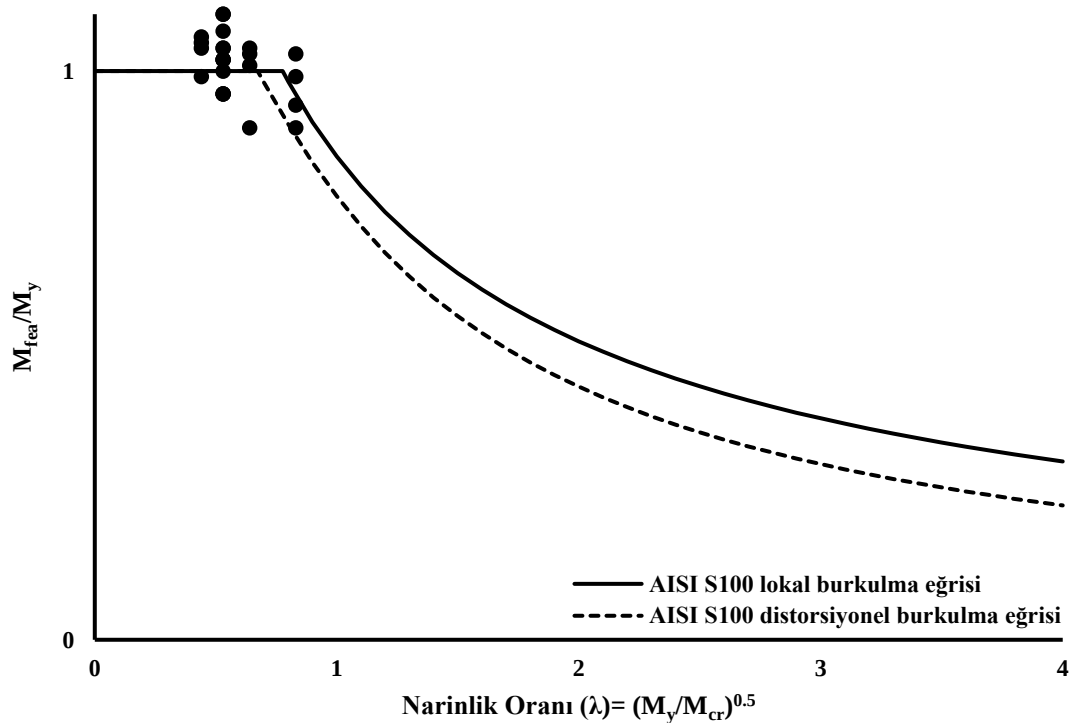
	Eleman Adı	Göçme Momenti	Göçme Momenti	M_{fea}/M_{dsm}
		FEA (kNm)	DSM (kNm)	
Gövde yüksekliği kalınlık oranı (h/t)	AD1800-1.5-2	7.34	7.3	1.01
	AD1800-2-2	10.87	10.8	1.01
	AD1800-3-2	17.2	16.3	1.05
	TD1800-1.5-2	7.68	7.3	1.05
	TD1800-2-2	11.12	10.8	1.03
	TD1800-3-2	17.04	16.3	1.04
	AD900-1.5-2	7.04	7.78	0.91
	AD900-2-2	10.37	11.5	0.90
	AD900-3-2	17.12	17.3	0.99
	TD900-1.5-2	8.01	7.78	1.03
	TD900-2-2	11.98	11.5	1.04
	TD900-3-2	18.44	17.3	1.06
Farklı bağlantı kirişleri gövde kalınlıkları	AD1800-2.5-1.5	13.72	13.5	1.02
	AD1800-2.5-2.5	14.02	13.5	1.04
	AD1800-2.5-3	14.04	13.5	1.04
	TD1800-2.5-1.5	14.04	13.5	1.04
	TD1800-2.5-2.5	14.28	13.5	1.06
	TD1800-2.5-3	14.31	13.5	1.06
	AD900-2.5-1.5	13.72	14.4	0.95
	AD900-2.5-2.5	13.76	14.4	0.96
	AD900-2.5-3	13.68	14.4	0.95
	TD900-2.5-1.5	15.35	14.4	1.06
	TD900-2.5-2.5	15.73	14.4	1.09
	TD900-2.5-3	15.77	14.4	1.1
	En düşük			0.90
	En yüksek			1.1
	Ortalama			1.02
	Standart Sapma			0.05
	COV			0.05

Çizelge 6.4. Sabit mesnetli parametrik çalışmaların DSM ile karşılaştırılması.

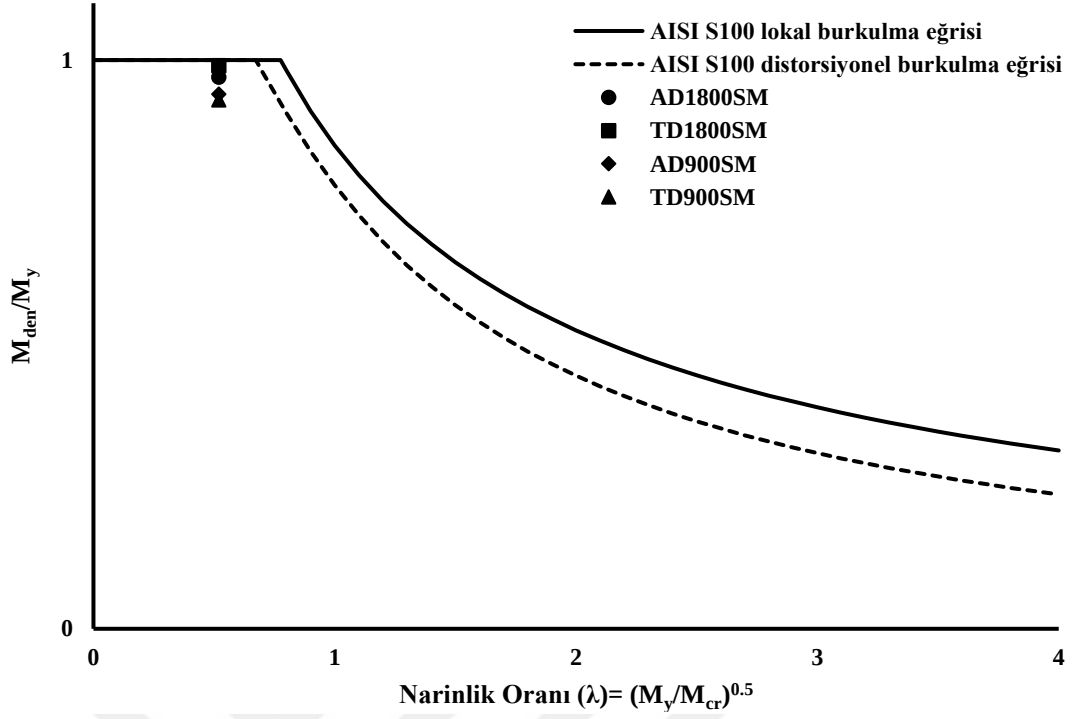
Eleman Adı		Göçme Momenti FEA (kNm)	Göçme Momenti DSM (kNm)	M_{fea}/M_{dsm}
Gövde yüksekliği kalınlık oranı (h/t)	AD1800SM-1.5-2	7.03	7.3	0.96
	AD1800SM-2-2	10.86	10.8	1.0
	AD1800SM-3-2	17.08	16.3	1.05
	TD1800SM-1.5-2	7.38	7.3	1.01
	TD1800SM-2-2	11.22	10.8	1.04
	TD1800SM-3-2	17.34	16.3	1.06
	AD900SM-1.5-2	7.03	7.78	0.90
	AD900SM-2-2	10.54	11.5	0.92
	AD900SM-3-2	17.24	17.3	0.99
	TD900SM-1.5-2	7.41	7.78	0.95
	TD900SM-2-2	10.94	11.5	0.95
	TD900SM-3-2	17.41	17.3	1.0
Farklı bağlantı kirişleri gövde kalınlıkları	AD1800SM-2.5-1.5	13.74	13.5	1.02
	AD1800SM-2.5-2.5	14.16	13.5	1.05
	AD1800SM-2.5-3	14.22	13.5	1.05
	TD1800SM-2.5-1.5	14.20	13.5	1.05
	TD1800SM-2.5-2.5	14.43	13.5	1.07
	TD1800SM-2.5-3	14.32	13.5	1.06
	AD900SM-2.5-1.5	13.80	14.4	0.96
	AD900SM-2.5-2.5	13.96	14.4	0.97
	AD900SM-2.5-3	14.06	14.4	0.98
	TD900SM-2.5-1.5	14.26	14.4	0.99
	TD900SM-2.5-2.5	14.30	14.4	0.99
	TD900SM-2.5-3	14.26	14.4	0.99
	En düşük			0.90
	En yüksek			1.07
	Ortalama			1.0
	Standart Sapma			0.05
	COV			0.05



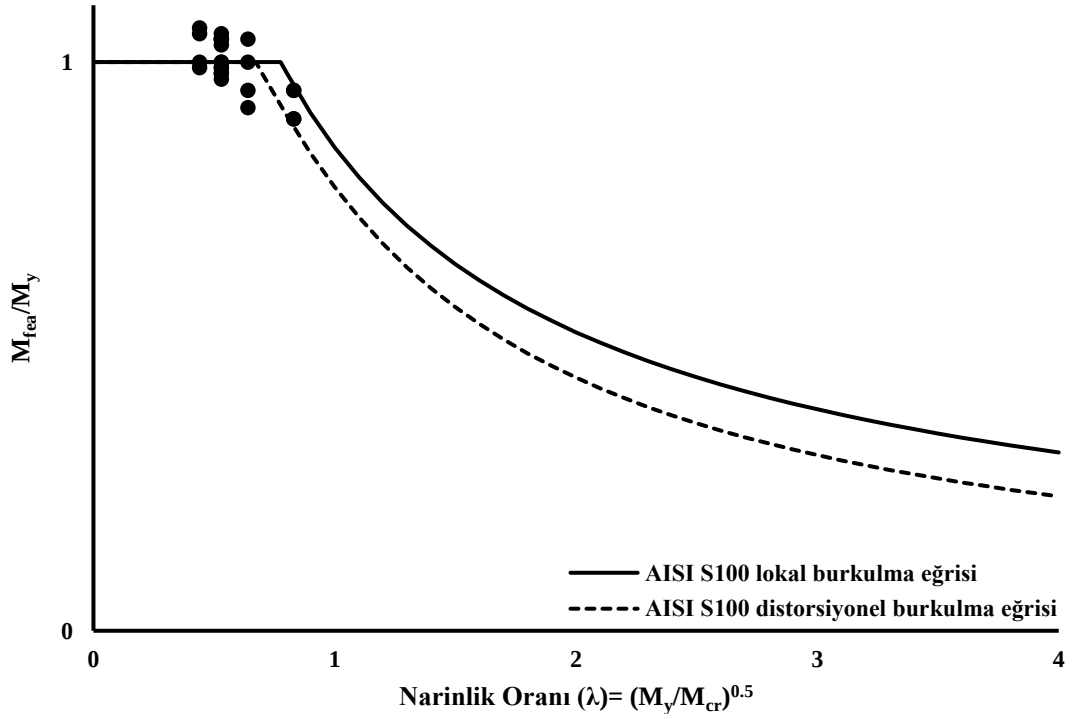
Şekil 6.3. Basit mesnetli deney elemanları ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.4. Basit mesnetli parametrik çalışma ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 6.5. Sabit mesnetli deney elemanlarının AISI S100-16 eğrileri ile karşılaştırılması.



Şekil 6.6. Sabit mesnetli parametrik çalışma ile AISI S100-16 eğrilerinin karşılaştırılması.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada CFS elemanlardan oluşan konik silo çatısının bir parçası olarak üretilen kiriş sisteminin eğilme davranışını incelemek için deneysel, nümerik ve parametrik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel, nümerik ve parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen veriler AISI S100-16 şartnamesi ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda öncelikle deney elemanlarında kullanılan DX51D malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli malzeme deneyleri yapılmıştır. Silo çatısının bir parçası olarak tasarlanan soğukta şekil verilmiş kiriş elemanlardan oluşan kiriş sisteminin düşey yükler altındaki davranışını incelemek için dört noktalı eğilme deneyleri Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Mekanği Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Dört noktalı eğilme deneyleri basit mesnetli ve sabit mesnetli olacak şekilde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Basit mesnetli deneylerde 6 adet kiriş sistemi kullanılırken sabit mesnetli deneylerde 4 adet kiriş sistemi kullanılmıştır. Çalışmada değişken olarak bağlantı kirişleri arası mesafe ve kirişlerin yönlendirmesi dikkate alınmıştır.

Nümerik çalışmalar ile deneysel çalışmada kullanılan kiriş sisteminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli yakınsama, doğrulama ve parametrik çalışmalar olarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Yakınsama çalışmalarında deney elemanlarından AD1800 dikkate alınarak ağ modeli tipleri, ağ boyutları ve geometrik kusurların etkisi incelenmiştir. Yakınsama analizlerinden sonra her bir deney elemanı için sonlu elemanlar modeli oluşturularak, deney elemanı ile sonlu elemanlar modelinin göçme şekli ve moment-düşey deplasman ilişkisi bakımında doğrulama işlemi yapılmıştır. Parametrik çalışma aşamasında ise hem basit mesnetli deney elemanı için hem de sabit mesnetli deney elemanı için kiriş gövde yükseklik-kalınlık (h/t) oranı ve bağlantı kirişleri kesit kalınlığı değişkenlerinin kirişlerin moment taşıma kapasitesine ve burkulma davranışlarına olan etkisi incelenmiştir.

AISI S100-16 şartnamesinin kirişlerin moment taşıma kapasitesinin belirlenmesinde ve burkulma davranışlarının tahminindeki yaklaşımları dikkate alınarak deneysel, nümerik ve parametrik çalışmalar sonucunda elde edilen veriler bu şartname ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Basit mesnetli deney elemanlarında bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasıyla kirişlerin moment taşıma kapasitesi artmaktadır. Ancak sabit mesnetli deney elemanlarında bu durum tam anlamıyla gözlemlenememiştir.

Basit mesnetli ve sabit mesnetli deney elemanlarda bağlantı kirişlerinin kullanılması ve bağlantı kirişleri arası mesafenin azalmasıyla kirişlerin hem yanal öteleme hem de dönme açısı miktarları azalmıştır. Böylelikle kirişlerin göçme anındaki burkulma davranışları değişmiştir.

Deneysel çalışmalarda en etkili kiriş yönlendirmesinin kirişlerin ters yönlendirme olduğu belirlenmiştir.

Her bir deney elemanı için oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin moment-düşey deplasman ve göçme modu ilişkisi açısından uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Kiriş gövde yüksekliği-kalınlık (h/t) oranının artmasıyla kirişlerin moment taşıma kapasitesi azalmaktadır.

Farklı kalınlıklarda bağlantı kirişleri kullanımının dört noktalı eğilme durumu için kirişlerin moment taşıma kapasitesine olan etkisinin çok sınırlı olduğu belirlenmiştir.

AISI S100-16 şartnamesi yaklaşımlarının deneysel ve nümerik sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Deneysel, nümerik ve parametrik çalışmalar sonucunda yeni araştırmalara fırsat verebileceği açısından birtakım öneriler aşağıda sunulmuştur.

Hem deneysel hem de nümerik çalışmada dikkate alınan tırnaklı C kesitler kompakt kesit özelliklerine sahiptirler. Bu yüzden de deney elemanlarının göçme moment kapasiteleri akma moment kapasitelerine yakın elde edilmiştir. Daha narin elemanların da davranışlarının incelenmesi literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca eğilme elemanı olarak kullanılan diğer kesitlerin de incelenmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada sadece dört noktalı yükleme durumu dikkate alınmıştır. Ancak silo çatıları sensör kabloları gibi birtakım tekil yüklerin de etkisi altındadır. Bu tekil

yüklerin etkisinin incelendiği çalışmaların yapılması literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Farklı kesit kalınlıklarına sahip bağlantı kirişlerinin kirişlerin moment taşıma kapasitesine etkisi dört noktalı eğilme testlerinde sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Ancak farklı yükleme durumları için bağlantı kirişlerinin davranışa olan etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

Hem deneysel çalışmada hem de nümerik çalışmada deney elemanları kaplamasız olarak değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda kaplama etkisinin ve farklı kaplama tiplerinin incelenmesi önerilmektedir.

Deneysel çalışmada, kirişler bağlantı kirişlerine bulonlu birleşim olarak bağlanmıştır. Gelecek çalışmalarda kaynaklı birleşimin ve farklı bulon konfigürasyonlarının çalışılması önerilmektedir.

Hem deneysel hem de nümerik analizlerde DX51D çelik sınıfı dikkate alınmıştır. Soğukta şekil verme işlemine uygun farklı çelik sınıflarının etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

Nümerik analiz çalışmasında, bulonlar ABAQUS kütüphanesinde bulunan konnektör elemanlardan üç serbestlik derecesine sahip “Cartesian” eleman olarak tanımlanmıştır. Ancak literatürde bulonların tanımlanması ile ilgili farklı yaklaşımlar mevcuttur. Gelecek çalışmalarda bulon tanımlamasındaki farklı yaklaşımların incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abaqus, 2018. Analysis user's manual-version 6.14. ABAQUS Inc., USA.
- ASTM E8/E8M-13a, 2013. Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, USA.
- Bölükbaş, Y., 2021. Soğuk şekil verilmiş çelik tam ölçekli silo çatısının düşey yükler altındaki davranışının deneysel ve numerik olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Briassoulis, D. ve Pecknold, D. A., 1988. Behaviour of empty steel grain silos under wind loading: part 2: the stiffened conical roof shell. Engineering Structures, 10, 57–64.
- Chajes, A., Britvec, S. J. ve Winter, G., 1963. Effects of cold-straining on structural sheet steels. Journal of the Structural Division, 89, 2, 1-32.
- Chen, H., Schafer, B. ve Laboube, R., 2007. Direct strength method for cold-formed steel, Structure Magazine, 29-34.
- Chung, K. F. ve Quinton, D. S., 1996. Structural performance of modern roofs with thick over-purlin insulation—Experimental investigation, Journal of Constructional Steel Research, 40, 17-38.
- Dubina, D. ve Ungureanu, V., 2002. Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members, Thin-walled Structures, 40, 3, 239-262.
- Dubina, D. ve Ungureanu, V., 2023. Local/distortional and overall interactive buckling of thin-walled cold-formed steel columns with open cross-section. Thin-Walled Structures, 182, 110172.
- Dubina, D., Ungureanu, V. ve Landolfo, R., 2012. Design of cold-formed steel structures: eurocode 3: design of steel structures. part 1-3 design of cold-formed steel structures, First Edition, ECCS, Brussels, Belgium.

- Fan, S., Zhou, H., Ding, Z., Li, C. ve Jiang, Q., 2022. Research on local buckling of stainless steel lipped c-section beam around strong-axis. *International Journal of Steel Structures*, 22, 5, 1359-1378.
- Gallego, E., Fuentes, J. M., Ramírez-Gómez, A. ve Ayuga, F., 2018. Effects of different snow load arrangements on steel silo roof structures. *Advances in Structural Engineering*, 21, 2507–17.
- Gunalan, S., 2011. Structural behaviour and design of cold-formed steel wall systems under fire conditions. Doktora Tezi. Queensland University of Technology, Brisbane, Avusturalya.
- Hancock, G. J., Murray, T. M. ve Ellifritt, D. S., 2001. Cold-formed steel structures to the AISI specification, First Edition, CRC Press, Florida, ABD.
- Heurkens, R. A. J., Hofmeyer, H., Mahendran, M. ve Snijder, H. H., 2018. Direct strength method for web crippling—Lipped channels under EOF and IOF loading, *Thin-Walled Structures*, 123, 126-141.
- Jiang, C. ve Davies, J. M., 1996. Design of thin-walled beams for distortional buckling. Thirteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Missouri, USA, 3, 141-154.
- Kankanamge, N. D. ve Mahendran, M., 2012. Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral–torsional buckling. *Thin-Walled Structures*, 51, 25-38.
- Kankanamge, N. G., 2010. Structural behaviour and design of cold-formed steel beams at elevated temperatures. Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Brisbane, Avusturalya.
- Karren, K. W. ve Winter, G., 1965. Effects of cold-forming on light-gage steel members. *Center for Cold-Formed Steel Structures Library*, 138.
- Krentowski, J., 2014. Steel roofing disaster and the effect of the failure of butt joints. *Engineering Failure Analysis*, 45, 245–51.

- Laim, L., Rodrigues, J. P. C. ve da Silva, L. S., 2013. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, 72, 1-13.
- Li, L., 2004. Lateral–torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheeting. *Thin-Walled Structures*, 42, 995–1011.
- Lobkina, V., 2021. Analysis of roof collapse cases caused by snow loads in russia (2001–2021). *Sustainability*, 13, 13580.
- Maduliat, S., Bambach, M. R. ve Zhao, X. L., 2012. Inelastic behaviour and design of cold-formed channel sections in bending. *Thin-Walled Structures*, 51, 158-166.
- Martins, A. D., Landesmann, A., Camotim, D. ve Dinis, P. B., 2017. Distortional failure of cold-formed steel beams under uniform bending: Behaviour, strength and DSM design. *Thin-Walled Structures*, 118, 196-213.
- Moen, C. D. ve Schafer, B. W., 2010. Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. *Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Missouri, USA, 4.
- Moen, C. D. ve Schafer, B. W., 2011. Direct strength method for design of cold-formed steel columns with holes. *Journal of Structural Engineering*, 137, 559-570.
- Natário, P., Silvestre, N. ve Camotim, D., 2016. Direct strength prediction of web crippling failure of beams under ETF loading, *Thin-Walled Structures*, 98, 360-374.
- Natário, P., Silvestre, N. ve Camotim, D., 2017. Web crippling of beams under ITF loading: A novel DSM-based design approach, *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 812-824.
- Padilla-Llano, D., Moen, C. D. ve Eatherton, M., 2013. Cyclic lateral-torsional buckling response of cold-formed steel c-section joists. In *Proceedings of the Annual Stability Conference*, Structural Stability Research Council, Missouri, USA, 443-449.

- Peiris, M. ve Mahendran, M., 2021. Behaviour of cold-formed steel lipped channel sections subject to eccentric axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106808.
- Pham, C. H. ve Hancock, G. J., 2010. Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 10, 1205-1217.
- Pham, C. H. ve Hancock, G. J., 2012. Direct strength design of cold-formed c-sections for shear and combined actions. *Journal of Structural Engineering*, 138, 759-768.
- Pham, C. H. ve Hancock, G. J., 2013. Experimental investigation and direct strength design of high-strength, complex c-sections in pure bending. *Journal of Structural Engineering*, 139, 11, 1842-1852.
- Pi, Y. L., Put, B. M. ve Trahair, N. S., 1998. Lateral buckling strengths of cold-formed channel section beams. *Journal of Structural Engineering*, 124, 10, 1182-1191.
- Portela, G. ve Godoy, L. A., 2005. Wind pressures and buckling of cylindrical steel tanks with a conical roof. *Journal of Constructional Steel Research*, 61, 786-807.
- Put, B. M., Pi, Y. L. ve Trahair, N. S., 1999. Lateral buckling tests on cold-formed channel beams. *Journal of Structural Engineering*, 125, 5, 532-539.
- Ramírez-Gómez Á., Gallego, E., Fuentes, J. M., González-Montellano, C., Porras-Prieto, C. J. ve Ayuga, F., 2014. Full-scale tests to measure stresses and vertical displacements in an 18.34m-diameter agricultural steel silo roof. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106, 56-65.
- Rao, S. S., 2017. *The finite element method in engineering*. Sixth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, Birleşik Krallık.
- Rusch, A. ve Lindner, J., 2001. Remarks to the direct strength method. *Thin-Walled Structures*, 39, 807-820.

- Sadovský, Z, Faško, P., Mikulová, K. ve Pecho, J., 2012. Exceptional snowfalls and the assessment of accidental snow loads for structural design. *Cold Regions Science and Technology*, 72, 17–22.
- Schafer, B. W. ve Ádány, S., 2006. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods, 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, Florida, USA, 39-54.
- Schafer, B. W. ve Peköz, T., 1998. Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses, *Journal of Constructional Steel Research*, 47, 3, 193-210.
- Schafer, B. W. ve Peköz, T., 1998. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions, Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Schafer, B. W., 2000. Distortional buckling of cold-formed steel columns. Final Report to the American Iron and Steel Institute, Washington, ABD.
- Schafer, B. W., 2006. Direct strength method (dsm) design guide, Committee on Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI, ABD.
- Schardt, R., 1994. Generalized beam theory—An adequate method for coupled stability problems, *Thin-Walled Structures*, 19, 2-4, 161-180.
- Selvaraj, S. ve Madhavan, M., 2019. Bracing effect of sheathing in point-symmetric cold-formed steel flexural members. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 450–62.
- Shifferaw, Y. ve Schafer, B. W., 2012. Inelastic bending capacity of cold-formed steel members. *Journal of Structural Engineering*, 138, 4, 468-480.
- Silvestre, N. ve Camotim, D., 2004. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members, *Thin-Walled Structures*, 42, 11, 1567-1597.

- Silvestre, N., 2006. Direct strength method for lipped channel columns and beams affected, Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- TS EN 10346, 2015. Sıcak daldırmayla sürekli olarak kaplanmış çelik yassı mamuller Teknik teslim şartları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1991-1-3, 2007. Eurocode 1: Yapılar üzerindeki etkiler Bölüm 1-3: Genel etkiler Kar yükleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1991-1-4, 2007. Eurocode 1: Yapılar üzerindeki etkiler Bölüm 1-4: Genel etkiler rüzgâr etkileri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Von Karman, T., Sechler, E. E. ve Donnell, L. H., 1932. The strength of thin plates in compression, Transactions ASME, 54, 5.
- Wang, H. ve Zhang, Y., 2009. Experimental and numerical investigation on cold-formed steel C-section flexural members. Journal of Constructional Steel Research, 65 5, 1225-1235.
- Williams, L. W., 2016. 1 - Introduction to recent trends in cold-formed steel construction. In: C. Yu. (editor) Recent trends in cold-formed steel construction. Woodhead Publishing, Sawston, Birleşik Krallık.
- Yu, C. ve Schafer, B. W., 2003. Local buckling tests on cold-formed steel beams. Journal of Structural Engineering, 129, 12, 1596-1606.
- Yu, C. ve Schafer, B. W., 2006. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. Journal of Structural Engineering, 132, 4, 515-528.
- Yu, C. ve Schafer, B. W., 2007. Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. Journal of Constructional Steel Research, 63, 5, 581-590.
- Yu, W-W., LaBoube R. A. ve Chen H., 2019. Cold-formed steel design. Fifth edition. Wiley, Hoboken, NJ.

Yu, W-W., Welford, D. S. ve Johnson, A. L., 1996. Golden anniversary of the AISI specification. International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 2, Missouri ,USA, 1-25.

Zeinoddini, V. M. ve Schafer, B. W., 2012. Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. Thin-Walled Structures, 60, 105-117.

Zhao C., 2014. Investigations on structural interaction of cold-formed steel roof purlin-sheet system. Doktora Tezi, University of Birmingham, Birmingham, Birleşik Krallık.

Ziemian, R. D., 2010. Guide to stability design criteria for metal structures, Sixth Edition, John Wiley and Sons, New Jersey, USA.

URL-1 <<https://www.irishrockart.com/stonesilo-01>>, Erişim tarihi: 06.11.2023.

URL-2 <<https://kongskilde-industries.com/grain/application/silos-for-storage-drying/>>, Erişim tarihi: 06.11.2023.

URL-3 <<https://www.intacinsaat.com/en/post-tensioning-application-in-reinforced-concrete-silos/>>, Erişim tarihi: 06.11.2023.

URL-4 <<https://www.obial.com.tr/en/products/grain-storage-silos/flat-bottom-silos.html>>, Erişim tarihi: 06.11.2023.

URL-5 <<https://www.obial.com.tr/en/products/grain-storage-silos/conical-bottom-silos.html>>, Erişim tarihi: 06.11.2023.

URL-6 <<https://www.adhmt.com/press-braking-stamping-and-roll-forming/>>, Erişim tarihi: 24.10.2023.

EKLER

EK A. Kapasite Hesaplamaları



EK A. Kapasite Hesaplamaları

AISI S100-16 şartnamesinde yanal burulmalı burkulma kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (A.1)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad (A.2)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (A.3)$$

CUFSM programında kesit özellikleri ve elastik burkulma analizlerinin yapılabilmesi için programda kesit yüksekliği, kesit genişliği, tırnak uzunluğu ve kalınlık ölçüleri girilmektedir. CUFSM programı kullanılarak hesaplanan kesit özellikleri Çizelge A.1’de verilmiştir.

Çizelge A.1. Hesaplanan kesit özellikleri.

A (mm ²)	J (mm ⁴)	x ₀ (mm)	I _x (mm ⁴)	I _y (mm ⁴)	C _w (mm ⁶)
838	1745.4	88.75	3.97×10 ⁶	4.85×10 ⁵	3.55×10 ⁹

$$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{3.97 \times 10^6}{838}} = 68.8 \text{ mm ve } r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{4.85 \times 10^5}{838}} = 24.05 \text{ mm}$$

olarak hesaplanmıştır.

$$r_o = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2} \quad (A.4)$$

$$r_o = \sqrt{68.8^2 + 24.05^2 + 88.75^2} = 115 \text{ mm}$$

Yapılan hesaplamalarda F_y=322 MPa, G=76923 MPa ve E= 200000 MPa olarak alınmıştır.

Bağlantı kirişi kullanılmayan deney elemanı için $K_t L_t$ ve $K_y L_y$ 4500 mm olarak alınmıştır.

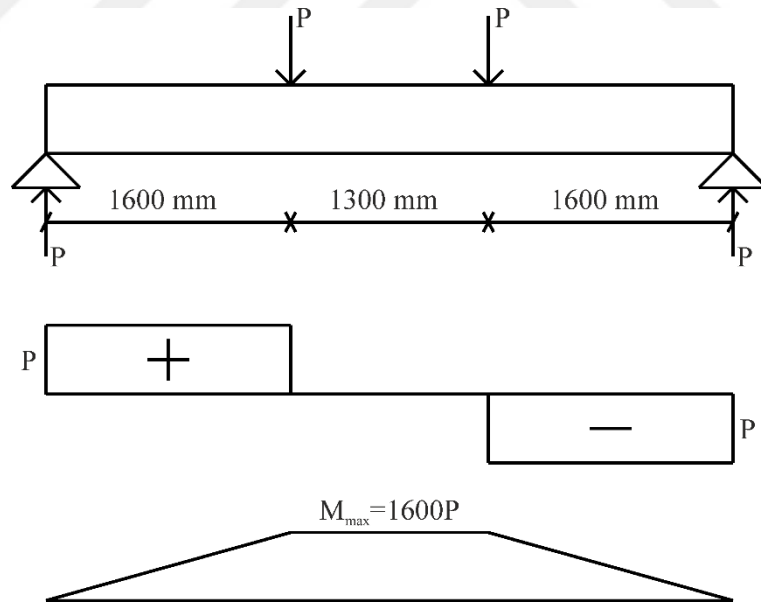
$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] =$$

$$\frac{1}{838 \times 115^2} \left[76923 \times 1745.4 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3.55 \times 10^9}{(4500)^2} \right] = 43.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y} \right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{4500}{24.05} \right)^2} = 56.3 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Moment düzeltme katsayısının (C_b) hesaplanması için kiriş moment diyagramının çizilmesi gerekmekte ve Denklem A.5'e göre hesaplanmaktadır. Kirişin kesme ve moment diyagramı Şekil A.1'de verilmiştir.



Şekil A.1. Kiriş kesme ve moment diyagramı.

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \quad (A.5)$$

Burada $M_{\max}$ en yüksek moment değerini, M_A kiriş uzunluğunun $\frac{1}{4}$ noktasındaki moment değerini, M_B kiriş uzunluğunun $\frac{1}{2}$ noktasındaki moment değerini ve M_C kiriş uzunluğunun $\frac{3}{4}$ noktasındaki moment değerini ifade etmektedir.

$$C_b = \frac{12.5 \times 1600P}{2.5 \times 1600P + 3 \times 1125P + 4 \times 1600P + 3 \times 1125P} = 1.17$$

olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra kritik elastik yanal burulmalı burkulma kapasitesi

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{1.17 \times 115 \times 838}{\frac{3.97 \times 10^6}{88.75}} \sqrt{56.3 \times 43.4} = 124 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanmıştır.

$F_{cre} < 0.56F_y$ olduğu için

$$F_n = F_{cre} = 124 \text{ MPa}$$

$$M_{ne} = S_f F_n = 44698 \times 124 = 5.5 \text{ kNm}$$

Yanal burulmalı burkulma moment kapasitesi hesaplanmıştır.

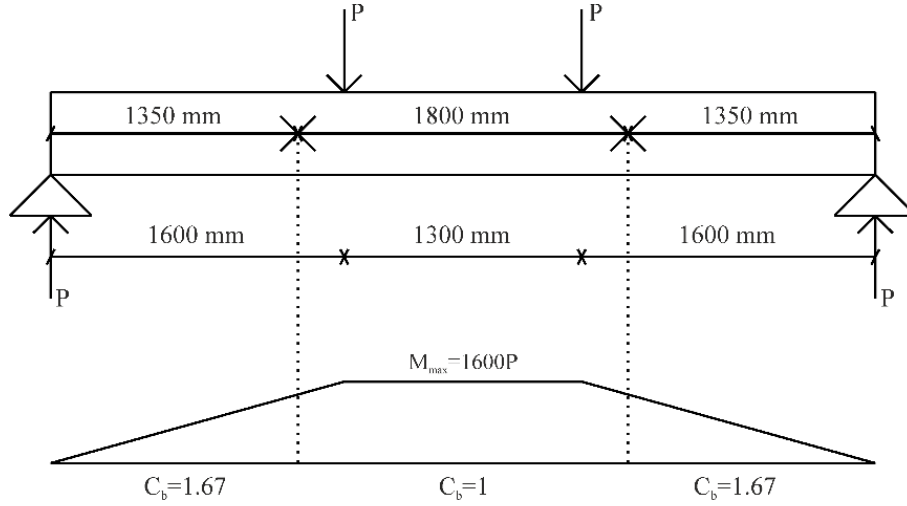
Bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm olan elemanlar için

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] =$$

$$\frac{1}{838 \times 115^2} \left[76923 \times 1745.4 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3.55 \times 10^9}{(1800)^2} \right] = 207 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y} \right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{1800}{24.05} \right)^2} = 352 \text{ MPa}$$

Moment düzeltme katsayısı Şekil A.2’de verilmiştir.



Şekil A.2. Bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm olan deney elemanları için moment düzeltme katsayısı.

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{1 \times 115 \times 838}{\frac{3.97 \times 10^6}{88.75}} \sqrt{207 \times 351} = 582 \text{ MPa}$$

$2.78F_y > F_{cre} > 0.56F_y$ olduğu için hesaplamalarda Denklem A.6 kullanılmıştır.

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10F_y}{36F_{cre}} \right) \quad (\text{A. 6})$$

$$F_n = \frac{10}{9} \times 322 \left(1 - \frac{10 \times 322}{36 \times 582} \right) = 303 \text{ MPa}$$

$$M_{ne} = S_f F_n = 44698 \times 310 = 13.5 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

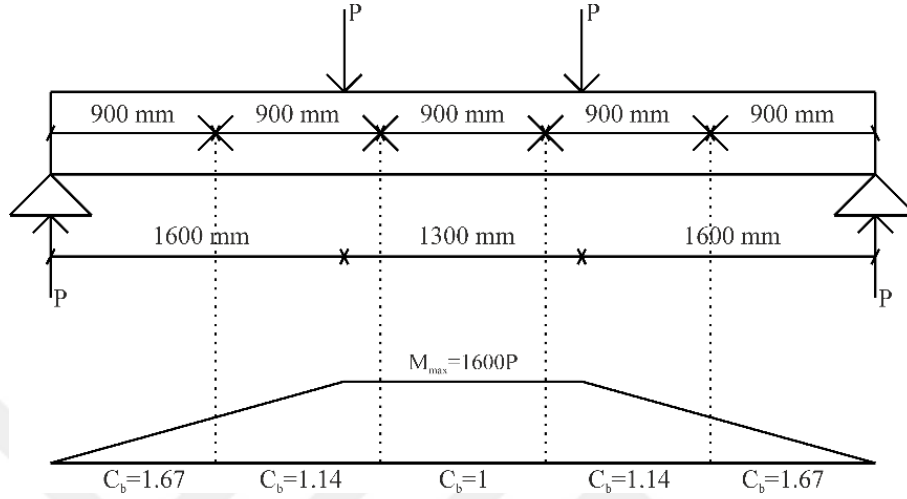
Bağlantı kirişleri arası mesafe 900 mm olan elemanlar için

$$\sigma_t = \frac{1}{Ar_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 EC_w}{(K_t L_t)^2} \right] =$$

$$\frac{1}{838 \times 115^2} \left[76923 \times 1745.4 + \frac{\pi^2 \times 200000 \times 3.55 \times 10^9}{(900)^2} \right] = 793 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} = \frac{\pi^2 \times 200000}{\left(\frac{900}{24.05}\right)^2} = 1407 \text{ MPa}$$

Moment düzeltme katsayısı Şekil A.3'te verilmiştir.



Şekil A.3. Bağlantı kirişleri arası mesafe 900 mm olan deney elemanları için moment düzeltme katsayısı.

$$F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} = \frac{1 \times 115 \times 838}{\frac{3.97 \times 10^6}{88.75}} \sqrt{793 \times 1407} = 2275 \text{ MPa}$$

$F_{cre} \geq 2.78 F_y$ olduğu için Denklem A.7 kullanılmıştır.

$$F_n = F_y \quad (\text{A. 7})$$

$$F_n = F_y = 322 \text{ MPa}$$

$$M_{ne} = S_f F_n = 44698 \times 322 = 14.4 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

Lokal burkulma kapasitesi AISI S100-16 şartnamesinde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda_l \leq 0.776$$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (A. 8)$$

$$\lambda_l > 0.776$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (A. 9)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (A. 10)$$

CUFSM programında elastik burkulma analizi sonucunda lokal burkulma için F_{crl}/F_y oranı 3.64 olarak elde edilmişti. Buradan lokal burkulma için narinlik oranı hesaplanabilmektedir.

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} = \sqrt{\frac{1}{3.64}} = 0.53$$

olarak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda $\lambda_l \leq 0.776$ olduğu için

$$M_{nl} = M_{ne} = 13.5 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bağlantı kirişleri arası mesafe 900 mm olarak deney elemanları için de benzer şekilde $\lambda_l \leq 0.776$ olduğu için

$$M_{nl} = M_{ne} = 14.4 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

Distorsiyonel burkulma kapasitesi AISI S100-16 şartnamesinde aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda_d \leq 0.673$$

$$M_{nd} = M_y \quad (A. 11)$$

$$\lambda_d > 0.673$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (A. 12)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (A. 13)$$

CUFSM programında elastik burkulma analizi sonucunda distorsiyonel burkulma için F_{cr1}/F_y oranı 2.77 olarak elde edilmişti. Buradan lokal burkulma için narinlik oranı hesaplanabilmektedir.

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} = \sqrt{\frac{1}{2.77}} = 0.6$$

Bunun sonucunda $\lambda_d \leq 0.673$ olduğu için bağlantı kirişleri arası mesafe 1800 mm ve 900 mm olan deney elemanları için

$$M_{nd} = M_y = 14.4 \text{ kNm}$$

olarak hesaplanmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ramazan Oruç

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
2011-2016

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim
Dalı, 2016-2019

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Müh. Böl. / Araştırma Görevlisi

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Oruç, R. ve Kara, M. E., 2024. Eğilme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik konik çatı kirişlerinin sonlu elemanlar modellemesine etki eden parametrelerin incelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 2, 672-679.