



**DEPOLAMA RAF SİSTEMİ ELEMANLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ
VE KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİ İÇİN MEKANİK
BİR MODEL ÖNERİLMESİ**

Casim YAZICI

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL
Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DEPOLAMA RAF SİSTEMİ ELEMANLARININ DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ VE KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİ İÇİN MEKANİK
BİR MODEL ÖNERİLMESİ**

(Experimental and Numerical Investigation on the Storage Rack System Members and
Proposal of a Mechanical Model for Beam-to-Column Connections)

DOKTORA TEZİ

Casim YAZICI

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Erzurum
Aralık, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

DEPOLAMA RAF SİSTEMİ ELEMANLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ VE KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİ İÇİN MEKANİK BİR MODEL
ÖNERİLMESİ

Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, Casim YAZICI tarafından hazırlanan bu çalışma, 05/12/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / ~~ayrıkçılığı~~ (..../....)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Habib UYSAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Halim KOVACI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/....../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında sunulan “Depolama Raf Sistemi Elemanlarının DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi ve Kiriş-Kolon Birleşimleri İçin Mekanik Bir Model Önerilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	17	30
Materyal ve Metot	2	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	10	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Casim YAZICI	Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL
5.12.2022	5.12.2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitim süreci boyunca, bu yolda yürürken desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Bu tez kapsamında kullanılan deney numunelerini sağlayan Rafeks Raf Sistemleri İmalat San. ve Tic. A.Ş.'ye çok teşekkür ederim.

Bu tezin oluşmasına en büyük katkıyı sağlayan, hiçbir konuda yardımını esirgemeyen ve her türlü bilgilendirme ve yönlendirmeleriyle çalışmamı bilimsel bir temelde sunmamı sağlayan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Casim YAZICI

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DEPOLAMA RAF SİSTEMİ ELEMANLARININ DENEYSSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ VE KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİ İÇİN MEKANİK BİR MODEL ÖNERİLMESİ

Casim YAZICI

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Amaç: Depolama raf sistemi elemanlarının yapısal davranışını incelemek üzere deneysel ve sayısal çözümleme tabanlı bir çalışma yürütülmüştür. Kiriş-kolon birleşimlerinin yapısal davranışı üzerindeki etkilerini tespit etmek üzere, kiriş yüksekliği, konnektör boyu ve kirişin konnektör üzerindeki konumu değiştirilmiştir. Kolon kesitleri için ağız açıklığına yerleştirilen bulonların etkinliği araştırılmıştır. Ayrıca kiriş-kolon deneylerinde hasar alan kolon numunelerinin eksenel basınç altında gösterdiği yeni davranış incelenmiştir. Kiriş-kolon birleşimleri için ise deneysel olarak doğrulanmış bir mekanik model oluşturulması amaçlanmıştır.

Yöntem: Kolon eksenel basınç deneyleri için ilgili standartlardaki yönergeler doğrultusunda, kolon kesit genişliğinin asgari üç katı olacak şekilde kolon uzunlukları belirlenmiştir. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için ise tek kollu konsol deney yöntemi kullanılmıştır. Deneysel incelemede dikkate alınanların yanı sıra muhtelif tasarım değişkenleri ayrıca sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal çözümleme üzerinden incelenmiştir. Kiriş-kolon birleşimlerinin davranışını tahmin etmek için oluşturulan mekanik model ise geçmiş çalışmalardaki yaklaşımlar üzerinden geliştirilmiştir.

Bulgular: Kiriş-kolon birleşimlerinde farklı kiriş yükseklikleri kullanıldığında, kirişin konnektör üzerindeki konumu düşey doğrultuda değiştirildiğinde ve kolon ağız açıklığına bulon yerleştirildiğinde birleşimin moment taşıma kapasitesi ve dönme rijitliği gibi yapısal davranış göstergelerinde önemli değişimler ortaya çıkmıştır. Kirişin konnektör üzerindeki konumu yatay doğrultuda değiştirildiğinde ve konnektör boyu uzatıldığında kayda değer kazanımlar elde edilememiştir. Kolon ağız açıklığına bulon yerleştirildiğinde ise sıra dışı davranışlar ile karşılaşmıştır. Kiriş-kolon deneylerinden alınan hasarlı kolonların eksenel basınç deneyine tabi tutulması sonrasında ise yüksek oranda kapasite kayıpları tespit edilmiştir.

Sonuç: Çalışma kapsamında muhtelif tasarım değişkenlerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi ile ulaşılan sonuçlar raf sistemi elemanlarının davranışını anlama yönünde önemli kazanımlar sağlamıştır. Buna ilaveten, kiriş-kolon birleşimlerinin başlangıç dönme rijitliğini tahmin etmek üzere geliştirilen mekanik model önemli seviyede başarılı sonuçlar sunmaktadır.

Anahtar Kelime: depolama raf sistemleri, soğuk haddelenmiş çelik, kiriş-kolon birleşimleri, deneysel inceleme, sayısal çözümleme

Aralık 2022, 161 Sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON THE STORAGE RACK SYSTEM MEMBERS AND PROPOSAL OF A MECHANICAL MODEL FOR BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS

Casim YAZICI

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Purpose: To investigate the structural behavior of storage rack system members, an experimental and numerical analysis-based study was carried out. Beam height, connector length, and beam position on the connector were modified to identify their effect on the structural behavior of beam-to-column connections. The efficiency of the bolts installed among the opening of column was investigated. Furthermore, the new behavior of damaged column specimens of beam-column tests under axial force was studied. It is aimed to provide an experimentally validated mechanical model for beam-to-column connections.

Method: In accordance with the requirements in the relevant standards for column axial compression testing, column lengths were determined to be at least three times the column cross-section width. The single-arm cantilever test method was employed for the beam-to-column connection testing. In addition to the variables included in the experimental research, different design variables were investigated numerically using the finite element method. The mechanical model constituted to predict the behavior of beam-to-column connections was developed on earlier research methodologies.

Results: Significant changes in structural behavior indicators such as the connection's moment carrying capacity and rotational stiffness have occurred when different beam heights are used in beam-to-column connections, the position of the beam on the connector is changed in the vertical direction, and bolts are placed among the column opening. When the position of the beam on the connector was moved horizontally and the connector length was increased, no significant benefits were obtained. Divergent outcomes were seen when the bolts were placed among the column opening. Significant capacity losses were observed after the damaged columns from the beam-to-column tests were subjected to the axial compression testing.

Conclusion: The results of the experimental and numerical investigation of various design factors provided significant advances in understanding the behavior of the rack system members. Furthermore, the mechanical model developed to predict the initial rotational stiffness of beam-to-column connections presents considerable successful results.

Keywords: storage rack systems, cold-formed steel, beam-to-column connections, experimental investigation, numerical analysis

September 2022, 161 Pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xvi
GİRİŞ.....	1
Genel	1
Tezin Amacı.....	5
KURAMSAL TEMELLER.....	6
Çelik Depolama Raf Sistemleri.....	6
Çelik depolama raf sistem modelleri.....	7
Raf sistemi elemanları.....	11
Soğuk Şekil Verme	16
Geçmiş Çalışmalar	19
Deneysel çalışmalar	19
Sayısal çözümleme çalışmaları	24
Mekanik model çalışmaları	26
MATERYAL VE METOT.....	34
Deneysel İnceleme	34
Kiriş-kolon birleşim deneyi.....	34
Kolon eksenel basınç deneyi.....	41
Hasarlı kolon eksenel basınç deneyi	43
Sayısal Çözümleme.....	43
Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme.....	44
Sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme	48
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	58
Deneysel İnceleme Sonuçları	58
Kiriş-kolon birleşim davranışı	58

Kolon eksenel basınç davranışı	76
Sayısal Çözümleme Sonuçları	76
Hasarlı kolon eksenel basınç davranışı	80
Kiriş-kolon birleşim davranışı	82
Kolon eksenel basınç davranışı	109
Tasarım Değişkenlerinin Davranışa Etkisi	117
Kolon et kalınlığı	117
Kiriş yüksekliği	118
Kirişin düşey konumu	118
Kirişin yatay konumu	118
Konnektörün aşağı yönde uzatılması	119
Kolon ağız açıklığına bulon montajı	119
Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Dönme Rijitliği İçin Mekanik Model	119
Tırnaklarda eğilme ($k_{t,b}$)	120
Kolon gövdesinde tırnakların girdiği yuvalarda ezilme (k_{uwb})	123
Kolon yuvalarında tırnak etkisiyle eğilme (k_{uwf})	124
Kolon gövdesinde kesme (k_{uws})	126
Konnektörde kesme ve eğilme (k_{csb})	127
Tırnaklarda kesme ($k_{t,s}$)	130
Kolon gövdesinde çekme (k_{uwt})	130
Kolon gövdesinde basınç (k_{uwc})	130
Kaynak ve kiriş rijitlikleri	131
İlk dönme rijitliğinin hesaplanması	131
DeneySEL sonuçlarla mekanik modelin doğrulanması	133
SONUÇLAR	135
KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ	142

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Mekanik Modellerin Oransal Rijitlik Değerleri İçin Hata Payları	33
Tablo 2. Kiriş-Kolon Birleşim Deneyleri İçin Kullanılan İsimlendirme Yöntemi.....	36
Tablo 3. Geçmiş Çalışmalardaki Kiriş-Kolon Birleşim Deneylerine Ait Bilgiler.....	45
Tablo 5. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları	51
Tablo 6. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları	51
Tablo 7. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları	51
Tablo 8. Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları	51
Tablo 9. Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları	51
Tablo 10. Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları	52
Tablo 11. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları	53
Tablo 12. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları	53
Tablo 13. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları	53
Tablo 14. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları	55
Tablo 15. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları	55
Tablo 16. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları	55
Tablo 18. Zhao vd. (2018) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları	57
Tablo 19. Zhao vd. (2018) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları	57
Tablo 20. C1, C2, C3 ve C4 Kesitli Deney Sonuçlarının Özeti	59
Tablo 21. Kiriş-Kolon Birleşim Deneylerinde Görülen Göçme Modları	65
Tablo 22. Analitik Model İle Elde Edilen Tahmin Sonuçları	75
Tablo 23. Kolon Kesitleri İçin Kritik Burkulma Yüğü Değerleri.....	77
Tablo 24. C1, C2, C3 ve C4 Hasarlı Kesitleri İçin Burkulma Davranışı Bilgileri	81
Tablo 25. (Bernuzzi ve Simoncelli 2016), (Gusella vd. 2018), (Z. J. Lyu vd. 2018), (Shah vd. 2016) ve (Zhao vd. 2014) Çalışmaları İçin Deneysel İnceleme ve Sayısal Çözümleme Sonuçları	85
Tablo 26. Kiriş Konumunun Düşey Doğrultuda Değiştirildiği Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları	92
Tablo 27. Kiriş Konumunun Yatay Doğrultuda Değiştirildiği Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları	98
Tablo 28. Konnektör Boyunun Uzatıldığı Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları	103
Tablo 29. Tüm Kiriş-Kolon Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları	109
Tablo 30. Tüm Kiriş-Kolon Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları	117
Tablo 31. Tırnaklara Gelen Yüklere Göre Kat Sayı Değerleri	123

Tablo 32. Mekanik Model Rijitlik Değerlerinin Doğrulaması	134
Tablo 33. Mekanik Model Rijitlik Değerlerinin Literatürdeki Çalışmalar ile Doğrulanması	134



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Tipik bir depolama raf sistemi	2
Şekil 2. Sırt sırta depolama raf sistemi.....	3
Şekil 3. Soğuk formda şekil verilerek üretilmiş kesitler	3
Şekil 4. Dar koridor raf sistemi	7
Şekil 5. İçine girilebilir ve geçişli raf sistemi.....	8
Şekil 6. Paletli kayar raf sistemi.....	8
Şekil 7. Konsol kollu raf sistemi	9
Şekil 8. Çok katlı raf sistemleri	9
Şekil 9. Sırt sırta raf sistemleri	10
Şekil 10. Sırt sırta çift detay raf sistemleri	10
Şekil 11. Sırt sırta 3 ayak raf sistemleri	11
Şekil 12. Kolon kesitleri ve boşluk tipleri.....	12
Şekil 13. Farklı burkulma modlarının kesit deformasyonu	13
Şekil 14. Travers kesitleri.....	14
Şekil 15. Konnektör.....	14
Şekil 16. Stabilite bağlantı türleri.....	15
Şekil 17. Zemin bağlantı elemanları.....	15
Şekil 18. Ara bağlantı elemanları	16
Şekil 19. Abkant pres bükümü	17
Şekil 20. Soğuk şekillendirilmiş profillerin artık gerilmeleri	18
Şekil 21. Soğuk şekil verme işleminin aşamaları.....	18
Şekil 22. Zhao vd. (2017) tarafından önerilen mekanik model.....	27
Şekil 23. Kiriş-kolon birleşimindeki bileşenler.....	27
Şekil 24. İlk dönme rijitliği için hesaplama işlemleri	29
Şekil 25. Dönme rijitliğinin değerlendirilmesi için mekanik model ve işlemler	31
Şekil 26. Zhao ve Ślęczka modellerinin oransal rijitliği k_o/k_e	32
Şekil 27. Kiriş-kolon birleşim deneyi için tasarlanan deney düzeneği	35
Şekil 28. Kiriş-kolon birleşim deneyi.....	35
Şekil 29. Tipik kiriş-kolon birleşim detayı.....	36
Şekil 30. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için deney düzeneği	37
Şekil 31. Kirişlerin konnektör üzerindeki farklı konumları	37
Şekil 32. C1 ve C2 kolon geometrisinin detayları	38
Şekil 33. C3 kolon geometrisinin detayları	39

Şekil 34. C4 kolon geometrisinin detayları	39
Şekil 35. Kiriş geometrisinin detayları	40
Şekil 36. Konnektör geometrisinin detayları	40
Şekil 37. Kolon ağzına bulon yerleştirilen kiriş-kolon birleşim detayı	41
Şekil 38. Kolon eksenel basınç deneyleri için deney düzeneği	42
Şekil 39. Örnek kolon eksenel basınç deneyi	42
Şekil 40. Eksenel basınç deneylerinde kullanılan bulonlu kesit detayı	43
Şekil 41. Hasarlı kolonlar için eksenel basınç deney düzeneği	44
Şekil 42. Kiriş-kolon birleşimlerinin sonlu eleman modeli	45
Şekil 43. Kirişin konnektördeki düşey konumunun değiştirildiği model detayları	47
Şekil 44. Kirişin konnektördeki yatay konumunun değiştirildiği model detayları	48
Şekil 45. Konnektör boyunun aşağı doğru uzatıldığı model detayları	49
Şekil 46. Zhao vd. (2017) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri	50
Şekil 47. Shah vd. (2016) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri	51
Şekil 48. Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan kolon en kesitleri	52
Şekil 49. Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan kiriş en kesitleri	52
Şekil 50. Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan konnektör en kesitleri	53
Şekil 51. Zhao vd. (2014) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri	54
Şekil 52. Zhao vd. (2018) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri	56
Şekil 53. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için moment taşıma değerleri	60
Şekil 54. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için azami dönme değerleri	61
Şekil 55. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için başlangıç dönme rijitliği değerleri	62
Şekil 56. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için süneklik değerleri	63
Şekil 57. Göçme modu – I (FM – I)	65
Şekil 58. Göçme modu – II (FM – II)	66
Şekil 59. Göçme modu – III (FM – III)	66
Şekil 60. Göçme modu – IV (FM – IV)	67
Şekil 61. Göçme modu – V (FM – V)	67
Şekil 62. C1 kesitlerinin moment-dönme eğrileri	68
Şekil 63. C2 kesitlerinin moment-dönme eğrileri	68
Şekil 64. C3 kesitlerinin moment-dönme eğrileri	69
Şekil 65. C4 kesitlerinin moment-dönme eğrileri	69
Şekil 66. +40 konumunda kirişlerin moment-dönme eğrileri	70
Şekil 67. B120 kirişli birleşimlerin moment-dönme eğrileri	70
Şekil 68. B140 kirişli birleşimlerin moment-dönme eğrileri	71

Şekil 69. +40 konumunda bulonlu ve bulonsuz birleşimlerin moment-dönme eğrileri.....	71
Şekil 70. +60 konumunda bulonlu ve bulonsuz birleşimlerin moment-dönme eğrileri.....	71
Şekil 71. 2.5C2-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	73
Şekil 72. 2.5C2-B140-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	73
Şekil 73. 3.0C1-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	74
Şekil 74. 3.0C1-B140-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	74
Şekil 75. 2.0C3-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	74
Şekil 76. 2.0C4-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması	75
Şekil 77. Eksenel basınç deneylerinde görülen göçme modları	78
Şekil 78. 3.0C1 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri.....	79
Şekil 79. 2.5C2 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri.....	79
Şekil 80. 1.5C3 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri.....	79
Şekil 81. 2.0C3 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri.....	80
Şekil 82. 2.0C4 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri.....	80
Şekil 83. Hasarlı kolonlar için eksenel basınç deneylerinde görülen göçme modları.....	82
Şekil 84. C4*-B105-3T için yer değiştirme değerleri	84
Şekil 85. C4*-B105-3T için von-Mises gerilme değerleri	84
Şekil 86. 2U-4L-100B için maksimum yer değiştirme değerleri	85
Şekil 87. 2U-4L-100B için von-Mises gerilme değerleri.....	85
Şekil 88. C4*-B105-3T numunesi için moment-dönme eğrileri.....	86
Şekil 89. 2U-4L-125BD numunesi için moment-dönme eğrileri.....	86
Şekil 90. Geçmiş çalışmalardaki kiriş-kolon birleşimleri için moment-dönme eğrileri	87
Şekil 91. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	87
Şekil 92. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	88
Şekil 93. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	88

Şekil 94. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	89
Şekil 95. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	89
Şekil 96. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	90
Şekil 97. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	90
Şekil 98. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	91
Şekil 99. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	91
Şekil 100. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	92
Şekil 101. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	93
Şekil 102. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	94
Şekil 103. Gusella vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	94
Şekil 104. Gusella vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	95
Şekil 105. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	95
Şekil 106. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	96
Şekil 107. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	96
Şekil 108. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	97
Şekil 109. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı	97
Şekil 110. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	98

Şekil 111. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı	99
Şekil 112. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	99
Şekil 113. Gusella vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı	100
Şekil 114. Gusella vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	100
Şekil 115. Lyu vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı	101
Şekil 116. Lyu vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	101
Şekil 117. Shah vd. (2016) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı	101
Şekil 118. Shah vd. (2016) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	102
Şekil 119. Zhao vd. (2014) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı	102
Şekil 120. Zhao vd. (2014) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri	103
Şekil 121. 3.0C1 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları	105
Şekil 122. 2.5C2 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları	106
Şekil 123. 2.0C3 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları	107
Şekil 124. 2.0C4 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları	108
Şekil 125. 2.0C3-B120-5T+0 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması	110
Şekil 126. 2.0C3-B120-5T+20 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması	111
Şekil 127. 2.0C4-B120-5T+40 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması	111
Şekil 128. 1.5C3 kolon kesiti için eksenel basınç çözümlemesi sonuçları	112
Şekil 129. 2.0C3 kolon kesiti için eksenel basınç çözümlemesi sonuçları	113
Şekil 130. 2.0C4 kolon kesiti için eksenel basınç çözümlemesi sonuçları	114
Şekil 131. 2.5C2 kolon kesiti için eksenel basınç çözümlemesi sonuçları	115
Şekil 132. 3.0C1 kolon kesiti için eksenel basınç çözümlemesi sonuçları	116
Şekil 133. Tırnaklarda eğilme için mukavemet modeli	120
Şekil 134. Tırnaklarda eğilme için mukavemet modeli dönüşümleri	120
Şekil 135. Tırnak kesit detayları ve moment alınacak noktalar	121

Şekil 136. Konnektör tırnak yapısı ve dönme noktası	123
Şekil 137. $b_{eff,u}$ değerinin hesaplanması	124
Şekil 138. Tırnak ve yuvasının mukavemet modeli	124
Şekil 139. Tırnak yuvasının en kesit detayı	125
Şekil 140. Kolon gövdesinde gerilme dağılımı	126
Şekil 141. Konnektör kesit detayları	128
Şekil 142. Konnektör için mukavemet modeli	129
Şekil 143. Tırnaklarda kesme için mukavemet modeli	130
Şekil 144. Kolon gövdesinin kesit detayı	131
Şekil 145. Mekanik model yay modeli	132
Şekil 146. Mekanik model bileşke yay modeli	132
Şekil 147. Mekanik model dönüşmüş yay modeli	132
Şekil 148. Mekanik model nihai yay modeli	132

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

a	: Kolon kesitinin gövde genişliği
$b_{eff,u}$	: Tırnaktaki efektif uzunluk
d_h	: Boşluk yapısının dış yüzeyinin kolon dış yüzeyine olan uzaklığı
d_w	: Kolon gövdesinde düşeyde iki yuva arasındaki net mesafe
$d_{w,x}$	: Kolonda boşluk yapıları arasındaki yatay mesafe
E	: Elastisite Modülü
F_{csb}	: Konnektörde kesme ve eğilme kuvveti
$F_{t,s}$	: Tırnaklarda kesme kuvveti
F_{uws}	: Kolon gövdesindeki kesme kuvveti
G	: Kayma modülü
h_b	: Kiriş yüksekliği
h_t	: Tırnak etkili yüksekliği
I	: Atalet Momenti
I'	: Kolon boşluk yapısının atalet momenti
I_x	: Tırnağın atalet momenti
k_0	: İlk dönme rijitliği
k_{bcb}	: Konnektörün eğilme ve kesmedeki rijitliği
$k_{co,ext}$	: Konnektörde kesme ve eğilme rijitliği
$k_{co,int}$	: Konnektörde kesme ve eğilme rijitliği
$k_{cow,c}$	: Konnektör gövdesinde gerilme rijitliği
$k_{cow,t}$	: Konnektör gövdesinde gerilme rijitliği
k_{csb}	: Konnektörde kesme ve eğilme rijitliği
$k_{csb,b}$	: Konnektörde kesme ve eğilmede eğilme rijitliği
$k_{csb,s}$	: Konnektörde kesme ve eğilmede kesme rijitliği
$k_{csb,s}$	: Konnektördeki kesme rijitliği
$k_{cw,b}$	: Kolon gövde rulmanı
$k_{cw,c}$	: Kolon gövdesinde gerilme rijitliği
$k_{cw,s}$	: Kolon gövdesinde kesme
$k_{cw,tear}$	: Kolon gövdesinde ezilme rijitliği
k_{cwb}	: Kolon boşluklarının rijitliği
k_{cwc}	: Kolon gövdesinde tırnakların temasta bulunduğu noktanın rijitliği
$k_{cws-\varphi}$	: Kolon gövdesindeki kesmedeki rijitliği
$k_{t,b}$	: Tırnaklardaki eğilme rijitliği

$k_{t,s}$	: Tırnaklarda kesme rijitliği
$k_{t,s}$	: Tırnaktaki kesme rijitliği
k_{tb}	: Tırnaktaki eğilme rijitliği
$k_{t-\varphi}$	: Eşdeğer dönme rijitliği
k_{uwb}	: Kolon gövdesinde tırnakların girdiği yuvalarda ezilme rijitliği
k_{uwc}	: Kolon gövdesinde basınç rijitliği
k_{uwf}	: Kolon yuvalarında tırnak etkisiyle eğilme rijitliği
k_{uws}	: Kolon gövdesinde kesme rijitliği
k_{uwt}	: Kolon gövdesinde çekme rijitliği
M_u	: Maksimum moment
q	: Yayılı Yük
S_k	: Dönme rijitliği
V_{csb}	: Konnektörde kesme ve eğilme direnci
V_{uws}	: Kolon gövdesindeki kesme direnci
θ_u	: Maksimum moment noktasındaki dönme
λ_M	: Moment katsayısı
λ_S	: Rijitlik katsayısı
l_h	: Kiriş açıklığı
l_o	: Tırnak etkin bölge uzunluğu
l_t	: Tırnak konsol uzunluğu
s	: Şekil faktörü
t_{up}	: Kolon et kalınlığı
δ	: Deplasman
δ_{bcb}	: Konnektörün eğilme ve kesmedeki deplasmanı
$\delta_{csb,b}$	: Konnektörde kesme ve eğilmede eğilme sonucu deplasmanı
$\delta_{csb,s}$	: Konnektörde kesme ve eğilmede kesme sonucu deplasman
δ_{cwc}	: Kolon gövdesinde yatak deformasyonları
$\delta_{t,b}$	: Tırnakta eğilme deplasmanı
$\delta_{t,s}$	: Tırnaklarda kesme sonucu deplasman
δ_{tb}	: Tırnakta eğilmedeki deplasman
δ_{uwb}	: Kolon gövdesinde tırnakların girdiği yuvalarda ezilme sonucu deplasman
δ_{uwf}	: Kolon yuvalarında tırnak etkisiyle eğilme sonucu deplasman

GİRİŞ

Genel

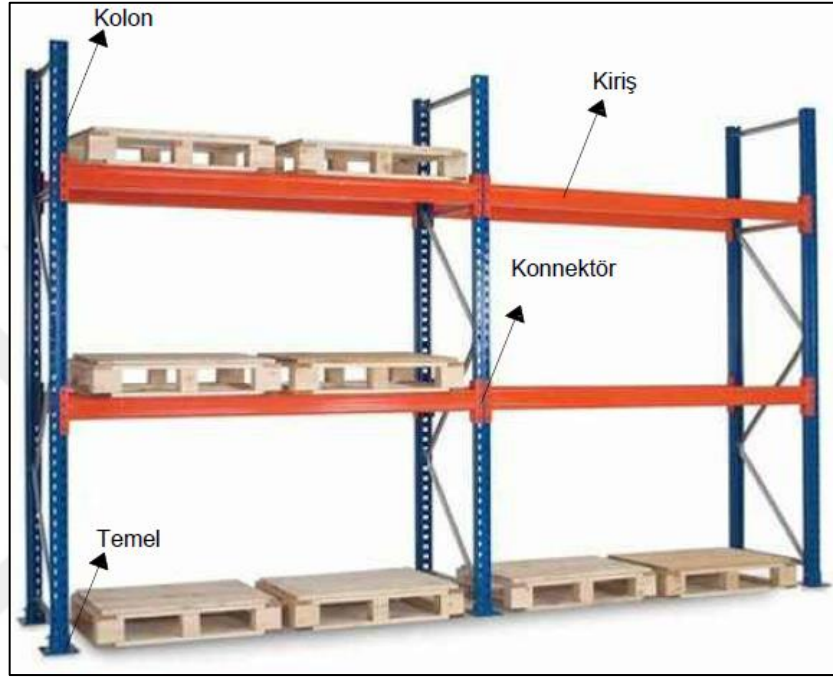
Depolama raf sistemlerini oluşturan yapısal elemanlar, et kalınlığı 1-7.5 mm arasında olan çelik plakaların roll-form (sürekli formda şekil verme) makinaları ile şekillendirilmesiyle hızlı bir biçimde üretilmektedir. Bu makinalar vasıtası ile talep edilen kesitlere göre her roll-form istasyonunda gerekli bükümlerin yapılması ile nihai tasarım elde edilmektedir. Depolama raf elemanlarının ince sac malzemelerden üretilmesi ile sıcak hadde profillerine kıyasla daha ucuz, daha hızlı ve çeşitliliği daha fazla profillerin kullanılması gibi avantajlar elde edilmektedir. Bu avantajlara rağmen kesit et kalınlıklarının düşük olması ve eleman yüksekliklerinin fazla olması sebebiyle burkulma yönünden ve birleşim bölgelerinde ortaya çıkan yüksek gerilmeler yönünden sorunlarla da karşılaşmaktadır (Pala ve Şenaysoy 2017).

Uzaktan satış işlemlerindeki yaygınlaşma ve dünyanın farklı noktalarında üretilen ürünlerin başka bir merkezde bileştirilmesi sonucu üretim süreçlerinin bölgesel yönden genişlemesi, taşıma ve depolama ihtiyaçlarını daha da ön plâna çıkarmaktadır. Bu durum, depolama ve lojistik sektörlerinin önemini artırmaktadır. Ürünlerin üreticiden son kullanıcıya taşınması için kat edilen süreçte yüksek mühendislik ürünü olan depolama rafı sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Depolama raf sistemleri; içine girilebilir raflar, konsol rafları, seçici palet rafları, dar koridor rafları, sırt sırta palet rafları, geri itme rafları, yerçekimi akışı ve palet akış rafları gibi çeşitli sınıflandırmalarla tanımlanmaktadır.

Palet rafları, firmaların ihtiyaç niteliklerine göre düşük yoğunluklu veya tüm ürünlerin her zaman erişilebilir olması gerektiği durumlarda tercih edilmektedir. Depolama alanında her ürüne doğrudan erişim imkânının yanı sıra taban alanının verimli kullanılmasını da kolaylaştırmaktadır. Tipik bir depolama raf sisteminin detayları Şekil 1'de verilmiştir. Raf sistemleri; esasen kolon, kiriş ve konnektörlerden oluşan çerçeve sistemlerden teşkil edilmektedir.

Depolama raf sistemlerinde, genellikle geçmeli yarı-rijit birleşimler kullanılmaktadır. Kiriş ucu konnektörü, kiriş-kolon birleşimini sağlamaktadır. Konnektör üzerinde bulunan tırnaklar, kolon kesitinin gövde kısmında belirli aralıklarla oluşturulmuş boşluklar sayesinde istenen yükseklikte montaj imkânı sağlamaktadır. Kiriş ucu konnektörünün davranışı sadece tırnaklar ve korniye tasarımıyla etkilenmemekte, aynı zamanda korniyerin

kaynaklandığı kirişin boyutu ve kirişin korniyer üzerindeki konumuyla da ilişkilidir. Konnektörde bulunan tırnakların sayısı artırılarak daha fazla rijitlik ve mukavemet elde edilebilmektedir. Raf sistemlerinin yapısal başarımı, öncelikli olarak kiriş ucu konnektörünün mekanik davranışına bağlıdır. Sürekliliği bozulmayan raflarda, kirişler ve çapraz bağlantılar raf yapısının stabilitesine katkı sağlamaktadır. Çelik çerçeve sistem yanall yüklerle maruz kaldığında görülebilecek olan yanall salınımda ise konnektörün dönme rijitliği, kiriş-kolon birleşiminin davranışında etkin rol oynamaktadır.



Şekil 1. Tipik bir depolama raf sistemi

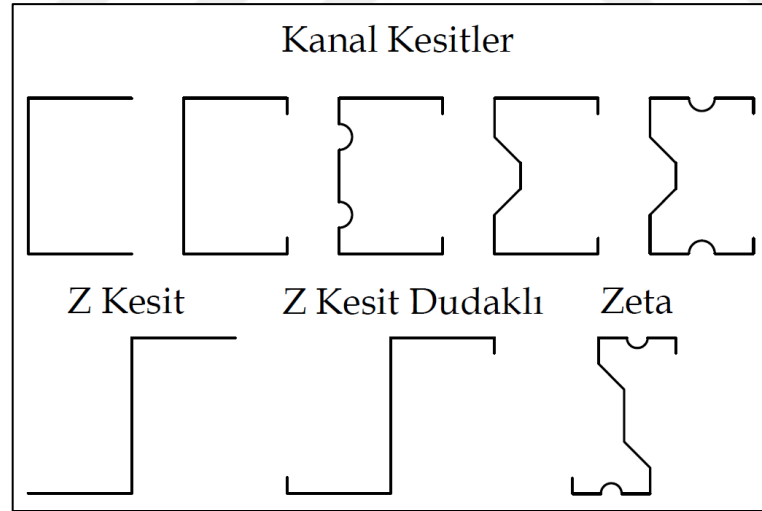
Çevrimiçi satış sistemlerinin yaygınlaşması günlük yaşamda önemli kolaylıklar sağlarken, ürünlerin geçici veya uzun süreli depolanması ise önemli bir sorun haline geldiğinde depolama raf sistemlerinin önemi giderek artmaktadır. Literatürde ve özel sektörde birbirini neredeyse tekrar eden nitelikte benzer kesitler ve çerçeve sistem düzenleri kullanılmaktadır. Sırt sırta depolama raf sistemi yaygın olarak tercih edilen raf modeli olup model detayları Şekil 2’de verilmiştir.

Çelik malzemeden imal edilen depolama raf sistemleri, ürün yelpazesinin artması ile lojistik ve depolama sektörlerinde gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Yirmi birinci yüzyılın başlarında hafif çelikten üretilmeye başlanan depolama raf sistemlerinin kullanımının günümüzde daha çok yaygınlaştığı gözlenmektedir. Ulusal ve uluslararası alanda ürünlerin depolanması büyük bir problem haline gelmesi ve buna bağlı olarak depolama raf sistemlerine duyulan ihtiyacın artması sebebiyle, bu sistemlerin taşıma kapasiteleri ve yapısal ömürleri üzerine yapılan çalışmaların çeşitliliğinde de kayda değer bir artış söz konusudur.



Şekil 2. Sırt sırta depolama raf sistemi

Soğuk şekillendirilmiş çelik (cold formed steel, CFS), sacların ısıtılma maruz kaldıktan sonra haddelenmesi veya preslenmesi ile üretilen ürünler için kullanılan genel bir tanımdır. Bu ürünler genellikle imalat sektörünün çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Otomobiller, endüstriyel ürünler, demiryolu vagonları, depolama rafları, otoyol ürünleri, köprüler, ekipman türleri gibi üretim alanlarında kullanılmaktadır (Trouncer ve Rasmussen, 2016a). Soğuk formda şekil verilerek üretilmiş bazı yapısal kesitler Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Soğuk formda şekil verilerek üretilmiş kesitler

Çelik depo raf sistemi elemanları, ince cidarlı çelik sacların ısıtılma maruz bırakılmadan işlenmesi ile imal edilmektedir. Sıcak hadde ürünü olan plâkalar, malzeme sıcaklığı ve cidar kalınlığı değiştirilmeden plâka doğrultusuna dik, paralel veya düz baskı uygulanarak istenen biçimin elde edilmesine soğuk şekil verme denir. İnce cidarlı çelik elemanlardan üretilen yapma profillerin, taşıyıcı sistemlerde kullanımının üstünlük ve zayıflıkları da bulunmaktadır. Bu üstünlükler;

- ✓ Seri üretim,
- ✓ Hafiflik,
- ✓ Kolay kurulum,
- ✓ Paslanma korunumu,
- ✓ Yüksek mukavemet,
- ✓ Düşük nakliye giderleri,
- ✓ Kalıp işçiliğinin gerekmemesi,
- ✓ Kesit çeşitliliği ve geri dönüşüm,

şeklinde özetlenebilirken, profil kalınlıklarının düşük değerde olması ise aşağıdaki zayıflıkları ortaya çıkarmaktadır;

- ✓ Burkulma problemleri,
- ✓ Yangın dayanımlarının düşük olması.

Raf sistemi bileşenleri; kolon, kiriş, konnektör, çapraz bağlantılar, taban bağlantısı ve stabilite bağlantılarından oluşmaktadır. Stabilite bağlantı elemanları ve kirişler, kolonlara genellikle bulonlu, kaynaklı veya tırnaklı birleşimler ile bağlanmaktadır. Depolama raf sistemlerinde kullanılan kolon ve kirişler, ana taşıyıcı elemanlar oldukları için yapısal güvenlik bakımından büyük bir önem teşkil etmektedir. Çelik depolama raf sistemi elemanları, genel olarak ısıtılma maruz kalmadan sürekli formda şekil verme (roll-forming) yöntemi ile istenilen tasarıma göre üretilmektedir. Kolon ve kirişlerin yapısal davranışı; malzeme et kalınlığı, kolon ağız konfigürasyonları, kiriş-kolon birleşimleri ve kolon kesitinin boşluk yapılarına bağlı olarak soğukta şekillendirme ile üretilmiş diğer yapı elemanlarına kıyasla farklılıklar göstermektedir.

Ürünler, genellikle raf kirişleri üzerine forkliftler tarafından yerleştirilen ahşap veya metal paletler üzerinde depolanmaktadır. Raf sistemlerinde yüke ilk maruz kalan taşıyıcı elemanlar kirişlerdir. Kirişler, üzerine gelen yükleri konnektörler vasıtasıyla kolonlara aktarmaktadır. Kolonlar, maruz kalacakları yükler doğrultusunda istenilen en kesit boyutlarında ve et kalınlıklarında üretilmektedir. Kullanım amacına göre gövde kısmında farklı boşluk yapıları olacak şekilde istenilen boyda üretilmektedir. Söz konusu tasarım değişkenleri, kolonların ve dolayısıyla tüm raf sisteminin taşıma kapasitesini ve stabilitesini etkileyen temel değişkenlerdir (Zeynalian vd. 2018). Konnektörler ise her üretici firmanın kendine göre bir birleşim modeli olduğu için farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Dolayısıyla konnektörün yapısal davranışını belirlemek için deneysel incelemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, öncelikli olarak depolama raf sistemleri için yeni tasarım yaklaşımlarının sunulması amaçlanmıştır. Kolon, kiriş ve konnektöre yönelik muhtelif tasarım değişkenleri belirlenerek deneysel inceleme ve sonlu eleman çözümlemeleri üzerinden doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. Hem deneysel inceleme hem de sayısal çözümleme aşamalarında moment-dönme ilişkileri ve şekil değiştirmeler üzerinden kıyaslamalar sunulmuştur.

Kiriş-kolon birleşimlerinin yapısal davranışı üzerindeki etkilerini tespit etmek üzere, kiriş yüksekliği ve konnektör boyu için farklı değerler üzerinden inceleme yapılmıştır. Kirişin konnektör üzerindeki konumunun da yapısal başarıma etki ettiği öngörüsüyle kirişin yatay ve düşey doğrultuda farklı konumlarda bulunması halinde birleşim davranışındaki değişimler tespit edilmiştir. Kolon kesitleri için ise ağız kısımlarına yerleştirilen bulonların etkinliği araştırılmıştır. Depolama raf sistemi elemanlarından çapraz bağlantılara benzetmek amacıyla kolon ağızlarına muhtelif aralıklarla bulonlar yerleştirilmiş ve gerek kiriş-kolon birleşimleri için ve gerekse eksenel basınç altında ortaya çıkan davranış değişimleri incelenmiştir. Ayrıca kiriş-kolon deneylerinden çıkarılan hasar alan kolon numunelerinin eksenel basınç altında gösterdiği yeni davranış incelenmiştir.

Kiriş-kolon birleşimleri için ise deneysel olarak doğrulanmış bir mekanik model oluşturulması amaçlanmıştır. Bu alandaki geçmiş çalışmalar da incelenmek suretiyle, birleşimlerin azami moment taşıma kapasitesini ve dönme kapasitesini tahmin etmek üzere, muhtelif yapısal ve tasarıma ait değişkenler dikkat alınarak mekanik bir model geliştirilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel sonuçlar kullanılarak modelin tahmin başarısı tespit edilmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Çelik Depolama Raf Sistemleri

Depolama raf sistem elemanlarının yük etkisi altında göstermiş olduğu davranış, malzeme yapılarına ve biçimsel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Sıcak haddeleme ile üretilen standart profillerle karşılaştırıldığında, soğuk şekillendirilmiş çelik profiller tipik olarak aşağıdaki gibi karakterize edilmektedir.

- ✓ Tek eksene göre simetrik veya simetrik olmayan en kesitler,
- ✓ Yüksek genişlik/kalınlık oranları,
- ✓ Güçlendirilmemiş veya kısıtlanmamış bölümler,
- ✓ Açık bölümler için düşük seviyedeki burulma rijitliği,
- ✓ Soğuk şekillendirme sebebiyle daha yüksek seviyedeki artık gerilmeler,
- ✓ Kesitin kalınlığı sebebiyle büyük orandaki geometrik kusurlar.

Soğuk şekillendirilmiş kesitlerin bu özgün özellikleri, piyasada bulunan sıcak haddelenmiş yapısal elemanlarda genellikle karşılaşılmayan davranışsal farklılıklar göstermektedir. Bu nedenle, soğuk şekillendirilmiş kesitlerin tasarımı çok daha karmaşık bir sürece sahiptir. Sonuç olarak, aşağıdaki maddeler tasarım esnasında göz önünde bulundurulmalıdır.

- ✓ Yerel ve çarpılmalı burkulma,
- ✓ Birleşik burulma ve eğilmeli burulma,
- ✓ Geometrik kusurlardan dolayı taşıma kapasitesindeki azalmalar,
- ✓ Değişken artık gerilmeler,
- ✓ Artan yük etkisi altında en kesit üzerinde gerilme ve şekil değiştirmelerin doğrusal olmayan dağılımı.

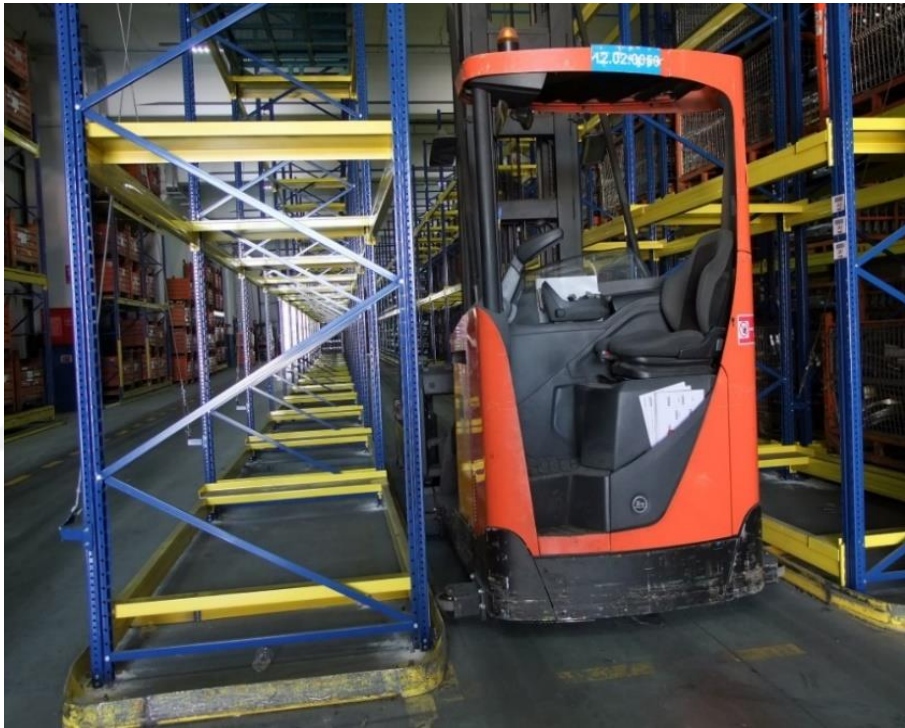
İnce cidarlı soğuk şekillendirilmiş çelik kesitlerin analizi ve tasarımı, bu nedenle diğer yapısal elemanlara kıyasla daha karmaşık bir niteliğe sahiptir. Kesit çözümlemesinin temeli, üretilmiş kesitlerin cidar kalınlıklarının düşük olmasından dolayı burkulma kontrollerine dayanır.

Çelik depolama raf sistem modelleri

Depolama raf sistem modeli ihtiyaçlar doğrultusunda belirlenmekte olup depolanacak yükün miktar ve süresine göre kesit boyutlandırmaları yapılmaktadır. Literatürde ve özel sektörde yaygın olarak kullanılan sekiz temel depolama raf sistem modeli mevcuttur.

Dar koridor raf sistemleri

Depolama alanını azami verimle kullanabilmek için koridorların belirlenen ölçülerde daraltıldığı raf sistemidir (Şekil 4). Palet yükleme ve boşaltma yapacak olan aracın sadece koridor boyunca belirlenmiş yolda (koridor kenarlarına montajı yapılan yönlendirme rayları veya zemin içine döşenen elektronik takip sistemi yardımıyla) hareket edebildiği bir sistemdir.



Şekil 4. Dar koridor raf sistemi (Ata Raf 2019)

İçine girilebilir ve geçişli raf sistemleri

Aynı ölçülere sahip ürünlerin depolanmasında, kullanım alanının önem kazandığı ve ürün çeşitliliğinin fazla olduğu depolarda kullanılan raf sistemidir (Şekil 5). Bu raf sistemi, ürünlerin hasar görmeden depolanmasına ve mevcut ürün miktarlarının kolay takip edilmesine imkân sağlamaktadır. Zemindeki yönlendirmeler sayesinde forklift gibi araçlarla yüklere kolay ve emniyetli bir şekilde erişilebilmektedir. İçine girilebilir ve geçişli raf sistemlerinde her iki koridordan da raf sistemine erişim imkânı bulunmaktadır. Genellikle gıda sektöründe ve soğuk hava depolarında ürün depolamak için tercih edilen bir sistemdir.



Şekil 5. İçine girilebilir ve geçişli raf sistemi (Temesist 2019)

Paletli kayar raf sistemi

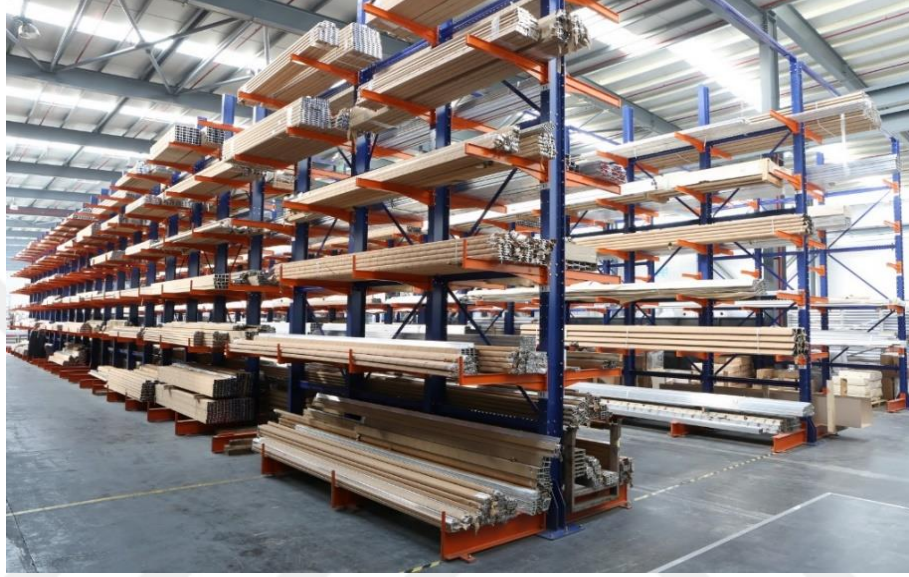
Ürünlerin kısa süreli depolanması için tercih edilen raf sistemidir (Şekil 6). Bu raf sisteminde, döşeme yüzeylerinde hepsinin yönü aynı olacak şekilde makaralı düzlemler bulunmaktadır. Makaralar, paletin yükleme alanından boşaltma alanına yerçekimini kullanarak varmasını sağlamaktadır. Her sırada, hızı kontrol etmek üzere belirli sayıda yerleştirilmiş fren ruloları bulunmaktadır. Paletin güvenli bir şekilde ilerlemesi için makaralarda hareket ve fren sistemi mevcuttur. Paletli kayar raf sistemi temel olarak statik ve dinamik makaralardan oluşmaktadır.



Şekil 6. Paletli kayar raf sistemi (Rafex 1994)

Konsol kollu raf sistemi

Bu raf sistemi, uzun boyda ve yüksek ağırlıktaki boru, profil, ahşap ve sandık gibi ürünlerin depolanmasında kullanılmaktadır (Şekil 7). Raf sistemi, tek ve çift tarafı kollu olmak üzere kullanıma uygun olarak tasarlanmaktadır. Konsol kollu raf sistemleri, bir boyutu diğer iki boyutuna göre daha büyük olan ürünlerin depolanmasında kullanılmaktadır. Konsol kollarının uzunluğu ve taşıyıcı kolon profillerinin arasındaki mesafe yükün ağırlığına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 7. Konsol kollu raf sistemi (Madosan 2019)

Çok katlı raf sistemleri

Bu raf sistemi, depolama alanları, yürüyüş yolları, merdiven ve sahanlıklardan oluşmaktadır (Şekil 8). Raf sisteminin kat sayısı, bina içi mevcut yükseklik sınır şartlarına göre belirlenmektedir. Bu raf sistemi, ürünlerin boyut veya ağırlıklarına göre tasarlanmaktadır.



Şekil 8. Çok katlı raf sistemleri (Madosan Raf Sistemleri 2019)

Sırt sırta raf sistemleri

Paletli malzemelerin depolanması için özellikle ekonomik yönden tercih edilen ve yaygın biçimde kullanılan raf sistemidir (Şekil 9). Sırt sırta raf sistemleri, iki modül arka arkaya gelecek şekilde yerleştirilip aralarına çift taraflı ara bağlantılar konarak oluşturulan raf sistemidir.



Şekil 9. Sırt sırta raf sistemleri (Madosan Raf Sistemleri 2019)

Sırt sırta çift detay raf sistemleri

Farklı boyutlardaki palet, sepet, konteyner ve sandıklar ile istiflenecek çeşitli ürünlerin depolanmasına imkân sağlayan raf sistemidir. Bu raf modeli, geniş kullanım imkânı sağladığı için en çok tercih edilen ve en ekonomik depolama sistemlerinden biridir (Şekil 10).



Şekil 10. Sırt sırta çift detay raf sistemleri (Somçelik 2019)

Sırt sırta 3 ayak raf sistemleri

Sırt sırta depolama raf sistemine benzer şekilde arka arkaya 2 palet derinliğinde yükleme yapılabilen raf sistemleridir (Şekil 11). Bu sayede daha az koridor kullanılarak aynı alanda daha fazla depolama kapasitesi sağlamaktadır. Görüntü olarak çift detay sisteme, çalışma ilkesi yönünden ise sırt sırta depolama raf sistemine benzemektedir. Kolon makas sisteminde ortadaki ayak ortak kullanılarak 4 ayak değil 3 ayak ile istenilen derinliklerde üniteler elde edilmektedir. Bu depolama raf sistemini sırt sırta çift detay depolama raf sisteminden ayıran en temel özellik, orta kısımda bulunan taşıyıcı kolonların sırt sırta 3 ayak depolama raf sisteminde ortak kullanılmasıdır.



Şekil 11. Sırt sırta 3 ayak raf sistemleri (Temesist 2019)

Raf sistemi elemanları

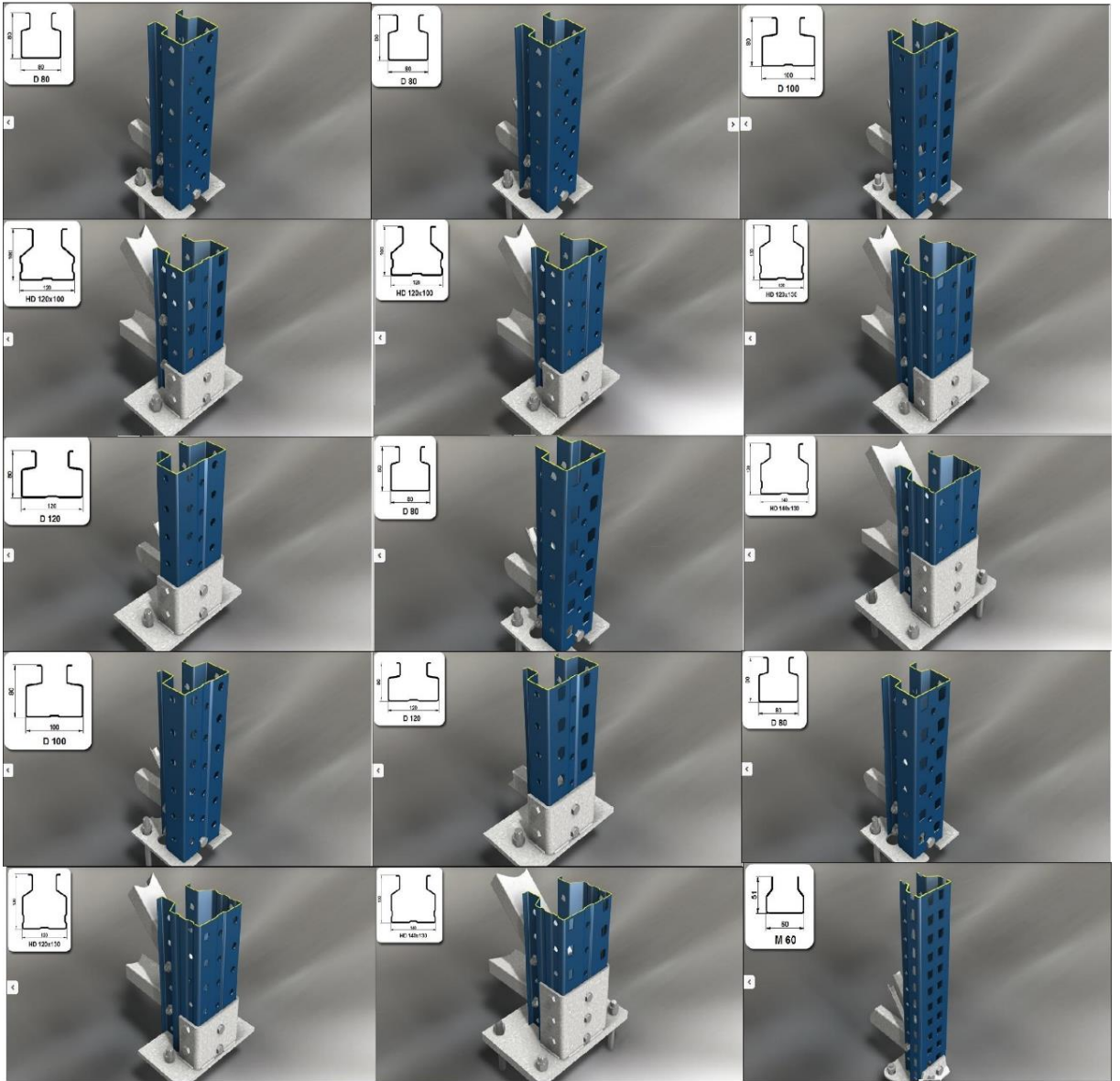
Çelik depolama raf sistemleri, temel olarak beş ana bileşenden oluşmaktadır.

- ✓ Kolonlar
- ✓ Kirişler
- ✓ Konnektörler
- ✓ Stabilité bağlantıları
- ✓ Zemin bağlantı elemanları
- ✓ Ara bağ ve çapraz konsollar

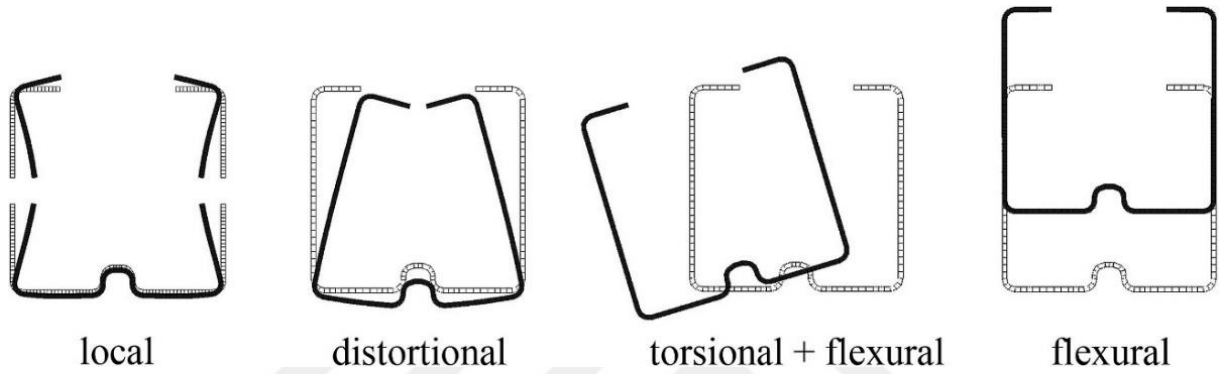
Kolonlar

Depolama raf sistemlerinde kirişlerden gelen yükleri taşıyan düşey eksene sahip yapı elemanlarıdır. Diyagonal çubuk elemanların bulon kullanılarak karşılıklı iki kolon kesiti arasına

birleşimi yapılarak kolon makas sistemi oluşturulmaktadır. Bu makas sistemi, raf sistemlerinin en önemli taşıyıcı sistemlerinden birini oluşturmaktadır. Kolon kesitlerinin sırt ve yan yüzeylerinde bulonlu birleşimler için boşluklar bulunmaktadır (Şekil 12). Kolon kesitinin girinti ve çıkıntıları için uygun konfigürasyonlar tasarlanarak kesitin taşıma kapasitesi artırılabilir (Mangir 2014). Kesitlerdeki boşluklar ayrıca kritik burkulma yükünü ve türünü de etkilemekte olup (Baldassino vd. 2019) bahsedilen boşluk, girinti ve çıkıntılar, yapısal çözümleme sürecini zorlaştırmaktadır (Freitas vd. 2005). Literatürde, Amerika Birleşik Devletleri'nde Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI 2016) şartnamesinin yanı sıra Raf Üreticileri Enstitüsü (RMI 2019) üretici birlikleri tarafından önerilen tasarım yönetmeliklerindeki sınır şartlarına göre raf sistem elemanlarının tasarımı ve yapısal çözümleri gerçekleştirilmektedir.



Kolon kesitleri genel olarak açık kesitli olup tek bir eksene göre simetrik yapıdadırlar. Kolon gövdesindeki boşluklardan dolayı tasarım esnasında kolonlar için birden fazla burkulma türünün dikkate alınması gerekmektedir. Yerel (L), çarpılmalı (D), burulma ve eğilmeli (TF) ve eğilmeli (F) burkulma modları Şekil 13'te gösterilmektedir (Zhang ve Alam 2020). Güçlü eksen etrafındaki eğilmeli burkulma modlarına, kesitler tek eksene göre simetrik oldukları için burulmalı burkulma modu eşlik etmektedir. TF ve F burkulmaları birlikte genellikle genel (G) burkulma olarak adlandırılır. Bu burkulma modları bir kolonda aynı anda veya farklı yükleme noktalarında gerçekleşebilir ve bu yüzden kolonda etkileşimli burkulma modları gözlemlenebilir (örneğin L + D, L + G, D + G ve L + D + G).



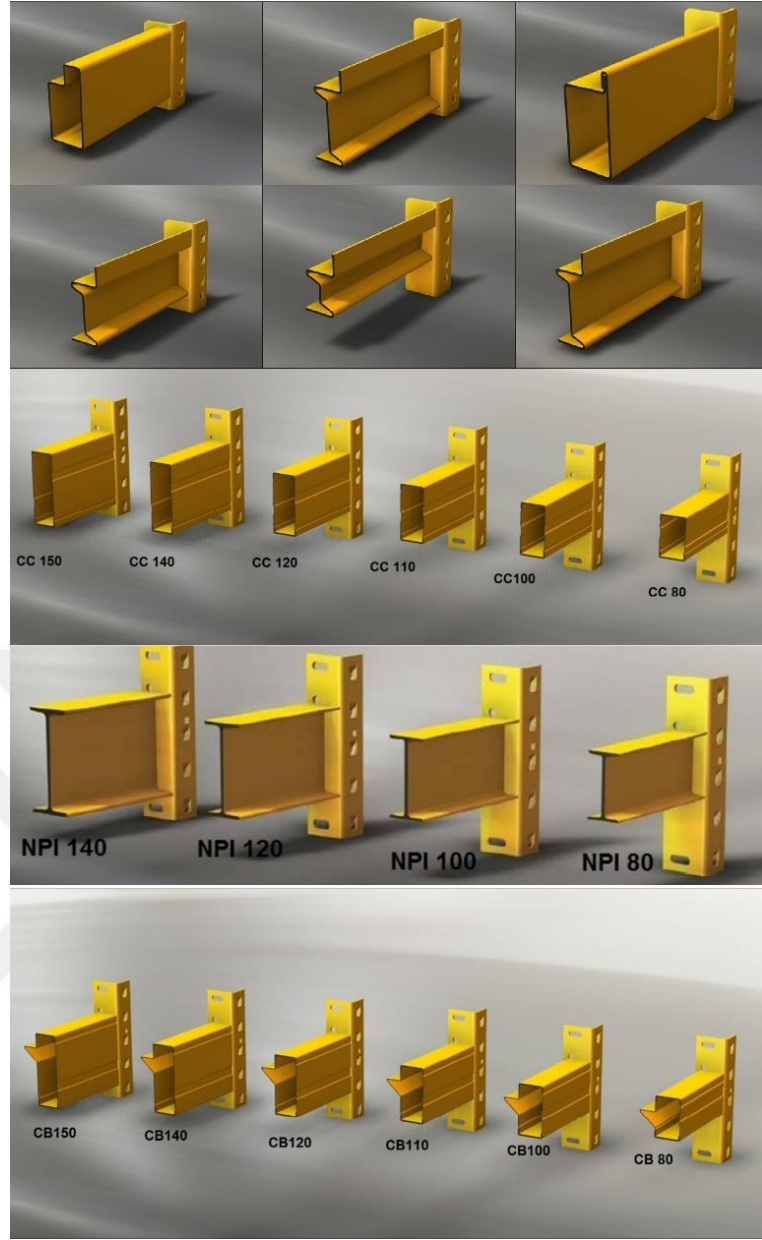
Şekil 13. Farklı burkulma modlarının kesit deformasyonu (Zhang ve Alam 2020)

Kirişler

Depolama raf sistemlerinde yatay taşıyıcı eleman olarak kullanılan kirişler, eksenlerine dik doğrultuda gelen yükleri konnektörler vasıtasıyla kolonlara aktarmaktadır. Kiriş kesiti ve iki uç kısmında bulunan konnektörlerle beraber travers olarak adlandırılmaktadır. Travers kesiti, taşınacak yük miktarına bağlı olarak yapma kesitlerden veya sıcak hadde ürünü olan hazır profillerden seçilmektedir (Şekil 14). Traverslerin üzerine gelecek yükün miktarına bağlı olarak bulonlu ya da tırnaklı birleşim modelleri mevcuttur. Tırnaklı travers modelinde, alttan gelebilecek darbeler neticesinde konnektörün kolon yuvasından çıkma ihtimalini önlemek için emniyet pimleri ile montaj güvenliği sağlanmaktadır.

Konnektörler

Konnektörler, kirişlere gelen düşey yükleri, kolonlara tırnak veya bulonlar aracılığıyla aktaran birleşim elemanlarıdır. Literatürde ve özel sektörde yaygın olarak kullanılan farklı tip konnektörler bulunmaktadır. Bu konnektörlerin detayları Şekil 15'te verilmiştir.



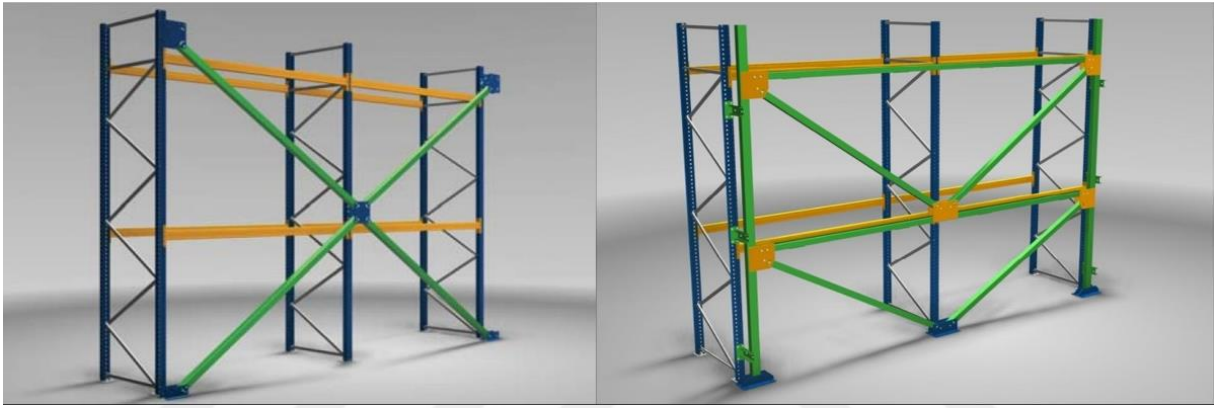
Şekil 14. Travers kesitleri (Rafex 2019)



Şekil 15. Konnektör

Stabilite bağlantıları

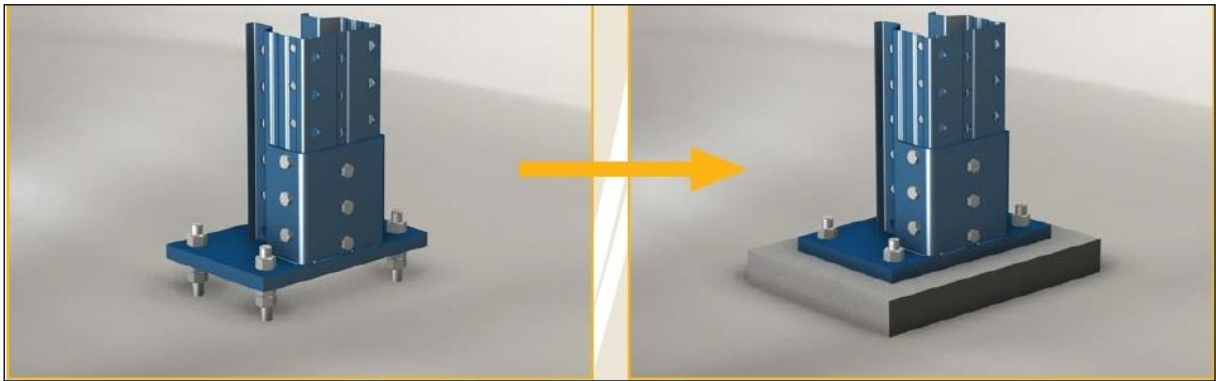
Stabilite elemanları, raf sistemi içerisinde çapraz doğrultularda konumlandırılıp yardımcı aparatlar ile kolonlara birleşimi yapılan, bu sayede yanal yükler sebebiyle ortaya çıkacak yer değiştirmeleri azaltmak için kullanılan yapı elemanlarıdır (Şekil 16). Depolama raf sistemlerinde montaj sürecini kolaylaştırmak için farklı şekillerde konumlandırılan stabilite bağlantıları gerekmektedir. Düşey çaprazlar, ürün giriş ve çıkışını engellememesi için raf sisteminin kullanılmayan cephesinde konumlandırılmaktadır. Yatay çaprazlar ise raf sistemine yatay doğrultuda kararlılık (stabilite) sağlayan yapı elemanlarıdır. Bu stabilite elemanlarının birleşimi ise iki travers arasında çapraz şekilde bulonlar yardımı ile teşkil edilmektedir. Stabilite bağlantılarında genellikle bulonlu birleşimler tercih edilmektedir.



Şekil 16. Stabilite bağlantı türleri (Rafex 2019)

Zemin bağlantı elemanları

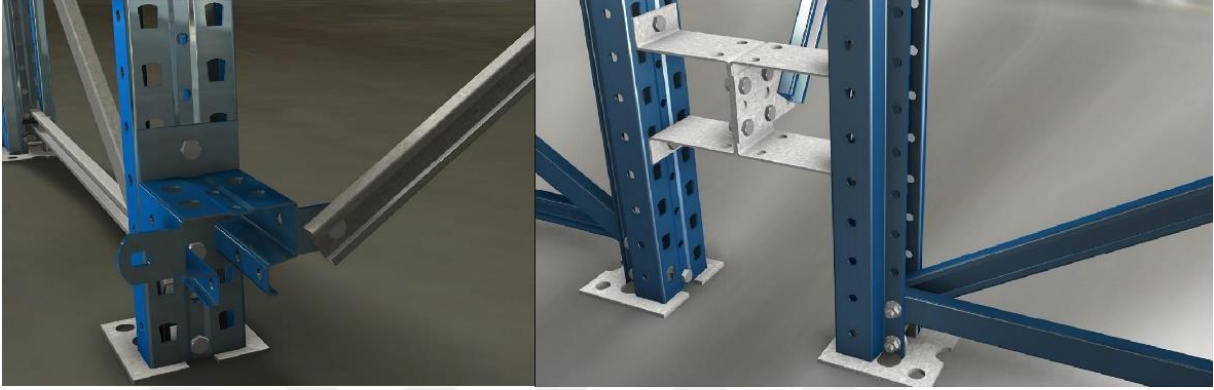
Depolama raf sistemleri için gerekli boyutlandırmalar yapıldıktan sonra nihai olarak kolon-temel bağlantısı için taban bağlantı tasarımı yapılmaktadır (Şekil 17). Literatürde, deneysel olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çalışmalar, zemin bağlantı elemanlarının sistemin genel davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Freitas vd. 2005).



Şekil 17. Zemin bağlantı elemanları (Madosan Raf Sistemleri 2019)

Ara bağ ve çapraz konsollar

Çelik raf sistemleri temel olarak ayrı ayrı çerçeve sistemlerden oluşmaktadır. Bu yapı elemanlarını birbirine bağlamak için ara bağ ve çapraz konsol elemanlar kullanılmaktadır (Şekil 18). Ara bağ elemanlar genellikle kolon makas sistemlerinin bağlantısı için kullanılırken, çapraz konsollar ise hem kolon makas sistemi bağlantıları hem de stabilite bağlantı elemanlarının birleşimi için kullanılmaktadır.



Şekil 18. Ara bağlantı elemanları (Madosan Raf Sistemleri 2019)

Soğuk Şekil Verme

Soğuk şekillendirme yöntemi uygulanan çelik yapı elemanları, ince çelik saclara istenen şekiller verilerek elde edilen profillerin montajı ile üretilmektedir (Koen 2008; Trouncer ve Rasmussen 2016a). Çelik saclara soğuk formda şekil vermenin iki ana yöntemi bulunmaktadır. Soğuk haddeleme işleminde, sac şeridin kademeli olarak 'aşamalar' veya 'geçişler' olarak bilinen ardışık rulo çiftleri aracılığıyla şekillendirilmesi ile nihai kesitler elde edilmektedir. Çelik sacı şekillendirmek için gereken rulo sayısı, hedeflenen şeklin karmaşıklığına, kullanılan sac şeridin kalınlığına ve makinanın gücüne bağlıdır. Soğuk formda şekil verilirken rulo istasyon sayısına özen gösterilmelidir. Ürün üretim hattından çok hızlı bir şekilde çıkarsa uzunlamasına bozulma veya geri yaylanma meydana gelebilir. Şekil verme işlemi tamamlandığında, istenen girinti/çıkıntı bölümleri oluşturmak için kesme veya sürtünme testeresi kullanarak kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Diğer soğuk şekillendirme yöntemlerine kıyasla soğuk formda şekillendirmenin birçok avantajı vardır. Soğuk haddeleme yöntemiyle kesitler düşük hata toleransı ile üretilmektedir. Ayrıca, soğuk haddeleme, diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek üretim kapasitesine sahip olup üretim hızları 100 m/dakikaya kadar ulaşmaktadır.

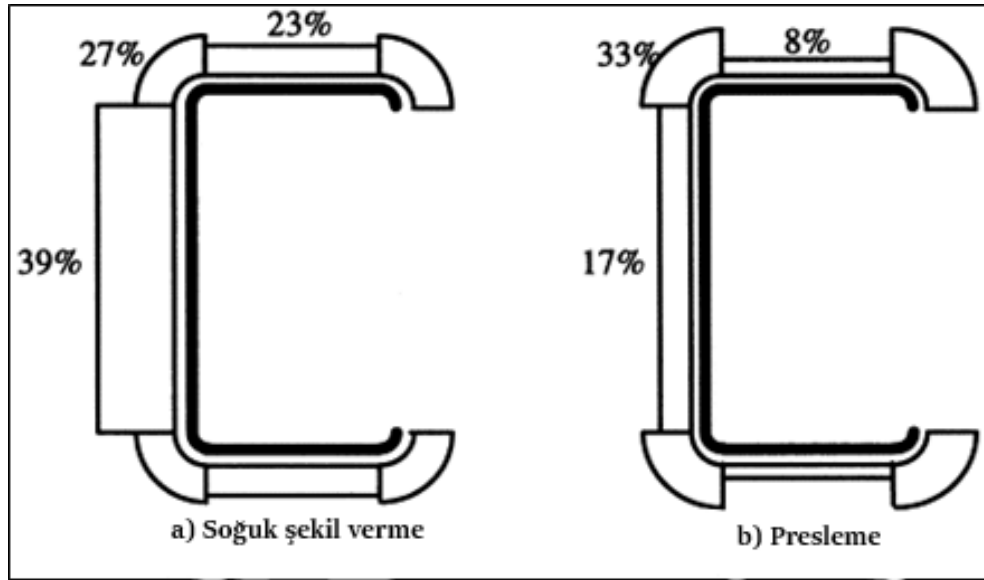
Diğer yöntem olan abkant presleme yönteminde ise pres makinasında biri hareketli diğeri sabit olan iki adet kiriş bulunmaktadır. Bu kirişlerin uç kısımlarında malzemeye şeklini verecek olan ve belirli sınır koşulları olan kalıplar yerleştirilmektedir (Şekil 19). Verilmek istenen şeklin

kalıbı kirişlerin ağız kısmına yerleştirildikten sonra hareketli kiriş, sabit kirişe doğru hareket ettirilmekte ve uygulanan kuvvet sonucunda çelik sac iki kiriş arasındaki kalıbın şeklini almaktadır. Son yıllarda, tasarım ofislerinde bilgisayar kontrollü olarak karmaşık kesitler hata payı düşük olacak şekilde üretilmektedir (Trouncker ve Rasmussen, 2016a). Bu gelişmiş yöntem sayesinde haddeleme anında kesitlerin otomatik olarak şekillenmesi mümkün olmaktadır.

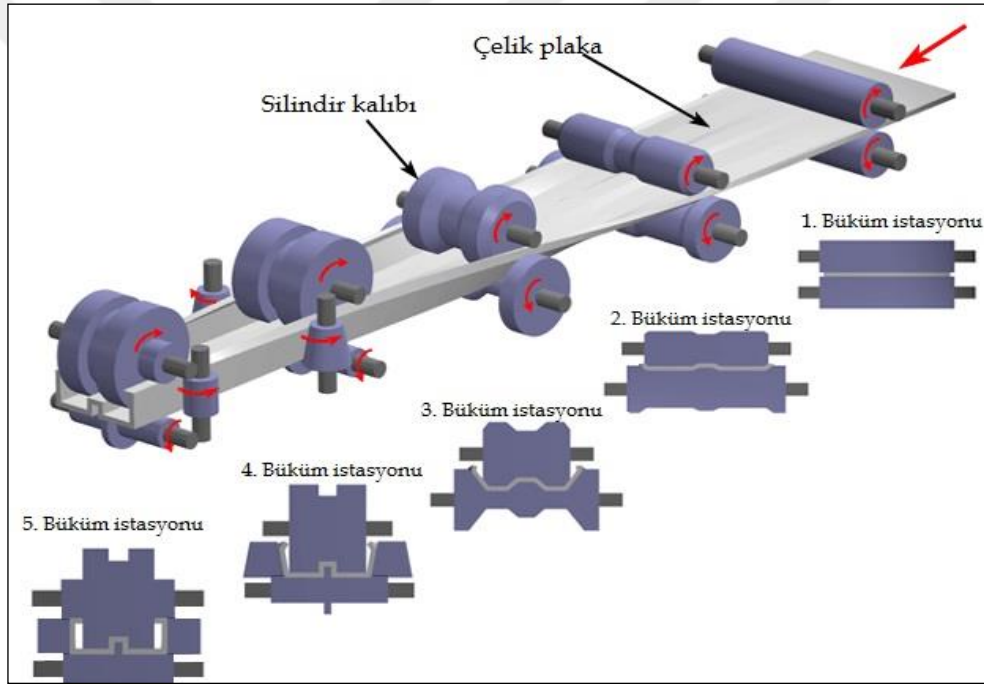


Şekil 19. Abkant pres bükümü (Yazıcı 2018)

Gerçekleştirilen deneysel incelemeler sonucunda, soğuk formda şekillendirme sürecinde malzemenin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Isıl işleme maruz bırakılmadan malzemede meydana gelen bu değişiklikler, özellikle malzemenin köşe bölgelerinde artık gerilmelere sebep olmaktadır. Bunun en önemli sebebi ise malzemenin köşe bölgelerinin düz bölgelerine kıyasla daha çok plastik şekil değiştirmeye maruz kalmasıdır. Kesitlerin mekanik özelliklerindeki bu değişimlerin temel sebeplerinden biri, verilmek istenen şeklin tek seferlik bir işlem sonucunda elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Malzeme üzerine herhangi bir dış yük uygulanıp kaldırıldıktan sonra, bu elemanın üzerinde kalan gerilme dağılımı olarak adlandırılan ve malzemedeki elastik geri toparlanma çabasının mevcut plastik şekil değiştirme tarafından tutulması sonucu ortaya çıkan artık gerilmeler, ince cidarlı çelik profillerde büyük bir öneme sahiptir. Malzeme herhangi bir dış yüke maruz kalmamış hali ile karşılaştırıldığında, Şekil 21’de görüleceği gibi sürekli formda soğuk şekillendirme işlemi uygulanmış malzemede, özellikle köşe büküm bölgelerinde oluşan artık gerilmeler, bu bölgelerin akma dayanımında bir artış sağlarken, abkant presle tek seferde şekillendirmede daha önemsiz değişimler gözlenmiştir (Schafer ve Peköz 1998b). Soğuk şekillendirilmiş bir profil için Şekil 20.a’da soğuk şekil verme, Şekil 20.b’de ise preste şekil verilme ile üretilmiş kesitlerin akma dayanımına kıyasla artık gerilme değerleri verilmiştir.



Şekil 20. Soğuk şekillendirilmiş profillerin artık gerilmeleri (Schafer ve Peköz 1998a)



Şekil 21. Soğuk şekil verme işleminin aşamaları (Yazıcı 2018)

Soğuk şekillendirilmiş ince cidarlı elemanların tasarımı için kararlılık (stabilite) büyük bir önem teşkil etmektedir. İnce cidarlı elemanlar için, tipik olarak aksenal basınç durumunda üç kararlılık modu göz önünde bulundurulmalıdır. Burkulma modlarının herhangi biri veya kombinasyonu, elemanın narınlığına bağlı olarak göçme modunda baskın rol oynamaktadır. Rijit narin kolonlar için burkulma modları aşağıda açıklanmıştır.

- **Yerel burkulma:** Elemanların sadece bir bölgesi dâhilindeki doğrusallığını kaybederek burkulmasına denir. Diğer kısımları için elemanlar arasındaki kırım yerlerindeki çizginin düz kaldığı ve elemanlar arasındaki açıların değişmediği burkulma tipidir. Çarpık burkulmanın aksine, elemanın uzunluğu boyunca burkulma meydana gelmez.

- **Çarpılmalı burkulma:** Yerel burkulma hariç, kesit şeklindeki değişimi kapsayan bir burkulma modudur. Soğuk şekil verme işlemi, bir veya daha fazla kesit bölümüne uygulandığı için kesitin belirli bir bölgesinde veya düzlem içi kesitin gövde ve başlık kısımlarında olduğu gibi, tüm elemanda düzlem dışı burkulma meydana gelmektedir. Çarpılmalı burkulma, berkitme burkulması veya yerel burulma burkulması olarak da adlandırılmaktadır.

- **Genel burkulma:** Yerel ve çarpılmalı burkulma durumlarının meydana gelmediği durumlarda genel burkulma meydana gelmektedir. Elemanın düzlem dışı burkulması ve kesitin kayma merkezi etrafında eşzamanlı bir burulma şeklinde meydana gelmektedir. Bu burkulma tipi, yerel düzlem dışı burkulma etkileşimi olmadan da ortaya çıkabilmektedir.

Geçmiş Çalışmalar

Ürün çeşitliğinin artmasıyla ortaya çıkan depolama ihtiyacı gün geçtikçe büyük bir problem haline gelmiştir. Bunun sonucu olarak depolama raf sistemlerinin önemi ve kullanımı artmıştır. Son yıllarda yapılmış olan çalışmaların çoğunda aşağıdaki konularda incelemeler yapılmıştır.

- ✓ Kiriş kolon birleşim davranışı ve mekanik modeller,
- ✓ Kolon kesitlerinin burkulma davranışı,
- ✓ Gerçek ölçekli çerçeve deneyleri.

Çelik depolama raf sistemlerinde, çerçeve sistemin karmaşık hale gelmesinin en büyük nedenlerinden biri birleşim yapılarıdır. Literatürde soğuk şekil verilme ile üretilmiş çelik yapıların birleşimleri üzerine yapılmış deneysel ve sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Birleşim tipi olarak bulonlu, pimli birleşimler ve yaygın olarak da tırnaklı birleşimler kullanılmaktadır. Konnektör yapısında bulunan tırnaklar vasıtası ile kolon gövdesine yerleştirilerek yarı rijit kiriş-kolon birleşimleri teşkil edilmektedir. Yarı rijit birleşimler, çerçeve sistem davranışını doğrudan etkilediği için literatürde bu konu üzerine birçok deneysel inceleme, sonlu elemanlar tabanlı sayısal çözümleme ve mekanik model esaslı çalışmalar bulunmaktadır.

Deneysel çalışmalar

Çelik depolama raf sistemleri, ürünlerin depolanmasında hayati bir rol oynamakta olup tasarım yöntemleri gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Çelik depolama raf sistemlerinin kullanımı ve taşınan malların değeri arttıkça yapısal dayanım ve stabilite daha da önemli hale gelmektedir. Raf sistemi kolonları, soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) kolonların özel bir türü olarak kabul edilmektedir. Kolon kesitlerinin et kalınlığı, dudak konfigürasyonları ve gövdelerindeki boşlukların varlığından dolayı CFS kolonlarının genel davranışlarından

farklıdır. Kolon kesitlerindeki boşluk yapısı ve kesit boyutlarının değişmesi, tüm raf sisteminin taşıma kapasitesini ve güvenilirliğini etkilemektedir. Çelik depolama raf sistemi kolonlarının yapısal kapasitesinin belirlenmesi birkaç standart ve yönetmelikle düzenlenmiştir. Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü S100-2007 Standart, soğuk şekillendirilmiş çelik kolonların gücünü belirlemek için hesaplama yöntemini düzenlemek için kullanılan standartlardan biri olup hesaplamalar için Etkin Genişlik Yöntemi ve Doğrudan Dayanım Yöntemi (DSM) kullanılmaktadır.

Bernuzzi ve Castiglioni (2001) yapmış oldukları çalışmada, çelik depolama raf sistemlerinin statik yüklemeleri için yeni tasarım kuralları geliştirmiştir. Önerilen yaklaşımlar dâhilinde, rafların ana bileşenlerinin yapısal davranışını ve başarımını düzenleyen esas parametreleri değerlendirmek için tekil yükleme deneyleri yapılmıştır. Sismik bölgelerdeki rafların kullanım durumu için son zamanlarda yeterince araştırma yapılmamıştır. Raf Üretim Enstitüsü (RMI) tarafından geliştirilen Teknik Özellikler pratik tasarım kuralları sağlarken, yapıların deprem dayanımı için Avrupa standartlarında herhangi bir çalışma mevcut değildir. Kiriş-kolon birleşim davranışını araştırmak için deneysel inceleme ve sonlu elemanlar çözümlemesinden oluşan bir çalışma yürütülmüştür. Deneylerin temel özellikleri tartışılmış ve çevrimsel yükleme altında birleşimin moment-dönme eğrisini ve birleşimin dönme rijitliğini karakterize eden temel parametreler belirlenmiştir.

Abdel-Jaber vd. (2006) yapmış oldukları çalışmada, yükleme esnasında kirişin serbest ucunun dönerek burulmaya sebep olmasını önlemek için kiriş ucunu düşey olarak konumlandırılmış iki rijit profil ile sınırlandırılmıştır. İki deplasman ölçer düşey doğrultuda konnektördeki deplasmanları almak için kiriş üzerine monte edilmiştir. Diğer iki deplasman ölçer ise yatay doğrultuda yer değiştirmeleri ölçmek için konnektöre bağlı bir plâka üzerine monte edilmiştir. Hesaplamalarda her bir deplasman ölçer çiftinin ortalama okuması dikkate alınmıştır. Her deney numunesinde tekil yükleme artırımlı olarak uygulanmıştır. Yük önce 2 kN'a kadar artırılmış, sonra sıfır değerine geri getirilmiştir. Bu işlem konnektör gevşekliği ile ilgili sorunları önlemek için yapılmıştır. Birleşimin davranışını en iyi karakterize eden verinin moment-dönme davranışı olduğu bilinmektedir. Aynı yazarların diğer bir çalışmasında ise (Abdel-Jaber vd. 2005) uygulanan yük ve deplasman ölçerlerden alınan veriler doğrultusunda moment-dönme eğrileri oluşturulmuştur. Bu veriler doğrultusunda birleşimin dönme rijitliği belirlenmiş, dönme rijitlik değerlerinden yola çıkarak çerçeve sistemlerin salınım hareketleri için kuramsal bir model önerilmiştir.

Gilbert ve Rasmussen (2010) tarafından, çelik çerçeve sisteminde bulonlu birleşimlerin moment-dönme davranışı için doğrusal olmayan sonuçlar sunulmuştur. Sonlu elemanlar

öz mlmesi sonuçlarına dayanarak, içerisine girilebilen raflar için bulonlu birleşimlerde sünekliğin nihai tasarımıda göz ardı edilebileceği  ne sürülmüştür. Bu çalışmada, depolama raf sistemindeki kiriş dönme rijitliğini ve soğuk şekillendirilmiş elik elemanlar arasındaki bulonlu birleşimlerin özelliklerini belirlemek için kiriş-kolon birleşimleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, bulonlu birleşimlerde başlangıç dönme rijitliğinin ardından büyük yer değiştirmeler gözlemlenmiştir.

Prabha vd. (2010), gerçekleştirdikleri kiriş-kolon birleşim deneyleri kapsamında geçmeli şekilde olan üç tırnaklı konnektörler ile bulonlu ve yarı rijit olan kiriş-kolon birleşim modelini dikkate almışlardır. Genel kabul gören bir analitik model geliştirmeyi imk nsız kılan, farklı en kesit geometrisi ve farklı konnektör geometrileri literatürde mevcuttur. Bu farklılık, geometrik detaylardan dolayı kabul görmüş bir mekanik model üretmeyi zorlaştırmaktadır. Bazı tipik konnektörler için bağlantıların performansını değerlendirmek için literatürde az sayıda kuramsal model bulunmaktadır. Her farklı tipteki konnektörün davranışını tahmin etmek için deneysel incelemeye ve sonlu elemanlar  z mlmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Kiriş-kolon birleşimlerinde, kolon et kalınlığı ile konnektör ve kiriş derinliği gibi önemli parametreler değiştirilerek on sekiz deney yapılmıştır. Deneysel davranışı simüle eden bir sonlu elemanlar modeli, ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Üç ana değişken kullanılarak Frye Morris tipi bir denklem önerilmiştir. Nihai moment kapasitesi, birleşimin dönme rijitliği ve elde edilen şekil parametreleri üzerinden, tırnaklı birleşimlerin moment-dönme davranışını temsil eden üç parametrelili bir model de önerilmiştir. Parametrik çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda tırnak sayısının arttırılması, konnektör rijitliğini ve moment taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir.

Crisan vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan kolonlar, eksenli boyunca dairesel boşluk dizileri içeren ince cidarlı soğuk şekillendirilmiş elik profillerden oluşmaktadır. Bu boşluk yapıları, paletlerin yüksekliklerinin kolay bir biçimde ayarlanmasını ve hızlı montaj imk nını sağlamaktadır. Konnektörde bulunan tırnak sayesinde kiriş-kolon montajı yapılmaktadır. EN 15512'ye göre kolon kesitlerine burkulma testleri uygulanarak taşıma kapasiteleri ve kiriş-kolon birleşimlerin dönme rijitliği deneysel olarak belirlenmiştir.

Zhao vd. (2014) farklı yapısal detaylara sahip on yedi kiriş-kolon birleşim deneyi gerçekleştirmiştir. Farklı kolon kesitleri, et kalınlığı, kiriş boyutu ve konnektör tırnak sayısı gibi parametreler değiştirilerek incelemeler yapılmıştır. Her bir birleşim tipi çevrimsel ve statik yüklemeye tabi tutulmuştur. Yapılan bu çalışma sonucunda, birleşimlerin deformasyon gelişiminin göçmeden önce benzer olduğunu gösterirken, göçme modlarının kolon ve konnektör arasındaki göreli kalınlığa bağlı olduğu belirtilmiştir. Moment-dönme eğrilerine

dayanarak başlangıç dönme rijitliği, moment taşıma kapasitesi ve azami dönme değeri belirlenmiştir.

Mangir (2014) yapmış olduğu çalışmada, AISI S100-700 standardına göre kolon kesitinde bulunan boşlukların, kolonun taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Üç farklı boya sahip hem boşluklu hem de boşluksuz kolonların taşıma kapasite değerleri karşılaştırılmıştır. Boşluk yapılarının kolon taşıma kapasitesi üzerine etkisi detaylı olarak incelenmiş, boşlukların kritik burkulma yükünü azalttığı ve burkulma türünde değişime sebep olduğu görülmüştür.

Trouncer ve Rasmussen (2014) tarafından ultra hafif çelik depolama raf kolonlarının aksel basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Değişken uzunluklarda ve iki farklı tipte kolon kesiti deneysel olarak incelenmiştir. Tüm deney numunelerinde deformasyonlar ölçülmüş ve göçme modlarına ait sayısal veriler kaydedilmiştir. Kolon et kalınlığı ve en kesit boyutlarının kolonun taşıma kapasitesini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir.

Bernuzzi ve Maxenti (2015) yapmış oldukları çalışmada, depolama raf kolonlarının aksel yük etkisi altındaki burkulma mekanizmaları deneysel olarak incelenmiş; kesitlerin rijitliği, sünekliği ve kritik burkulma yükü değerleri hesaplanmıştır. Sonlu eleman çözümleri sonucunda mevcut yönetmeliklerin güncellenmesi gerektiğini görülmüştür ki, bu da muhtelif durumlarda kiriş-kolon birleşimlerinin güvenli olmayacak şekilde tasarlanmasına sebep olmaktadır.

Mohan vd. (2015) tarafından, birleşim tipi çeşitliliğinden dolayı birleşim elemanının dönme rijitliği ve moment taşıma kapasitesini analitik olarak tahmin edebilecek bir model geliştirmenin zor olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada, tek konsol test düzeneği benimsenerek ticari olarak temin edilebilen numuneler ile kiriş-kolon birleşim deneyleri yapılmıştır. Birleşim rijitliğini incelemek için kolon et kalınlığı, kiriş derinliği ve konnektördeki tırnak sayısındaki değişime göre otuz beş deney numunesi üzerinde çalışılmış, her bir deney üç tekrarlı olacak şekilde toplam 105 deney yapılmıştır. Söz konusu parametrelerin moment-dönme davranışı ve birleşimin dönme rijitliği üzerindeki etkisini anlamak için tam kapsamlı parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Yin vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı birleşimlerin taşıma kapasitesi ve enerji sönümleme kapasitesi deneysel olarak incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan tırnaklı bağlantı, yüksek şekil değiştirme ve düşük enerji yutma kapasitesine sahiptir. Tekdüze ve çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen kiriş-kolon birleşim deneylerinde, bulon ve kaynakların, birleşimin taşıma kapasitesini ve deformasyon seviyesini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. İlk dönme rijitliği değerinde düşük seviyede değişiklik olduğu

görülürken hem pozitif yükleme hem de negatif yükleme için rijitlik değeri de değişiklik gözlenmemiştir.

Bernuzzi vd. (2016) tarafından iki eksenli simetrik kiriş elemanların davranışını ortaya koyabilen bir sonlu elemanlar modeli sunulmuştur. Kiriş en kesitlerinin simetrik olmamasının tasarım kodlarına göre analiz yapıldığında yol açtığı hatalar sebebiyle endüstriyel depolama raf sistemlerinde yatay elemanların tasarımı için hem paletler için hem de sürülebilir raflar için tasarım kodlarının acilen iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Shah vd. (2016) kiriş-kolon birleşimlerinde konnektörlerin yapısal performansını incelemiştir. Üç farklı kalınlık ve iki farklı tipteki konnektörler deneysel olarak incelenmiştir. Deney yöntemi olarak çift konsollu test yöntemi seçilmiş, konnektör kalınlığı ve tırnak sayısı üzerinden kiriş-kolon birleşimlerinin göçme modları ve moment-dönme eğrileri çıkartılarak birleşim davranışı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçları teyit etmek için doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir.

Zhao vd. (2018) tarafından, bulonlu kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükleme altındaki yapısal başarımını tespit etmek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Kolon tasarımı, kolon kesit kalınlığı, kiriş yüksekliği ve konnektör tırnak sayılarının değiştirilmesiyle oluşturulan on altı deney çevrimsel yükleme altında yapılmıştır. Göçme modları, dönme rijitliği, moment kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitesi verileri elde edilmiştir. Bu çalışma, kiriş-kolon birleşimleri için Doğrudan Tasarım Yönteminin geliştirilmesi için temel oluşturmuştur.

Gusella vd. (2018) tarafından, raf birleşimlerinin eğilme direncini ve başlangıç dönme rijitliğini değerlendirmek amacıyla Bileşen Yöntemi'nin (CM) uygulanmasına dayanan mekanik bir model önerilmiştir. Aynı firma tarafından üretilen farklı kesitlere ait, birkaç tam ölçekli birleşimler üzerinde yürütülen deneysel inceleme ile mekanik modelden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Önerilen mekanik model, birleşimin başlangıçtaki dönme rijitliğini ve raf bağlantılarının nihai eğilme momentini etkileyen ana bileşenleri belirlemede başarılı olmuştur. Söz konusu modelin sınırlı sayıda yapısal ve geometrik veri ile uygulanabilmesi sebebiyle diğer birleşim türlerinde de kullanılmak üzere kolayca değiştirilebileceği belirtilmiştir.

Shariati vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, konsol test yöntemini kullanılarak tekdüze ve çevrimsel yüklemeler altında kiriş-kolon birleşimlerinin yapısal davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda baskın göçme modu ve birleşimlerin moment-dönme eğrileri sunulmuş, kolon et kalınlığının göçme modunu doğrudan etkilediği ortaya

konmuştur. Birleşimin dönme rijitlik değeri, moment direnci, süneklik ve bağlantının göçme modu araştırıldıktan sonra, konnektöre ilave bir bulon ile yenilikçi bir tasarım önerilmiştir.

Gusella vd. (2018) tarafından, konnektörün farklı kaynak düzenleri üzerinden dört farklı birleşim modeli, tekdüze ve çevrimsel yüklemeler altında deneye tabi tutulmuştur. Ayrıca birleşimlerde tırnaklar sayısı, kolon ve konnektörün et kalınlığı bakımından farklılıklar dikkate alınmıştır. Çevrimsel yüklemelerden elde edilen sonuçlar, birleşimlerin moment-dönme eğrilerinin doğru bir şekilde tanımlanmasına imkân tanıyarak geleneksel çelik çerçeve yapılardan önemli ölçüde farklı olduklarını göstermiştir. Çelik raf sistemi üreticileri, konnektörlerin toplam kaynak uzunluğu, zaman verimliliği ve maliyet azaltılmasıyla ilgilendiğinden, konnektörlerin kaynak düzeninin yapısal davranış ve göçme modu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Dai vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, kiriş kolon birleşimlerinde konnektöre bulon eklenerek deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Deneysel değişken olarak üç farklı kesit, üç farklı kolon kalınlığı, iki ve üç tırnaklı konnektör tipleri ele alınmıştır. Deney yöntemi olarak tek konsol test düzeneği belirlenmiş ve tekdüze yükleme altında deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada birleşimlerin deformasyon ilerlemesini, göçme modlarını, dönme rijitliklerini, moment direnci incelenmiştir. Sonuç olarak, birleşimler "yarı rijit" ve "kısmi dayanımlı" birleşim olarak sınıflandırılan bulonlu bağlantıların genellikle sünek göçme modları sergilediğini göstermiştir. Kritik geometrik değişkenlerin, yani kolon et kalınlığı, kiriş yüksekliğin ve tırnak sayısının bulonlu bağlantıların eğilme davranışı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Ayrıca, bulonlu ve tırnaklı birleşimler arasında yapısal başarımlar ve göçme modları kıyaslaması da sunulmuştur.

Sayısal çözümleme çalışmaları

Freitas vd. (2005) tarafından sunulan çalışmada raf sistemlerinin kolon tasarımlarında montajını kolaylaştıran boşluk yapıları incelenmiştir. Bu boşluk yapıları, montajı kolaylaştırırken diğer taraftan çerçeve sistemin tasarım kodları ile çözümlemelerinin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde AISI şartnamesinin yanı sıra RMI yönergelerine göre üretici birlikleri tarafından uyulması gereken tasarım yönetmelikleri mevcuttur. Bu yönetmelikler, raf elemanlarına gelen yüklere karşı göstermiş oldukları dirençlerinin belirlenmesi için deneysel olarak kolon burkulma testlerinin yapılmasını önermektedir. Bu çalışmada, ANSYS 18.1 yazılımı ile malzeme ve geometrik boyutları doğrusal olmayan malzemeler seçilmiş ve çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir. Brezilya'da üretilen rafların aksenal basınç deney sonuçları sonlu elemanlar çözümlemesi sonuçları ile karşılaştırıldığında birbirini doğruladığı görülmüştür.

Bonada vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın temel amacı, eğilme momentinin eksenel yüke maruz kalan raf kolonlarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini belirlemektir. Eğilme etkisi ve kesitlerin soğuk şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan artık gerilmelerin göz önüne alındığı sonlu elemanlar çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçları doğrulamak için deneysel inceleme de yapılmıştır. Nihai yük aynı zamanda Avrupa Standartları'na göre hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kumar ve Jayachandran (2016) tarafından sunulan çalışmaya göre, depolama raf sistemlerindeki kolonlar çoğunlukla eksenel basınç ve eğilme momentine maruz kalmaktadır. Ancak sayısal çözümleme tabanlı tasarım yenilikçi nitelikte olup daha düşük maliyet gerektirmektedir. Tasarım aşamasındaki en büyük zorluklar, kesitlerde boşluk yapısı, etkileşimli burkulma ve kombine yüklemelerdir. Kolonların taşıma kapasitesini belirlemek için doğrudan dayanım yöntemi kullanılmasına rağmen, analitik denklemleri doğrulayan deneysel bulguların yetersiz olduğu belirtilmiştir. Doğrudan dayanım yönteminin göz ardı edildiği eksenel basınç deneylerinde eğilme modunun genel modlarla etkileşimi bariz biçimde görülmüştür.

Pala ve Şenaysoy (2017), depolama raf sistemlerinde kullanılan açık kesitli ve delikli soğuk şekillendirilmiş kolonların burkulma davranışının incelenmesi ve iyileştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kolonların burkulma yükü kapasiteleri, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı CUFSM yazılımı kullanılarak doğrudan dayanım yöntemine göre belirlenmiştir. İlk olarak üretimi devam eden orijinal kesite burkulma deneyi uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlarla doğrudan dayanım yönteminden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Daha sonra orijinal kesitten yola çıkılarak iki farklı kolon kesitinin tasarımı yapılmıştır. Diğer grup ise kolon kesitinin sırt bölgesinde bulunan güçlendiricinin farklı derinliğe sahip olması durumunda incelenmiştir. Yeni kolon kesitlerinin burkulma yükü değerleri de farklı boylar için doğrudan dayanım yöntemiyle belirlenmiştir. Sonuçlardan hareketle en yüksek kritik burkulma yükünü veren kolon kesiti tespit edilmiştir.

Zhang ve Alam (2017) tarafından, Kuzey Amerika standardına göre raf kolonlarının kapasitesini belirlemek için deneysel sonuçların daha güvenilir olduğu belirtilmiştir. Çelik sac malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışını açıklamak için genişletilmiş Ramberg-Osgood modeli önerilmiştir. Model, kolonun eksenel basınç taşıma kapasitesini başarılı bir şekilde simüle etmektedir. Doğrusal olmayan sonlu eleman çözümleri ANSYS 18.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve geliştirilen modelin doğru olduğu öne sürülmüştür.

Neiva vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada, soğuk şekillendirme yöntemi ile üretilen kolon kesitlerine aksenal basınç deneyleri uygulanmış ve sonlu elemanlar modeli üzerinden sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, malzeme ve geometrisi doğrusal olmayan sayısal bir model ile doğrulanmıştır. Sayısal çözümleme sonuçları, doğrudan dayanım yöntemi tahminleriyle karşılaştırıldığında, doğrudan dayanım yöntemi denklemlerinin bu tip boşluk yapısı bulunan kolonların göçme yükünü tahmin etmede doğru sonuçlar vermediği görülmüştür. Bu nedenle, incelenen modellerin taşıma kapasitesini tahmin edebilmek için doğrudan dayanım yöntemi göçme modu eğrisinin parametrelerinde değişiklikler önerilmiştir.

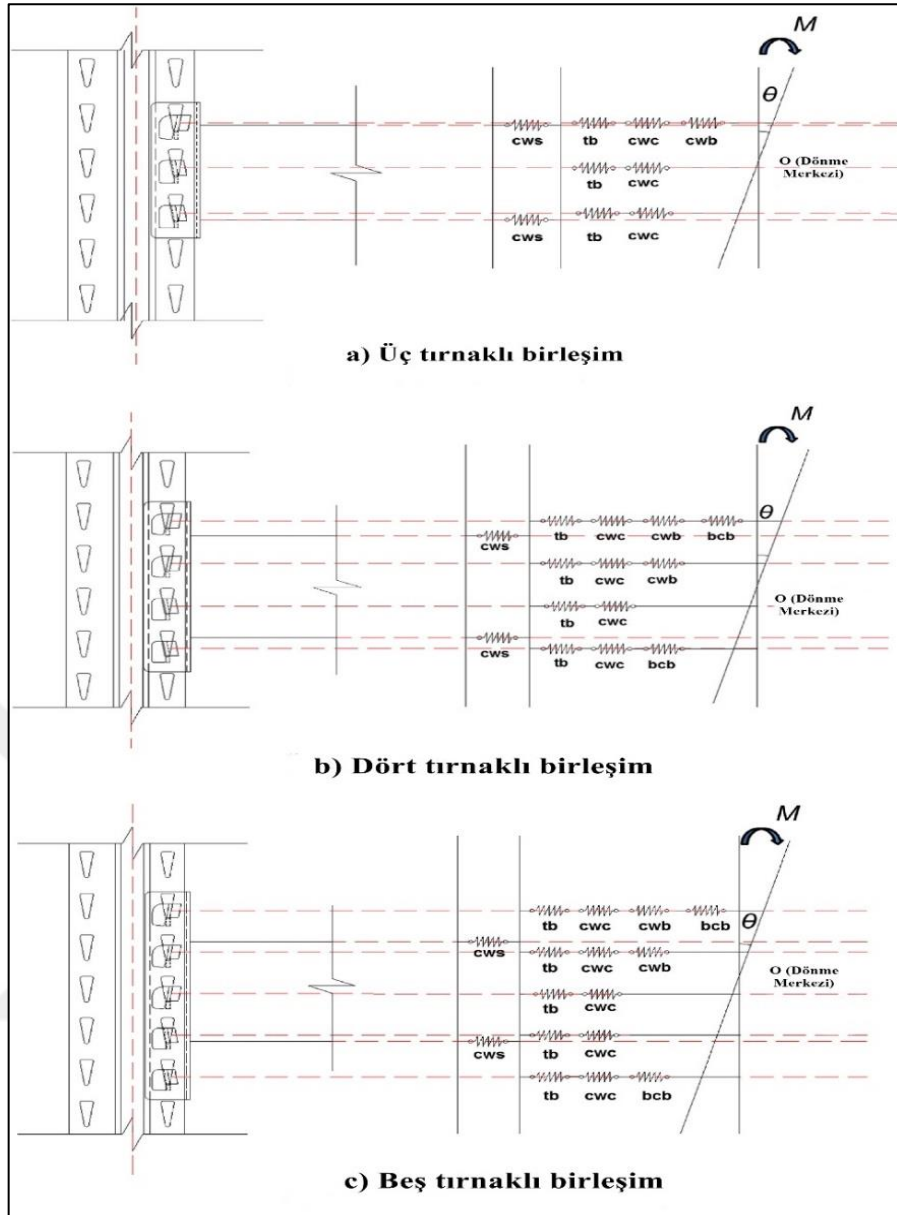
Mekanik model çalışmaları

Kiriş kolon birleşimlerinin dönme rijitlik değerlerinin belirlenebilmesi için literatürde mevcut olan ve yaygın olarak kullanılan iki mekanik model mevcuttur (Zhao vd. 2017; Ślęczka ve Kozłowski 2007).

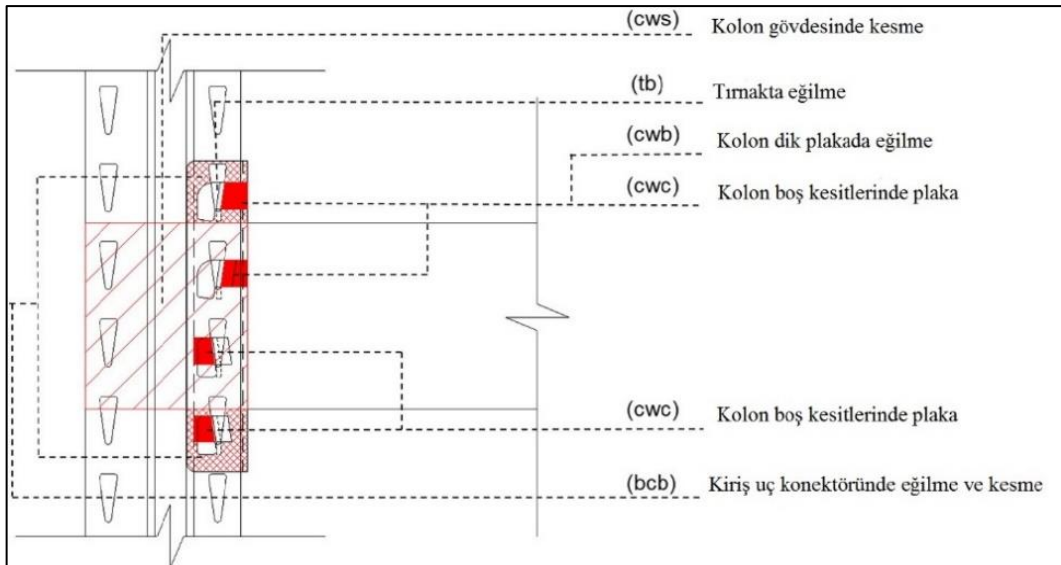
Zhao vd. (2017) tarafından, depolama raf sistemlerinde giriş-kolon birleşimlerinin başlangıç dönme rijitliğini tahmin etmek için bileşen metodunu temel alan bir mekanik model sunulmuştur. Mekanik model, deneysel veriler ile doğrulanmış ve sonuçlar, mekanik modelden elde edilen başlangıç dönme rijitliği değerleri ile tatmin edici bir şekilde uyum göstermiştir. Son olarak, önerilen mekanik modele dayanarak, birleşimlerin başlangıçtaki dönme rijitliğini etkileyen temel bileşenler bu çalışmada incelenmiştir. Şekil 22'de basitleştirilmiş olarak sunulan mekanik model, Zhao vd. (2017) tarafından aşağıdaki varsayımlara dayanarak geliştirilmiştir:

- 1) Kolonda aksenal yüklerden kaynaklanan gerilme nispeten küçüktür ve göz ardı edilmiştir.
- 2) Bileşenlerin malzemeleri, elastik malzeme olarak kabul edilmiştir.
- 3) Bileşenlerin deformasyonunun, birleşimin boyutlarına kıyasla çok daha düşük seviyede olduğu varsayılmıştır.

Bu mekanik model için birleşimin rijitliğini etkileyen beş parametre Şekil 23'te gösterilmiştir. Bu parametreler; tırnakta eğilme (tb), kolon boş kesitlerindeki dik plâkada eğilme (cwc), kolon dik plâkada eğilme (cwb), giriş uç konnektöründe eğilme ve kesme ($bc b$) ve kolonun gövdesinde kesme (cws) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 22. Zhao vd. (2017) tarafından önerilen mekanik model



Şekil 23. Kiriş-kolon birleşimindeki bileşenler (Zhao vd. 2017)

Konnektör üzerindeki tırnaklar, uygulanan yükü kirişten kolona aktarmaktadır. Önerilen mekanik modelde tırnak geometrisi idealleştirilerek mekanik model oluşturulmuştur. Bu nedenle eğilmedeki sapma δ_{tb} , tırnağın eğilmedeki rijitliği ise k_{tb} ile gösterilmiş ve bu değerlerin hesaplama aşamaları Denklem 1-3'te verilmiştir.

$$\delta = \frac{q \cdot h_t}{EI} \left(\frac{1}{3} l_t^3 + l_t^2 \cdot l_0 \right) \quad (1)$$

$$k_{tb} = \frac{q \cdot h_t}{\delta_{tb}} = \frac{3EI}{l_t^3 + l_t^2 \cdot l_0} \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{12} h_t \cdot t_t^3 \quad (3)$$

Tırnaklar kolon gövdesindeki yuvalara yerleştiğinde, kolonda temasta bulunan plâkaya yayılı yük (q) etki etmektedir. Kolon gövdesinde yatak deformasyonları δ_{cwc} , kolon gövdesinde tırnakların temasta bulunduğu noktanın rijitliği ise k_{cwc} olarak gösterilmiş ve hesaplama aşamaları Denklem 4-5'te verilmiştir.

$$\delta_{cwc} = \frac{q \cdot d_h}{E \cdot t_{up}} \quad (4)$$

$$k_{tb} = \frac{q \cdot h_t}{\delta_{cwc}} = \frac{E h_t \cdot t_{up}}{d_h} \quad (5)$$

Kirişlere gelen yükler konnektör vasıtası ile kolonlara aktarılmaktadır. Yük aktarımı, tırnaklara aktarılan yayılı yüke karşı kolonun tepkisi sonucu kolon gövdesinde dolu ve boşluklu olan alanların aralarındaki mesafeye bağlıdır. Kolon dik plâkada eğilme sonucu deformasyon δ_{cwb} , kolon gövdesinde tırnakların temasta bulunduğu noktanın rijitliği ise k_{cwb} olarak gösterilmiş ve hesaplama aşamaları Denklem 6-8'de verilmiştir. Kiriş uç konnektörünün eğilme ve kesme rijitliğinin (k_{bcb}) hesaplama aşamaları ise Denklem 9-11'de verilmiştir.

$$\delta_{cwb} = \frac{q \cdot l_h^4}{384 \cdot EI'} \quad (6)$$

$$k_{cwb} = \frac{q l_h}{\delta_{cwb}} = \frac{384 \cdot I' E}{l_h^4} \quad (7)$$

$$I' = \frac{1}{12} \cdot d_h^3 \cdot t_{up} \quad (8)$$

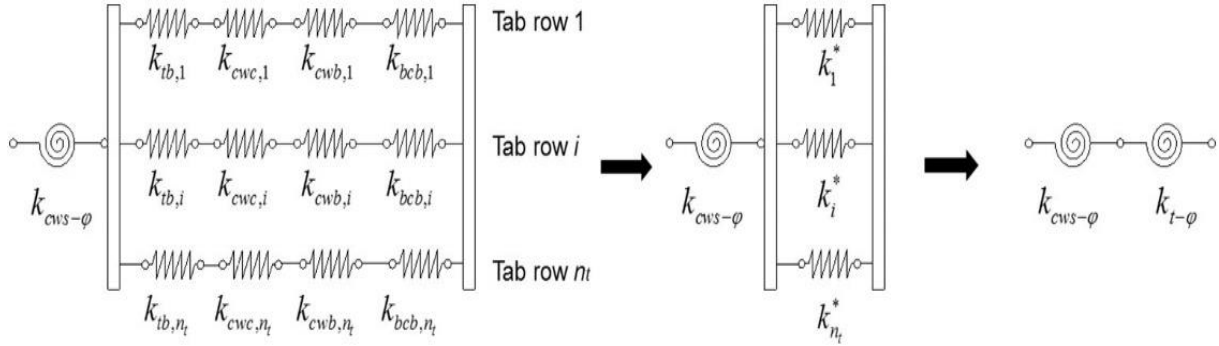
$$k_{bcb} = \frac{q h_t}{\delta_{bcb}} \quad (9)$$

$$k_{cws} = \frac{2 G d_w t_{up}}{h_b} \quad (10)$$

$$k_{cws-\varphi} = 2 G d_w t_{up} h_b \quad (11)$$

Zhao vd. (2017) tarafından sunulan mekanik modelde birleşimin ilk rijitliği temel olarak bulunmuş olan rijitlik değerleri ile türetilmektedir. Şekil 24'te kiriş-kolon birleşiminin

başlangıçtaki dönme rijitliğinin bulunması için gerekli işlemler gösterilmektedir. Denklem 12’de tırnak sıralarına ilişkin eşdeğer uzantı yayının k_i^* ("i", tırnak sırasının sayısını temsil eder) rijitliğini hesaplamak için gerekli formüller verilmiştir. Son olarak birleşimin nihai rijitliği Denklem 13-14 kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 24. İlk dönme rijitliği için hesaplama işlemleri (Zhao vd. 2017)

$$k_i^* = \frac{1}{\frac{1}{k_{tb,i}} + \frac{1}{k_{cwc,i}} + \frac{1}{k_{cwb,i}} + \frac{1}{k_{bcb,i}}} \quad (12)$$

$$k_{t-\phi} = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot L_i^2) \quad (13)$$

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{k_{t-\phi}} + \frac{1}{k_{cws-\phi}}} \quad (14)$$

Ślęczka ve Kozłowski (2007) tarafından geliştirilen mekanik modelde, bileşen yönteminin uygulanması genellikle üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, karmaşık yapıda olan birleşimin bölümlere ayrılarak birleşimdeki bileşenlerin tanımlanmasıdır. İkinci aşamada, tanımlanan her bileşen için kendi başlangıç rijitliği, kuvveti ve çoğu zaman deformasyonlar hesaplanmıştır. Her bir bileşenin davranışı, yer değiştirme ve kuvvet arasındaki bilinmeyen bir ilişkiyle tanımlanmaktadır. Birleşimin rijitliğini etkilemeyen bileşenler rijit olarak modellenirken, diğer bileşenler elasto-plastik elemanlar olarak modellenmiştir. Üçüncü aşama, tüm birleşimin dönme mukavemetinin ve dönme rijitliğinin değerlendirilmesidir. Daha sonra seri veya paralel olarak birleştirilen eksenel rijitliği olan yay gruplarının analiz edilmesi ile birleşimin nihai davranışı tahmin edilmektedir.

Ślęczka ve Kozłowski'nin (2007) önerdiği mekanik model için birleşimin rijitliğini etkileyen sekiz parametre Şekil 25’te gösterilmiştir. Bu parametreler; kolon gövdesinde ezilme rijitliği ($k_{cw,tear}$), kolon gövde rulmanı ($k_{cw,b}$), kolon gövdesinde gerilme rijitliği ($k_{cw,c}$), kolon gövdesinde kesme ($k_{cw,s}$), tırnaktaki kesme rijitliği ($k_{t,s}$), konnektörde kesme ve eğilme rijitliği ($k_{co,ext} = k_{co,int}$) ve konnektör gövdesinde gerilme rijitliği ($k_{cow,t} = k_{cow,c}$) olarak tanımlanır ve hesaplanışları Denklem 15-21 arasında verilmiştir.

$$k_{cw,tear} = \frac{1}{\left(\frac{xl_{cw,p}}{4GA_{cw,p}} + \frac{l_{cw,p}^3}{192EI_{cw,p}}\right)} \quad (15)$$

$$k_{cw,b} = 12k_b k_t h_{tab} F_{u,cw} \quad (16)$$

$$k_{cw,c} = \frac{Et_{cw} b'_{eff,c}}{d_{wc,c}} \quad (17)$$

$$k_{cw,s} = \frac{0.38E}{\left(\frac{\Sigma h_1}{A_{vc}} + \frac{\Sigma h_2}{A_{vc,net}}\right)} \quad (18)$$

$$k_{t,s} = \frac{1}{\frac{l_f^3}{3EI} + \frac{1.2l_f}{GA_{co}}} \quad (19)$$

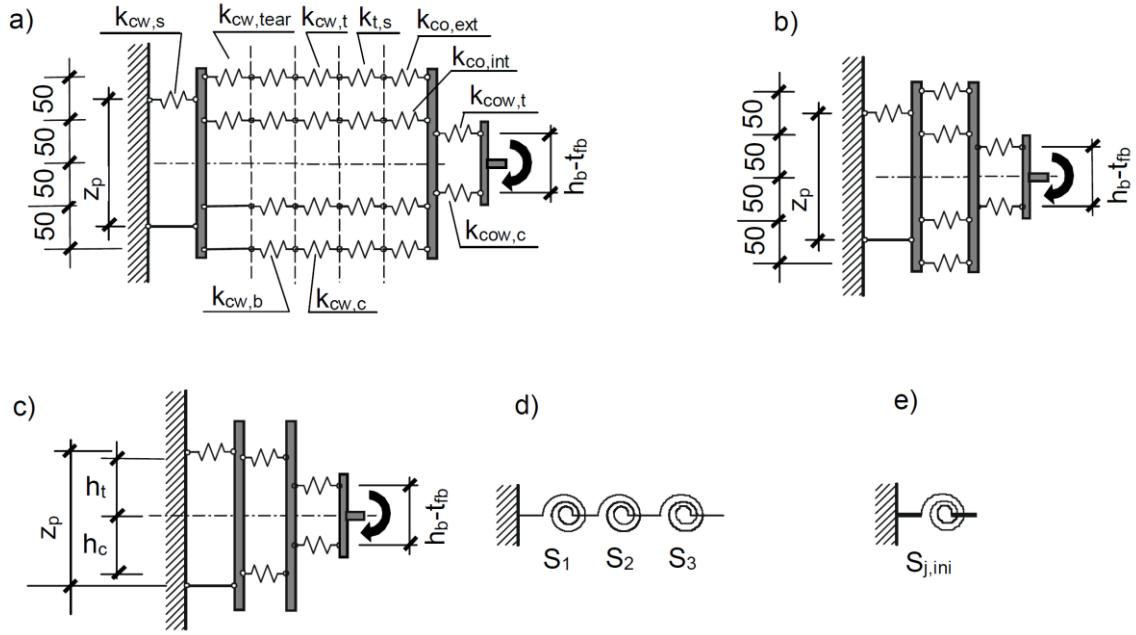
$$k_{co,ext} = k_{co,int} \frac{1}{\frac{(2Z_c)^3}{8EI_{co}} + \frac{1.2Z_c}{GA_{co}}} \quad (20)$$

$$k_{cow,t} = k_{cow,c} \frac{Eb'_{eff,co} t_{co}}{d_{w,co}} \quad (21)$$

Bileşenlerin davranışını temsil eden yaylar, konnektör tırnakları seviyesinde ve kiriş uç kısmında bulunur. EN 1993-1-8'e (Standardizaion 1993) göre, yayların kuvvet kolları yayın bulunduğu düşey konumun kirişin tarafsız eksenine olan uzaklığı olarak tanımlanmıştır. Hesaplama, birleşimin ortasındaki yayların katkısının küçük olduğu ve etkilerinin ihmal edildiği varsayılmıştır.

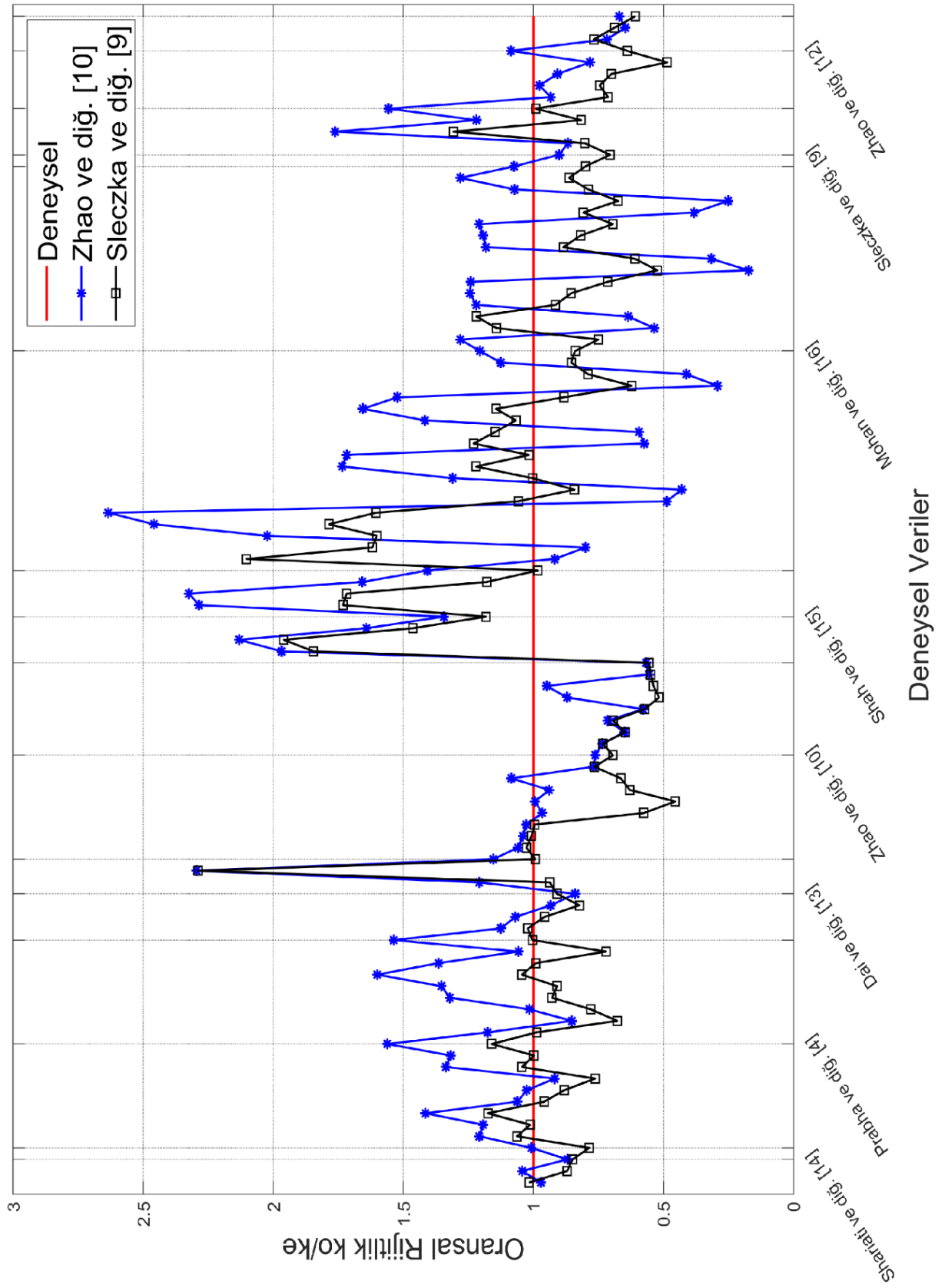
Dönme rijitliğinin hesaplandığı mekanik model şeması Şekil 25.a-e arasında verilmiştir. İlk adım, her sıranın (Şekil 25.b) etkin rijitliğinin hesaplanması ve ardından sıkıştırma ve gerilme bölgelerindeki eşdeğer toplam rijitliğin öngörülmesidir (Şekil 25.c). Üçüncü adım, aksel rijitliğe sahip iki yayın, dönme rijitliğinde bir yaya dönüştürülmesi (Şekil 25.d) ve son olarak, başlangıç dönme rijitliği Şekil 25.e'deki gibi hesaplanmıştır. Test edilen bağlantılarda dönme rijitliği üzerindeki en etkili değişkenlerin, kolon gövde genişliği ve kolon et kalınlığı olduğu gözlemlenmiştir.

Çelik depolama raf sistemlerinde dönme rijitlik değerlerinin belirlenmesi hem maddi yönden çok masraflı olmakta hem de uzun bir süre gerektirmektedir. Dolayısıyla kiriş-kolon birleşimlerinin dönme rijitlik değerlerinin mekanik model yardımı ile doğru bir şekilde belirlenmesi büyük bir önem teşkil etmektedir. Literatürde kiriş-kolon birleşimlerinin dönme rijitlik değerlerinin belirlenmesi için kullanılan iki mekanik model (Ślęczka ve Kozłowski 2007; Zhao vd. 2017) mevcuttur. Bu iki mekanik model arasındaki farklılıkların hangi değişkenlerden kaynaklandığını belirlemek ve bu iki modelden daha iyi sonuç veren bir mekanik model önermek bu tezin temel amaçlarından biridir.



Şekil 25. Dönme rijitliğinin değerlendirilmesi için mekanik model ve işlemler (Ślęczka ve Kozłowski 2007)

Yazıcı ve Özkal (2019) tarafından, konnektörün üç, dört ve beş tırnaklı olmak üzere bulonlu tırnaklı ve sadece tırnaklı birleşim tipleri için birleşimin mekanik davranışını ifade eden iki model üzerinde iyileştirmeler yapılarak mukayesesi sunulmuş ve hangi modelin daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Bu mekanik modeller ile deneysel sonuçlar mukayese edildiğinde, tırnak ve yuva yapıları farklı olan birleşimlerin dönme rijitliği değerlerinin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. MATLAB yazılımı ile bu iki mekanik modelin hesaplama algoritması oluşturularak tırnak sayısı, kolon et kalınlığı, kiriş yüksekliği, konnektör cidar kalınlığı, malzeme özellikleri, boşluk alanları ve tırnak özellikleri gibi değişkenler üzerinden dönme rijitlik değeri elde edilmiştir. Bu iki model kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürdeki farklı çalışmalarda bulunan deneysel sonuçlara oranlanarak nihai değerler Şekil 26'da ve Tablo 1'de verilmiştir. 8 farklı çalışmadan alınan 102 deneysel veri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo 1'de bulunan ortalama hata değerleri yüzde cinsinden $(k_o/k_e \cdot 100)$ verilmiştir. Yazıcı ve Özkal (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışma, depolama raf sistemlerinde kiriş-kolon birleşimlerinin dönme rijiliğinin belirlenmesi için bileşen yönteminin uygulanmasına yönelik bir temel teşkil etmektedir. Ayrıca yine bu çalışmada, mekanik model kullanımı ile raf yapı tasarım maliyetlerinin azaltılabileceği öngörülmektedir. Buna ek olarak Ślęczka'nın modelinin Zhao'nun modeline göre çok daha düşük hata oranlarına sahip olduğu bulunmuştur. Ślęczka modelinden elde edilen dönme rijitlik değerlerinin deneysel sonuçlara daha yakın olduğu açık bir şekilde gözükmemektedir. Yapılan bu çalışmanın sonucu olarak Ślęczka'nın modelinin Zhao'nun modeline göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 26. Zhao ve Ślecza modellerinin oransal rijitliği k_o/k_e (Yazıcı ve Özkal 2019)

Tablo 1. Mekanik Modellerin Oransal Rijitlik Değerleri İçin Hata Payları

Çalışma	Zhao modeli için ortalama hata (%)	Ślęczka modeli için ortalama hata (%)	Zhao modeli için standart sapma	Ślęczka modeli için standart sapma
Shariati vd. (2018)	5,30	12,82	0,05	0,08
Mohan vd. (2015)	26,52	10,62	0,19	0,10
Dai vd. (2018)	29,72	24,19	0,44	0,47
Zhao vd. (2017)	18,61	32,09	0,16	0,17
Shah vd. (2017)	84,50	51,21	0,39	0,35
Mohan ve Vishnu (2013)	48,58	26,96	0,36	0,23
Ślęczka ve Kozłowski (2007)	35,39	19,88	0,29	0,12
Zhao vd. (2018)	18,18	33,18	0,13	0,09
Ortalama değer	33,35	26,37	0,34	0,24

MATERYAL VE METOT

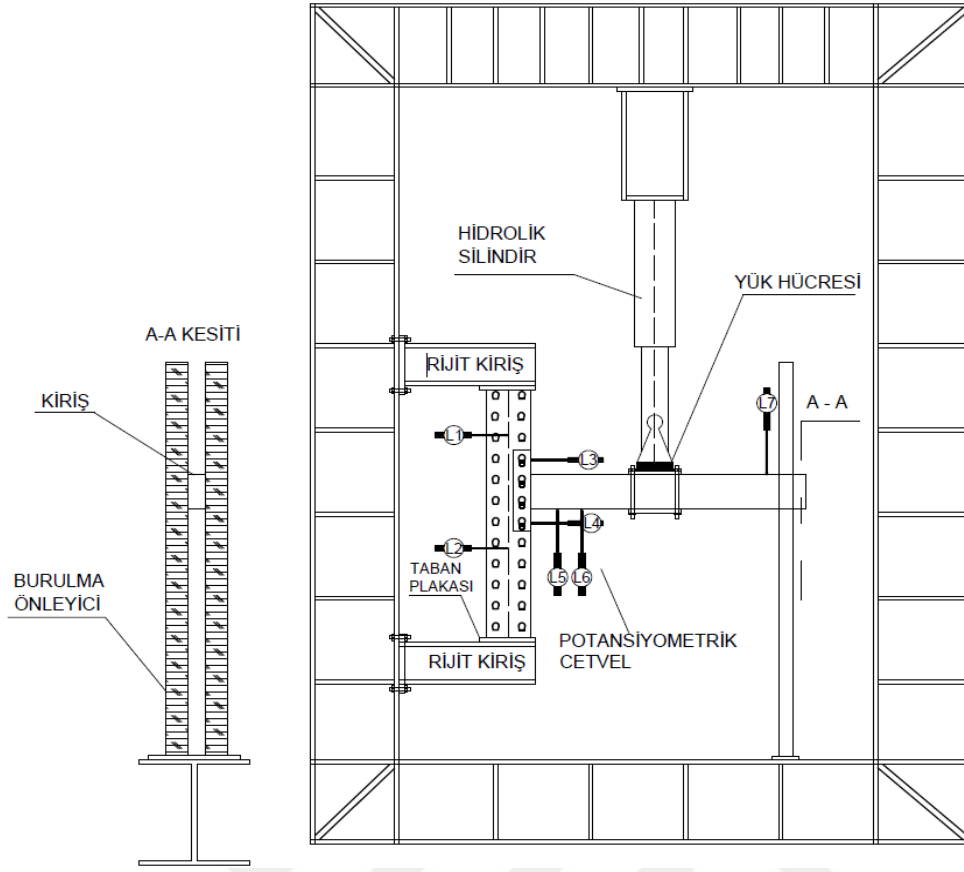
Deneysel İnceleme

Bu çalışma kapsamında, özel sektörde soğuk şekillendirme yöntemiyle üretilmiş profiller kullanılarak gerçekleştirilen kiriş-kolon birleşim deneyleri ve eksenel basınç deneyleri aracılığıyla çelik depolama raf sistemleri deneysel olarak incelenmiştir. Literatür araştırmaları ve piyasadaki raf üreticileri ile yapılan görüşmeler sonucunda sırt sırta depolama raf sistemlerinin en yaygın biçimde kullanılan sistem olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada sırt sırta depolama raf sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve ölçümlere ait açıklamalar alt başlıklarda sunulmuştur.

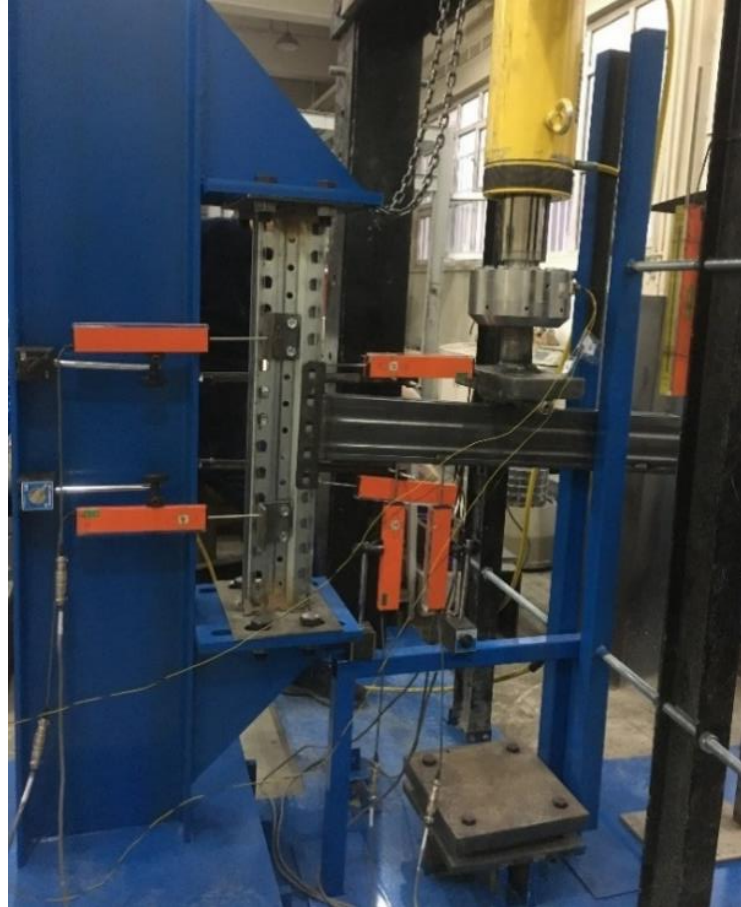
Kiriş-kolon birleşim deneyi

Kiriş-kolon birleşim deneyi için tek kollu konsol deney yöntemi seçilmiştir. Bu deney için önceden imalatı yapılmış olan deney düzeneğine kolon alt ve üst kısımlarından bağlantı yapılmıştır (Şekil 27 ve 28). Kolon bağlantıları yapıldıktan sonra kiriş kolonun tam orta noktasında olacak şekilde montajı sağlanmıştır. Konnektörün üst noktasının 4 cm üstüne ve alt noktasının 4 cm altına yatayda konumlandırılan iki adet yer değiştirme ölçer ile kolondaki yer değiştirme değerleri kaydedilmiştir. Konnektörün üst noktasından kiriş doğrultusuna paralel olacak şekilde iki adet yer değiştirme ölçer ve konnektörün alt noktasına da bir adet yer değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Kirişin sehim değerleri, konnektörden uzaklığı sırası ile 15 cm, 25 cm ve 75 cm olan ve düşey olarak konumlandırılmış yer değiştirme ölçerler ile kaydedilmiştir. Kiriş-kolon birleşim bölgesinin davranışını moment-dönme eğrileri en iyi şekilde temsil etmektedir. Dolayısıyla kiriş kesitine uygulanan yük neticesinde kirişte ve kolonda meydana gelen yer değiştirme sonuçları üzerinden gerekli hesaplamalar yapılarak moment-dönme ilişkileri elde edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında toplam 30 adet kiriş-kolon birleşim deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışmada ilk olarak dört farklı kolon kesiti, üç farklı kolon et kalınlığı, iki farklı kiriş yüksekliği ve tek tip konnektör (beş tırnaklı) muhtelif kombinasyonlarda ele alınarak kiriş-kolon birleşim davranışları incelenmiştir. Depolama raf sistemlerinde tipik bir kiriş-kolon birleşim detayı Şekil 29'da, kiriş-kolon birleşimleri için deney düzeneği detayları ise Şekil 30'da verilmiştir. B120 ve B140 şeklinde yüksekliklerine göre isimlendirilen kirişlerin konnektör üzerindeki farklı konumları incelenmiş olup konum detayları Şekil 31'de sunulmuştur.



Şekil 27. Kiriş-kolon birleşim deneyi için tasarlanan deney düzeneği



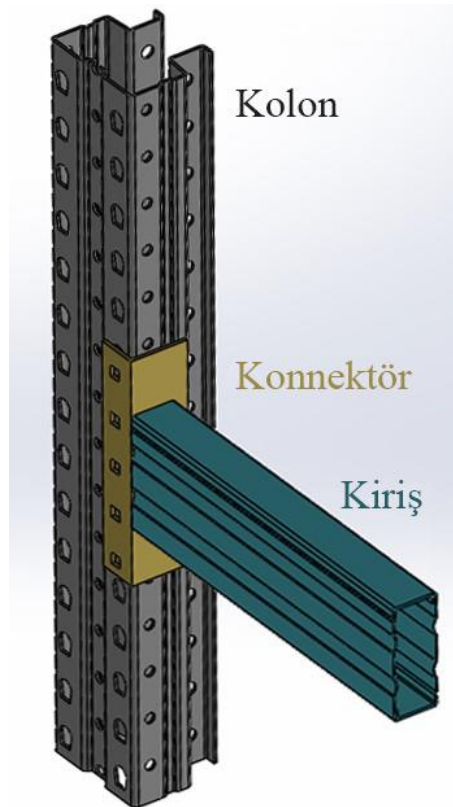
Şekil 28. Kiriş-kolon birleşim deneyi

Kolon kesitleri 3.0C1 ve 2.5C2 olarak isimlendirilmiş olup en kesit detayları Şekil 32’de verilmiştir. 2.0C3 ve 2.0C4 kesitlerinin detayları ise sırası ile Şekil 33 ve Şekil 34’te bulunmaktadır. 3.0C1 kesitinin et kalınlığı 3 mm, 2.5C2 kesitinin et kalınlığı 2.5 mm, 2.0C3 ve 2.0C4 kesitlerinin et kalınlığı da 2 mm’dir. B120 ve B140 kirişlerinin kesit detayları Şekil 35’te gösterilmiştir. Kiriş kesitlerinin et kalınlığı 1.5 mm, konnektör kesitinin et kalınlığı 4 mm’dir. Kiriş uç konnektörü olarak tüm deneylerde beş tırnaklı konnektör kullanılmış olup 5T olarak isimlendirilmiş ve detayları Şekil 36’da sunulmuştur. Ayrıca bazı birleşim numunelerinde konnektörün alt ve üst hizalarında kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilerek numune isimlendirmesinin sonuna “B” ibaresi eklenmiş ve detayları Şekil 37’de verilmiştir.

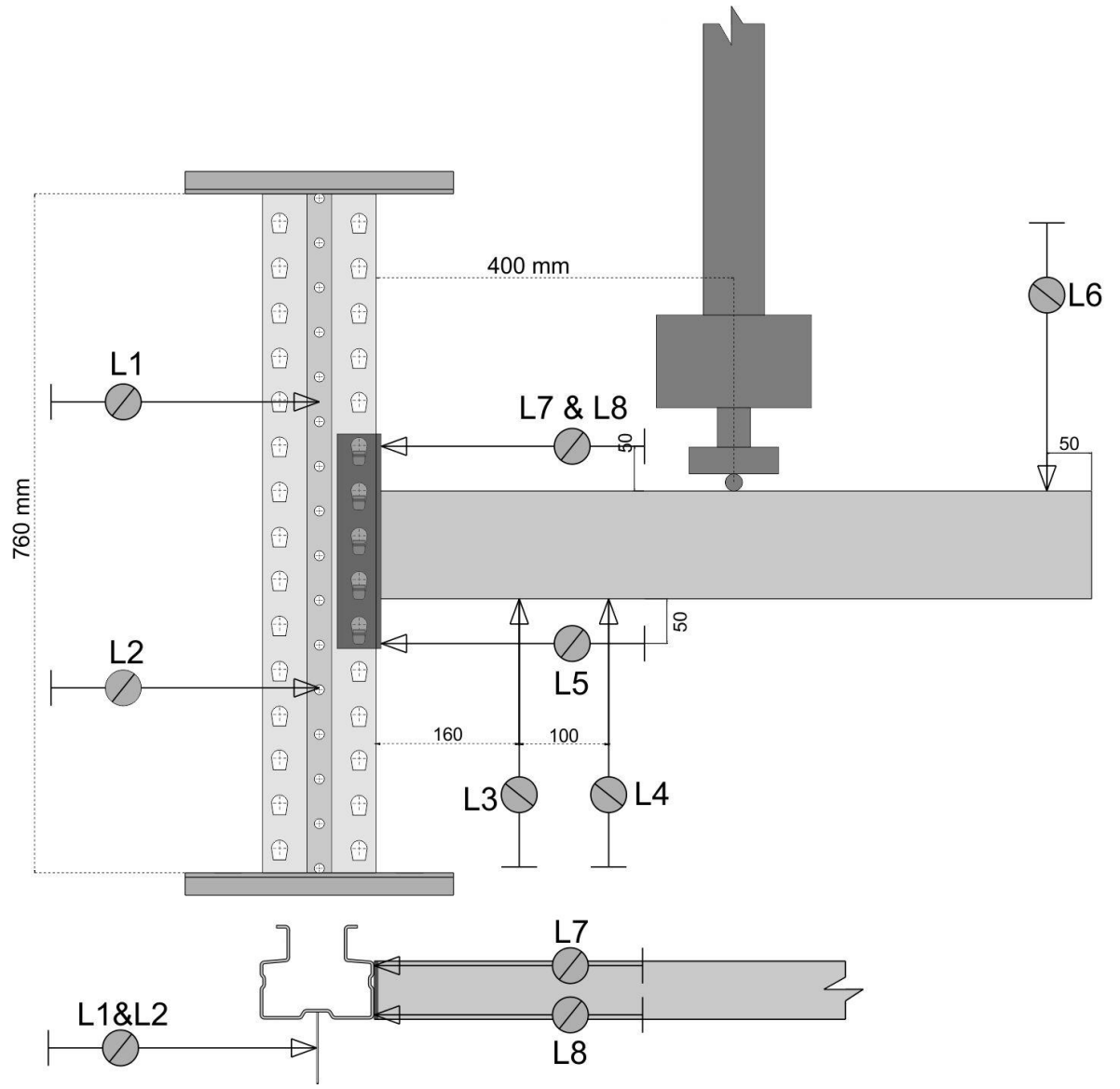
Kiriş-kolon birleşim deneyleri için kullanılan isimlendirme yönteminin açıklaması Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kiriş-Kolon Birleşim Deneyleri İçin Kullanılan İsimlendirme Yöntemi

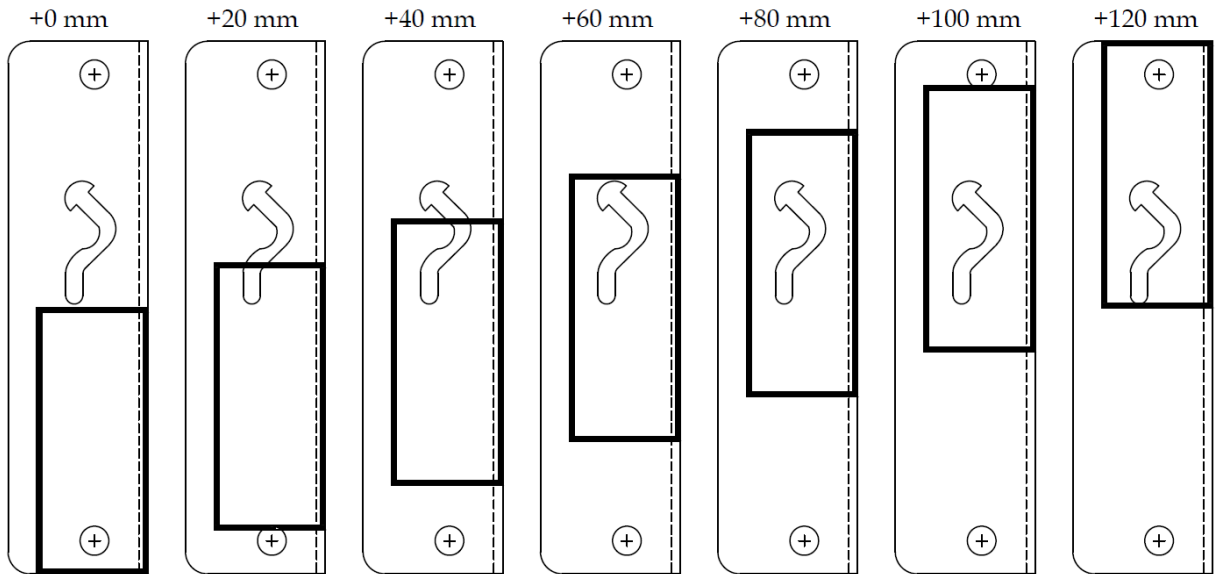
x.yCz	Bxxx	xT	+xy	B
x.y : Kolon et kalınlığı	xxx : Kiriş yüksekliği	x : Konnektör tırnak sayısı	+xy : Kirişin konnektördeki düşey konumu	Kolon ağız açıklığında bulon bulunması durumu
z : Kolon kesit numarası				



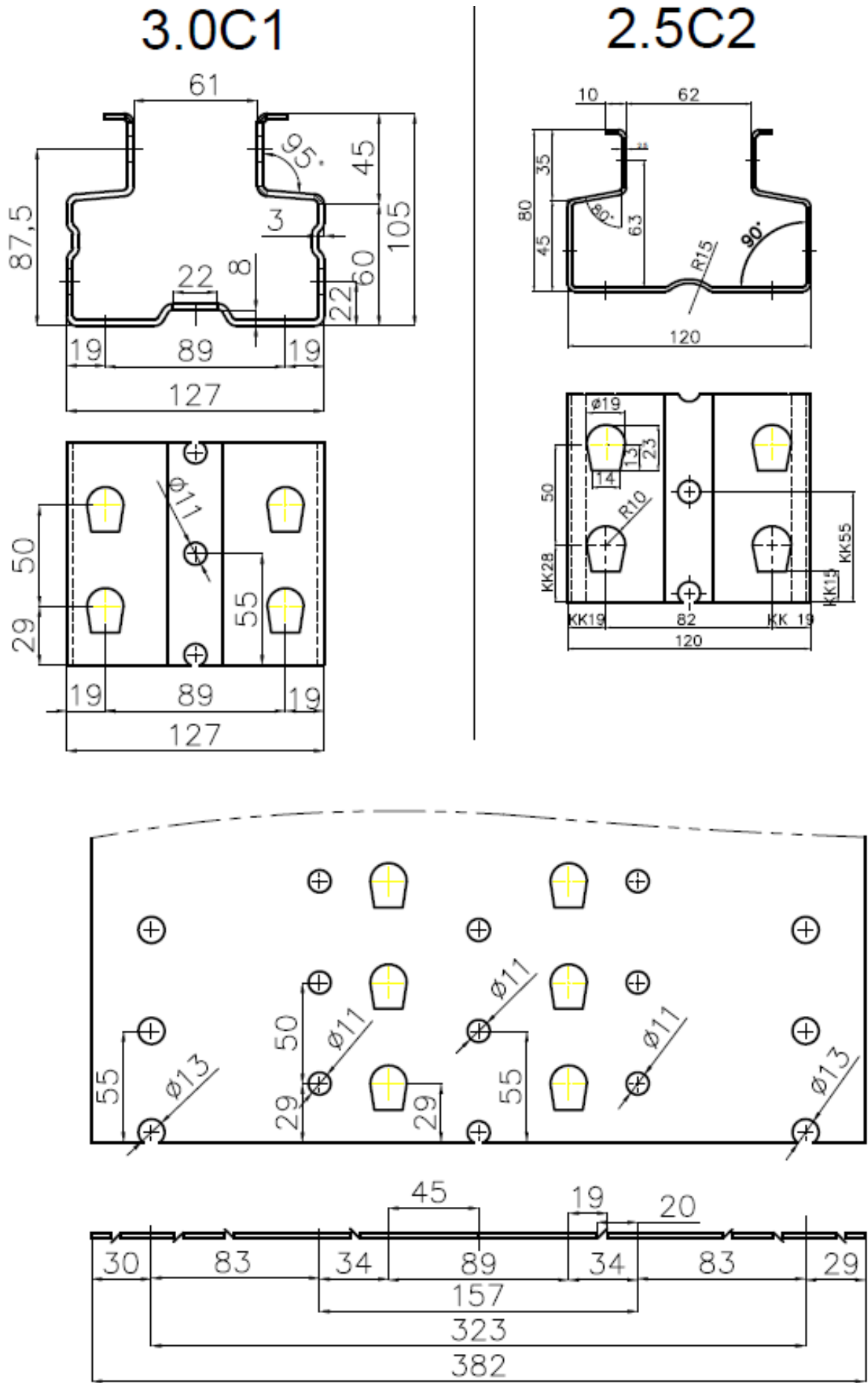
Şekil 29. Tipik kiriş-kolon birleşim detayı



Şekil 30. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için deney düzeneği

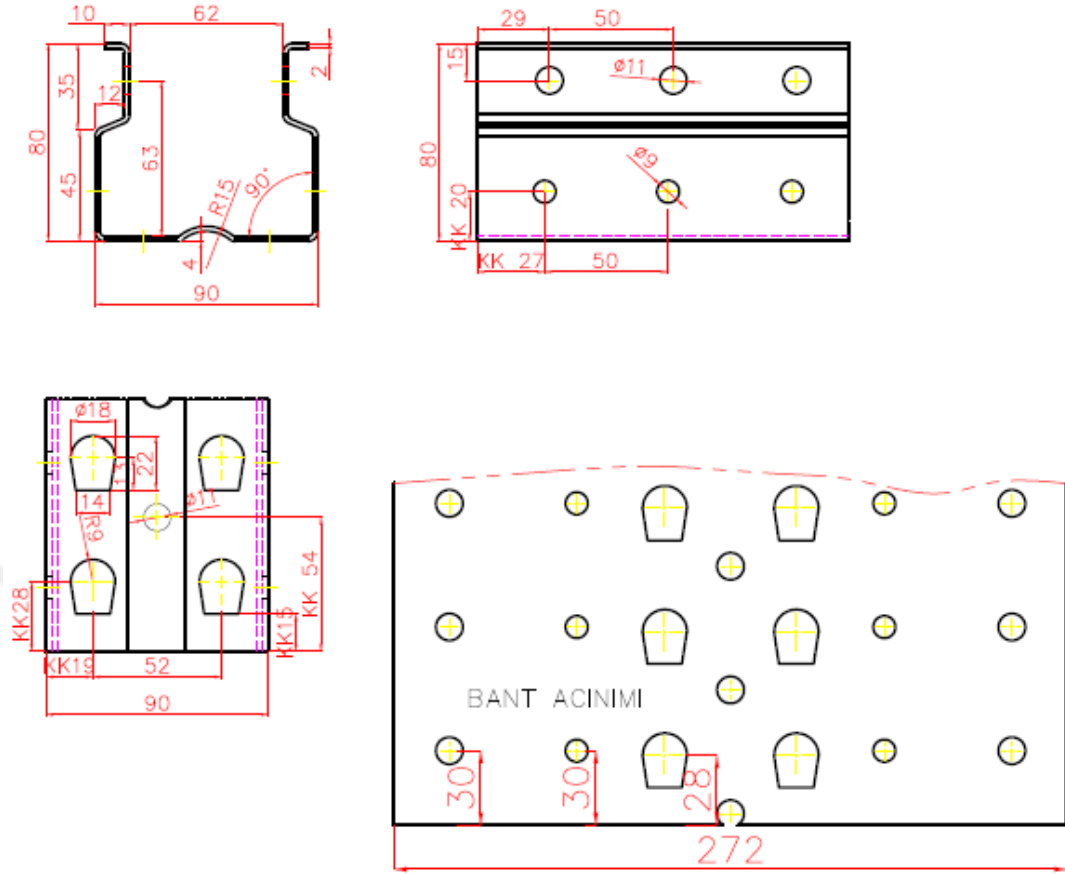


Şekil 31. Kirişlerin konnektör üzerindeki farklı konumları



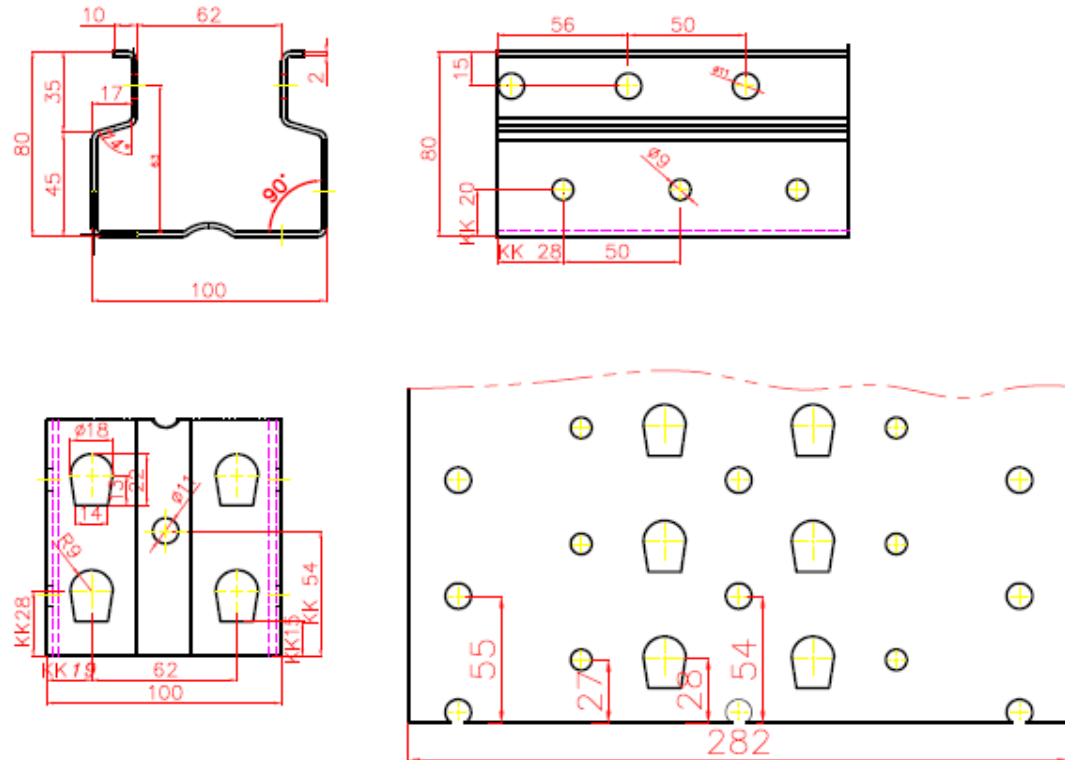
Şekil 32. C1 ve C2 kolon geometrisinin detayları

2.0C3

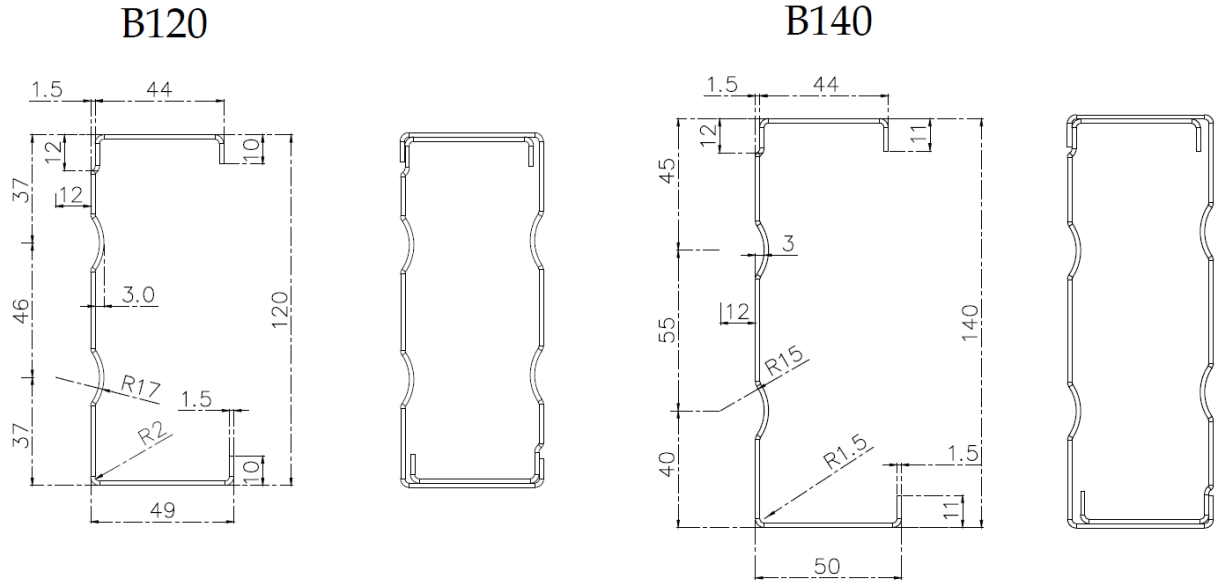


Şekil 33. C3 kolon geometrisinin detayları

2.0C4



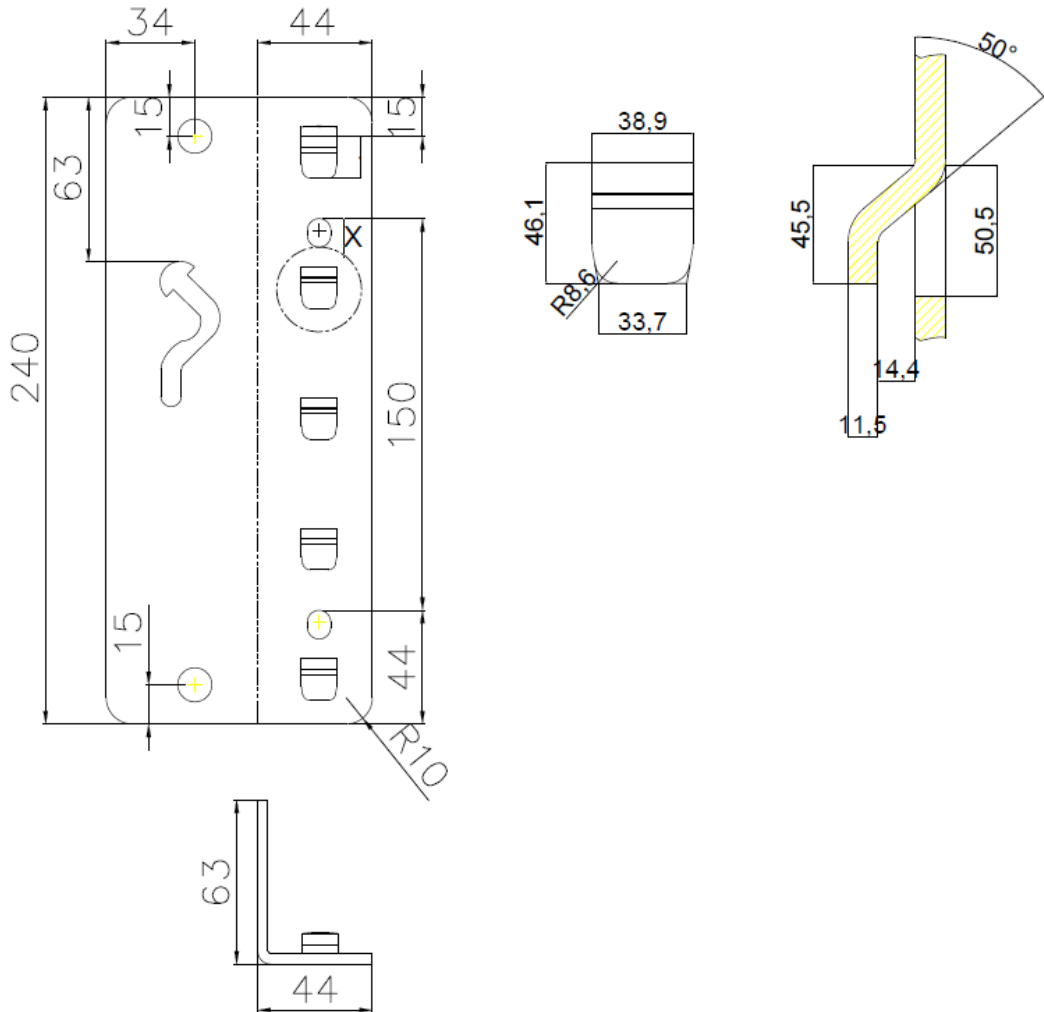
Şekil 34. C4 kolon geometrisinin detayları



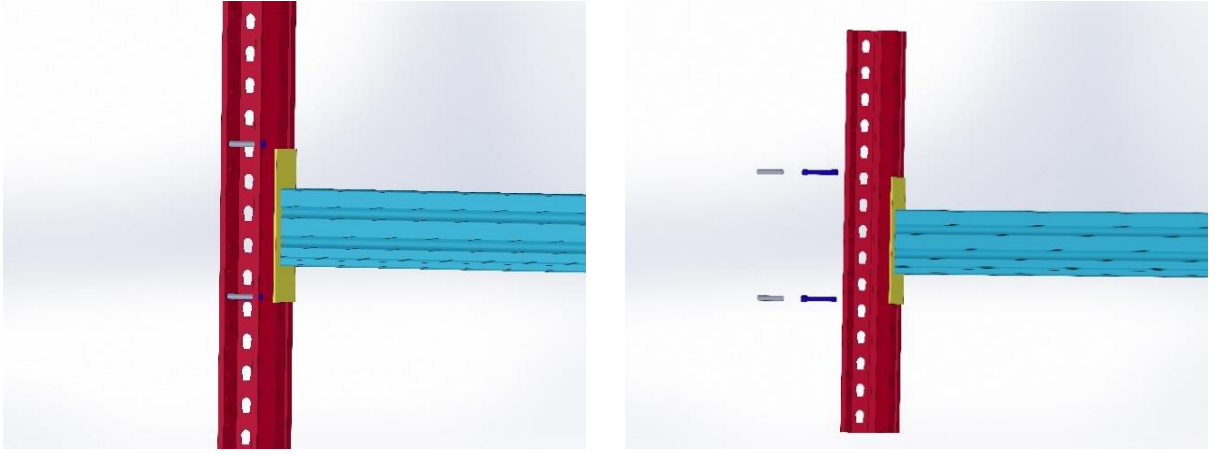
Şekil 35. Kiriş geometrisinin detayları

5T

X-DETAYI



Şekil 36. Konnektör geometrisinin detayları

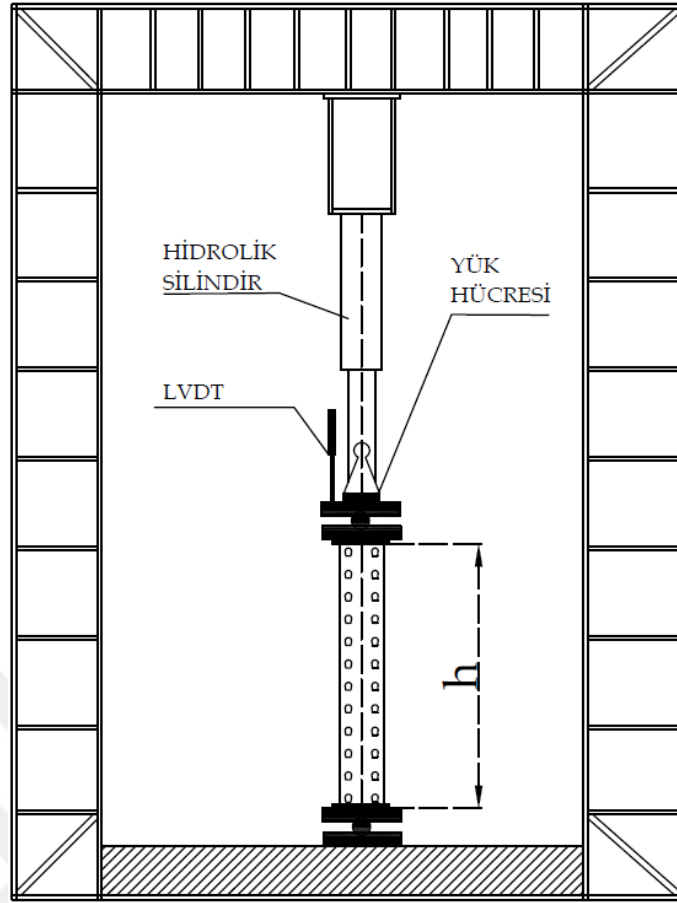


Şekil 37. Kolon ağzına bulon yerleştirilen kiriş-kolon birleşim detayı

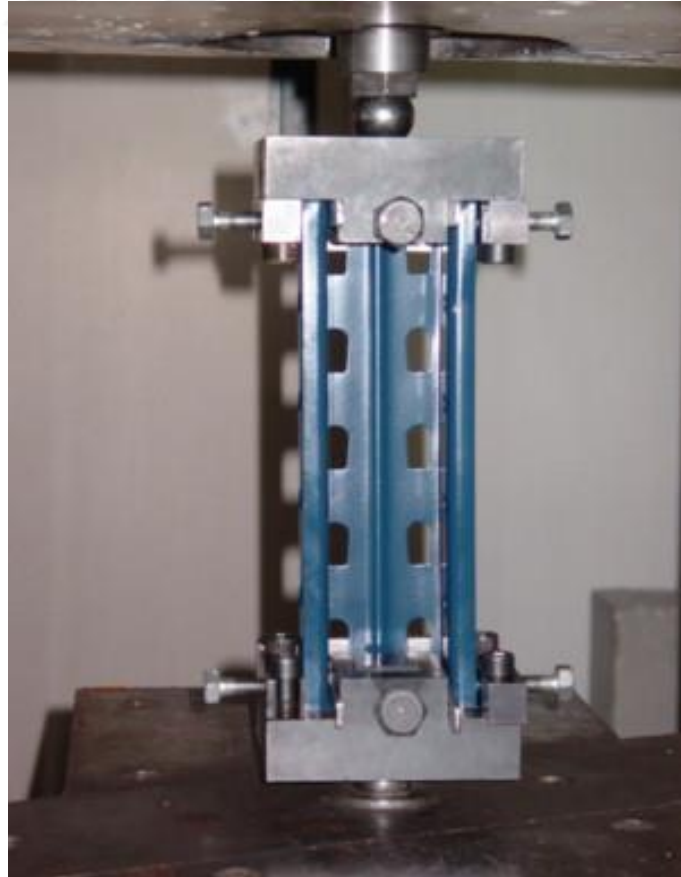
Kolon eksenel basınç deneyi

Kolon eksenel basınç deneylerinde, özellikle kritik burkulma yükünü tespit maksadıyla EN 15512 (2009) tasarım yönetmeliğine göre kolon kesit genişliğinin asgari üç katı değerinde olacak halde kolon boyunun seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu sınır değerler gözetilerek numune uzunlukları 400, 700 ve 1200 mm olarak belirlenmiştir. Kolonların taban ve üst kısmı için uygun birleşim aparatları tasarlanarak kesitlerin deney düzeneğine rijit biçimde bağlantısı temin edilmiştir. Uygulanan yük, yer değiştirme kontrollü bir şekilde kolon üst başlığındaki plâkadan tatbik edilmiştir. Kolon üst başlığına ayrıca 50 mm çapında bir metal bilye konularak, yük ağırlık merkezinden ve kolon eksenine doğrultusunda uygulanmıştır. Kolon eksenel basınç deneyi için deney düzeneği ve geçmiş çalışmalardan alınan bir deney fotoğrafı Şekil 38 ve 39’da verilmiştir. Yükleme, kesitte göçme meydana gelene kadar devam ettirilmiştir. Her kesit için uygulanan yüklemelerde göçme modlarının gerçekleştirdiği kuvvet değerleri ve boy değişimleri kaydedilmiştir. Kolonların eksenleri doğrultusundaki boy değişimleri, üst başlık plâkasına düşey olarak konumlandırılan bir adet yer değiştirme ölçer vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır.

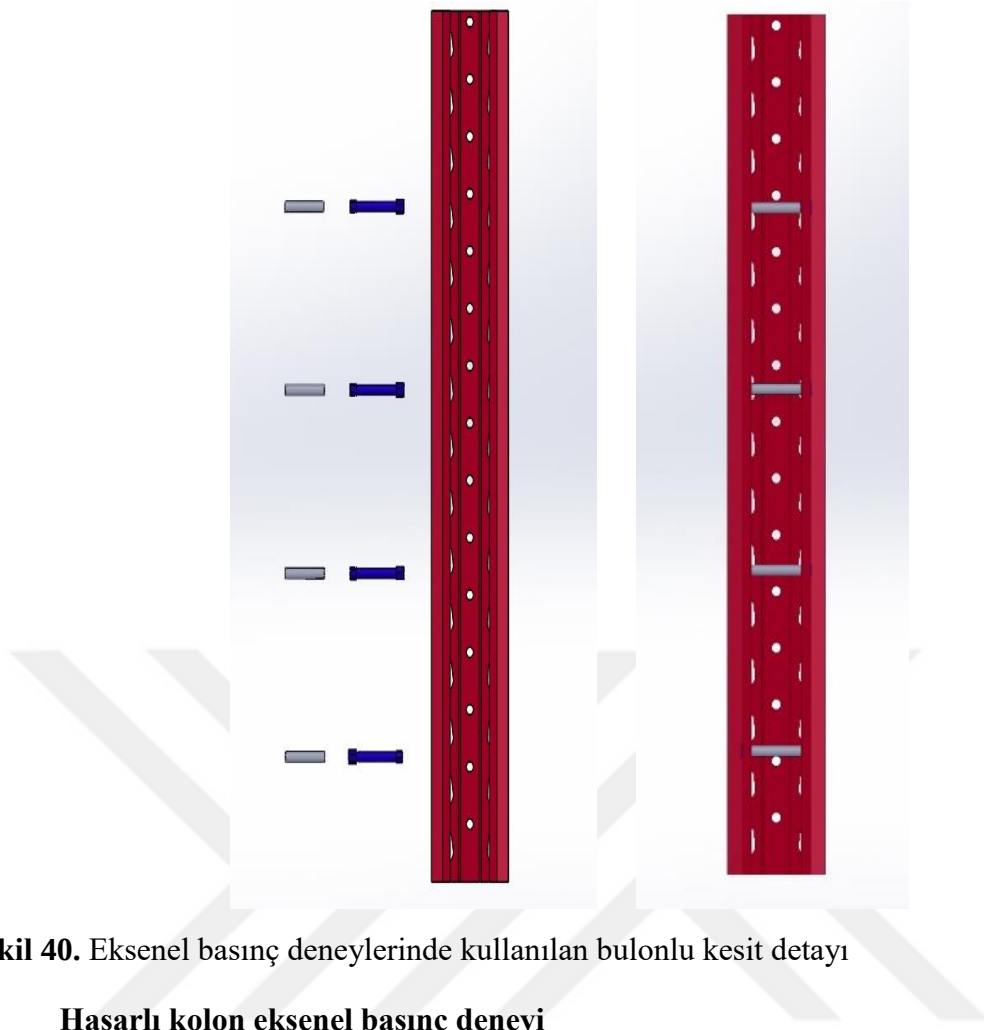
Literatür araştırması dâhilinde, deneysel inceleme ve sayısal çözümlemelerde kolon kesitlerinin ağız açıklığının yük etkisi altında kapandığı veya daha da açıldığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak kolon ağız açıklığına bir boru ve borunun içerisine de bulon yerleştirilmiştir. Bu işlemin asıl amacı, ağız açıklığında gerçekleşen yüksek seviyedeki şekil değiştirmeleri kısıtlayarak kritik burkulma yükünü artırmaktır. Bulonlar, kolon boyunca 20 cm ara ile yerleştirilmiş ve kesit detayları Şekil 40’da verilmiştir. Deneylerde dört farklı kolon kesiti için 400, 700 ve 1200 mm uzunluklarında deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu kolonların et kalınlıkları 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 mm’dir. Deneyler bulonlu ve bulonsuz olmak üzere iki tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kolon kesitlerindeki girinti/çıkıntılar ve kesit gövdesindeki boşluklar burkulma tipinde kritik rol oynamaktadır.



Şekil 38. Kolon aksel basıncı deneyleri için deney düzeneği



Şekil 39. Örnek kolon aksel basıncı deneyi (Roure vd. 2011)



Şekil 40. Eksenel basınç deneylerinde kullanılan bulonlu kesit detayı

Hasarlı kolon eksenel basınç deneyi

Kiriş-kolon birleşim deneyleri yapıldıktan sonra deney numunesinden çıkarılan hasarlı kolonlar eksenel basınç deneyine tabi tutularak taşıma kapasitelerindeki kaybın ne kadar olduğu incelenmiştir. Geçmiş çalışmalarda benzer bir yaklaşımın olmadığı tespit edilmiştir. Toplamda 30 adet kiriş-kolon birleşim deneyinden sonra hasarlı kolon kesitleri için de eksenel basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Hasarlı kolon kesitlerinin taşıma kapasitesindeki kayıp miktarını belirleyebilmek için her kesitten iki tekrarlı olmak üzere toplam 8 adet kontrol numunesine de eksenel basınç deneyi uygulanmış olup yükleme detayları Şekil 41’de sunulmuştur.

Sayısal Çözümleme

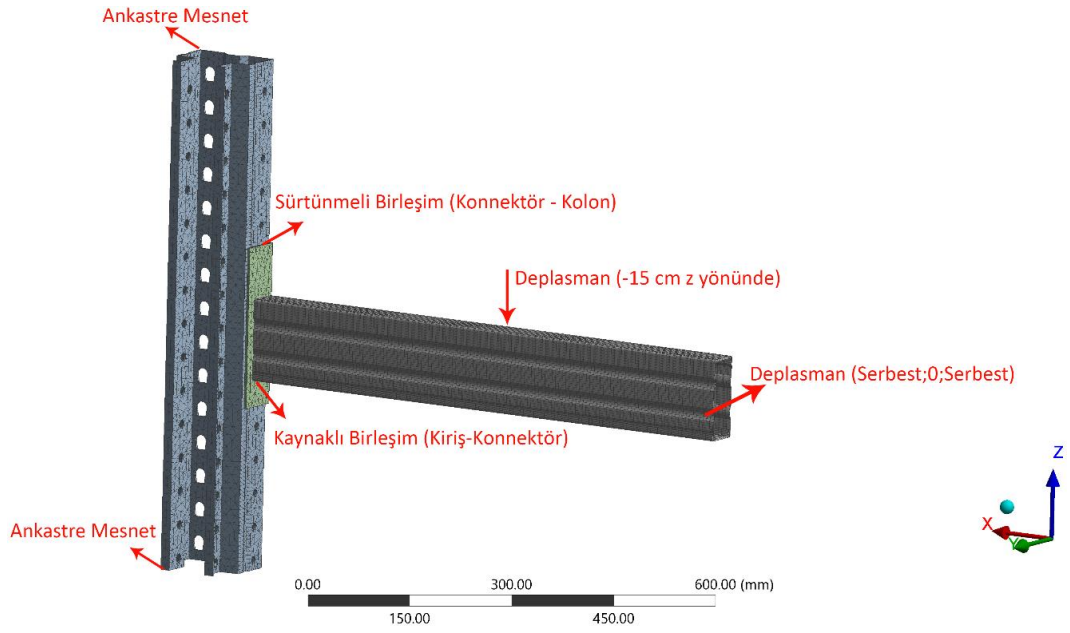
Depolama raf sistemlerinin bir parçası olan kiriş-kolon birleşimleri, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS 18.1 yazılımı ile modellenerek sayısal çözümlemeye tabi tutulmuş ve deneysel sonuçlarla mukayese gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kolon kesitleri için de sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş olup kritik burkulma yükleri sayısal çözümleme aracılığı ile elde edilmiştir.



Şekil 41. Hasarlı kolonlar için eksenel basınç deney düzeneği

Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme

Tek konsol test yöntemine göre gerçekçi sınır şartları, yükleme koşulları ve birleşim değişkenleri göz önünde bulundurularak kiriş-kolon birleşimleri için sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Raf sistemlerinde geometrik özellikler, tırnak sayısı ve konnektör ile kolonun temas yüzeyi sayısı gibi değişkenler, birleşim davranışını en çok etkileyen parametrelerdir (Markazi vd. 1997; Bernuzzi ve Castiglioni 2001; Prabha vd. 2010). Deneysel çalışmalarda olduğu gibi konnektör-kiriş bağlantısı kaynaklı olacak şekilde modellenmiştir. Kiriş-kolon birleşimleri için geçmiş çalışmalardaki deney ve sayısal çözümlemelerle uyumlu olarak, burulma gerçekleşmemesi için yanal ötelenmeler önlenecek şekilde sayısal modeller oluşturulmuştur. Konnektör-kolon bağlantısı için sürtünmeli temas modeli seçilmiş olup sürtünme değeri 0,2 alınmıştır (Lyu vd. 2020). Sonlu eleman modelleri için uygun ağ oluşturma boyutuna dönük çalışma da yapılmış ve eleman boyutu 6 mm olan tetrahedral elemanlar kullanılarak sayısal model oluşturulmuş olup Şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. Kiriş-kolon birleşimlerinin sonlu eleman modeli

Geçmiş çalışmalarda bulunan 17 kiriş-kolon birleşim deneyine ait veriler, ANSYS 18.1 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar çözümlemesine tabi tutulmuştur. Bu deney numunelerinin sınıflandırılması ve boyut özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Geçmiş Çalışmalardaki Kiriş-Kolon Birleşim Deneylerine Ait Bilgiler

Deney No	Geçmiş Çalışma	Deney Adı	Kolon et kalınlığı (mm)	Kiriş et kalınlığı (mm)	Konnektör et kalınlığı (mm)
1	Zhao vd. (2017)	C4*-B105-3T	2,0	1,5	3,0
2		C5*-B120-4T	2,5	1,5	3,0
3	Shah vd. (2016)	2.6U-110B-4T	2,6	1,5	4,0
4		2.6U-125B-4T	2,6	1,5	4,0
5		2U-110B-4T	2,0	1,5	4,0
6		2U-125B-4T	2,0	1,5	4,0
7	Prabha vd. (2010)	2U-4L-100BD	2,0	1,6	3,5
8		2U-4L-125BD	2,0	1,6	3,5
9	Zhao vd. (2014)	C4-B105-3T	1,8	1,5	3,0
10		C5-B105-4T	1,8	1,5	3,0
11		C5-B120-3T	1,8	1,5	3,0
12		C5-B120-4T	1,8	1,5	3,0
13		C5-B145-4T	1,8	1,5	3,0
14	Zhao vd. (2018)	1.8C1-B105-4T	1,8	1,5	3,0
15		1.8C1-B120-4T	1,8	1,5	3,0
16		1.8C1-B120-5T	1,8	1,5	3,0
17		2.3C4-B120-5T	2,3	1,5	3,0

Söz konusu çalışmalardaki deney numunelerinin Elastisite modülü, Poisson oranı ve akma dayanımı gibi mekanik özellikleri ise Tablo 4’te verilmiştir.

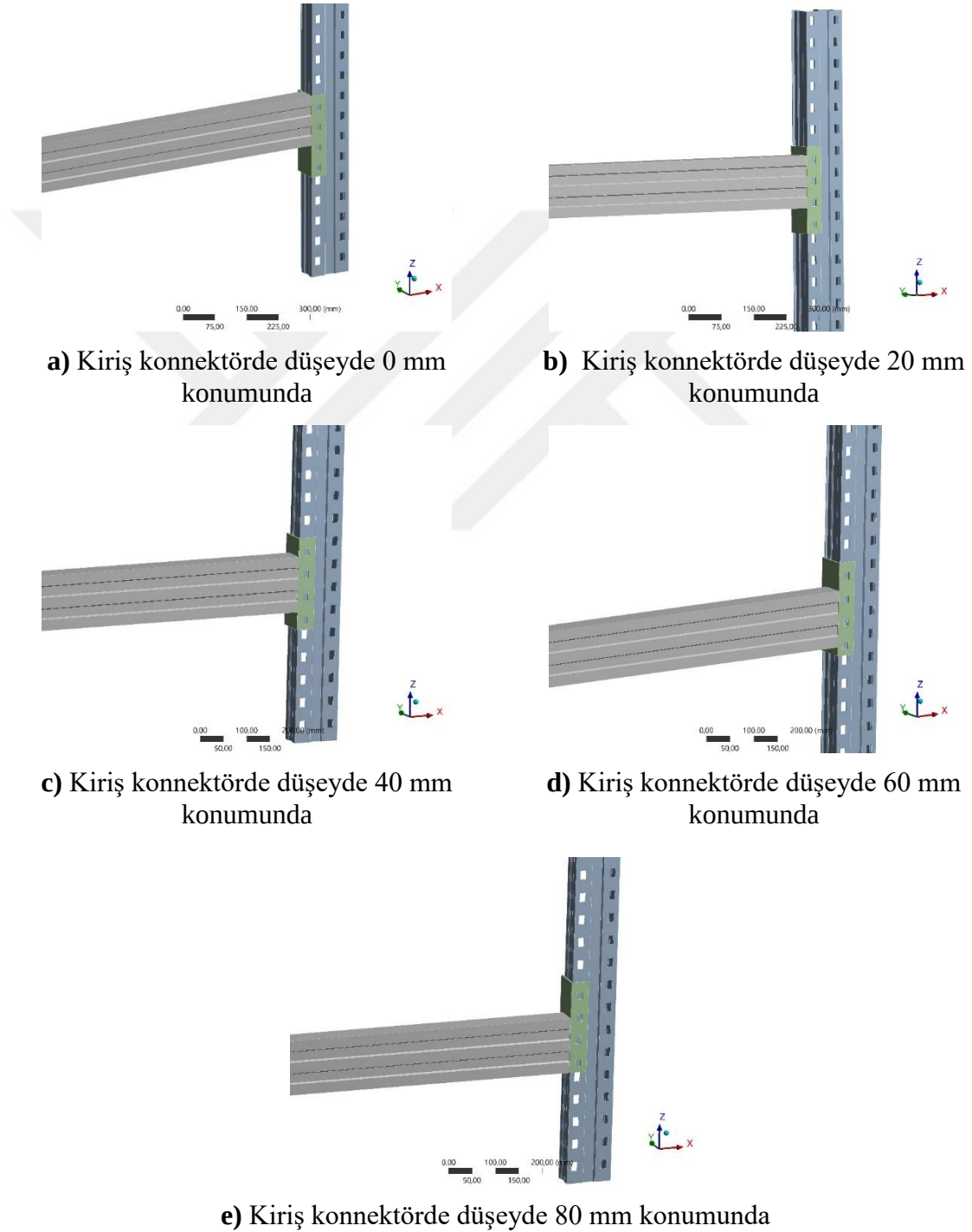
Tablo 4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Çalışma	Birleşim malzemesi	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Akma dayanımı (MPa)
Zhao vd. (2017)	Kiriş	195	0,3	268
	Kolon C4*	205		363
	Kolon C5*	205		374
	Konnektör	209		269
Shah vd. (2016)	Kiriş	210	0,3	353
	Kolon			459
	Konnektör			263
Prabha vd. (2010)	Kiriş	205	0,3	327
	Kolon			280
	Konnektör			304
Zhao vd. (2014)	Kiriş	210	0,3	268
	Kolon C4			395
	Kolon C5			289
	Konnektör			269
Zhao vd. (2018)	Kiriş	195	0,3	195
	Kolon 1.8C1	214		214
	Kolon 2.3C4	206		206
	Konnektör	209		209

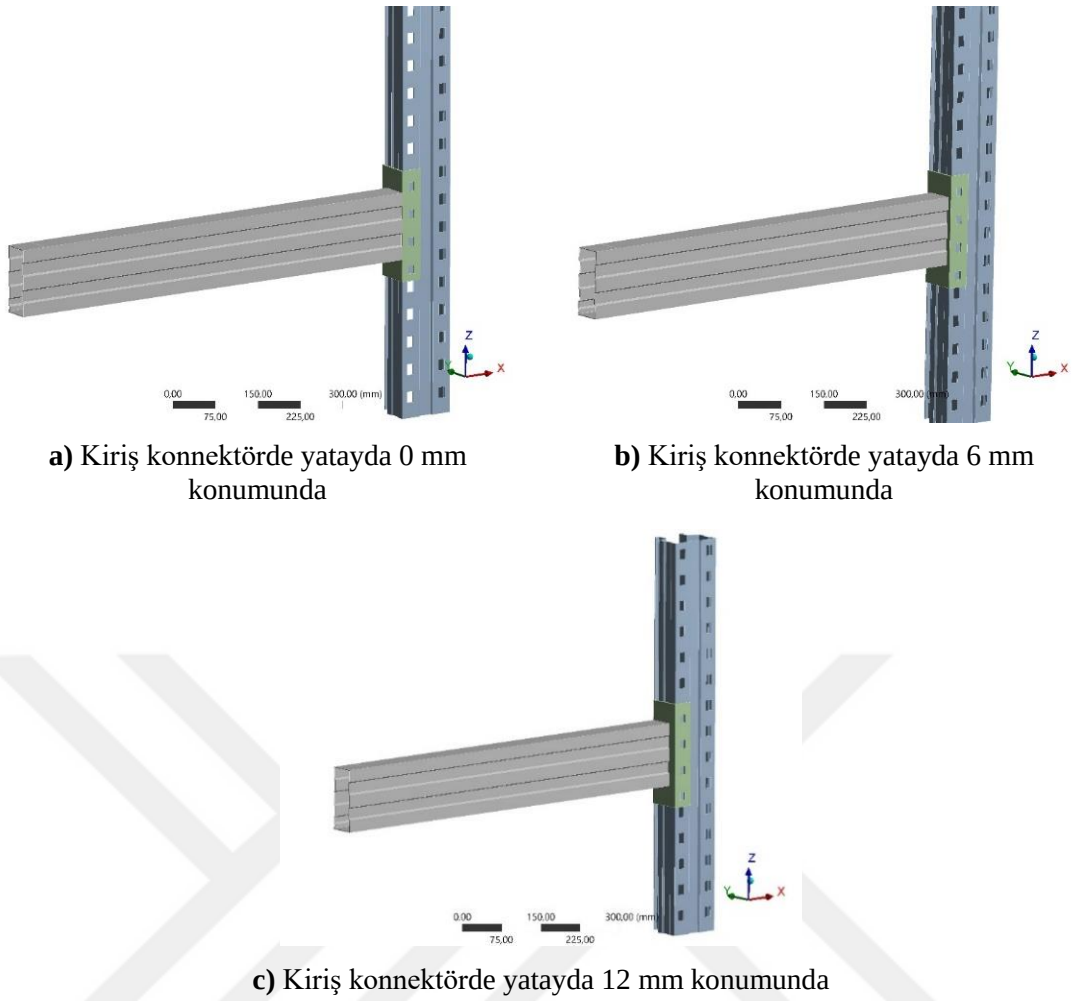
Literatürde bulunan beş farklı kiriş-kolon birleşimi çalışmasından alınan deneysel girdiler ve çıktılar kullanılarak, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sonlu elemanlar modeli teyit edilmiştir. Daha sonra elemanlara ait tasarım detayları ve malzeme özellikleri sabit tutularak literatürden farklı olarak;

1. Kirişin konnektördeki konumu 0, 20, 40, 60 ve 80 mm değerlerinde aşağı yönde değiştirilerek sayısal modeller oluşturulmuştur.
2. Kirişin konnektördeki konumu 0, 6 ve 12 mm değerlerinde yatay ekseninde kolon ağız açıklığına doğru değiştirilerek sayısal modeller oluşturulmuştur.
3. Konnektördeki tırnak sayısı değiştirilmeden ve kirişin konnektördeki konumu sabit tutularak, konnektör boyu aşağı doğru 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm değerlerinde uzatılarak değiştirilerek sayısal modeller oluşturulmuştur.

Geçmiş çalışmalarda (Bernuzzi ve Maxenti 2015, Gusella vd. 2019, Lyu vd. 2018, Shah vd. 2016, Dai vd. 2018) bulunan birer kesit belirlenerek tırnak sayıları tüm çalışmalarda aynı tutulmuş olup malzeme özellikleri için de tüm çalışmalarda aynı değerler girilmiştir. Kirişin konnektördeki düşey konumunun değiştirildiği model detayları Şekil 43.a-e arasında verilmiştir. Kirişin konnektördeki yatay konumunun değiştirildiği model detayları Şekil 44.a-c arasında sunulmuştur. Konnektör boyunun aşağı doğru uzatıldığı model detayları ise Şekil 45.a-f arasında bulunmaktadır.



Şekil 43. Kirişin konnektördeki düşey konumunun değiştirildiği model detayları



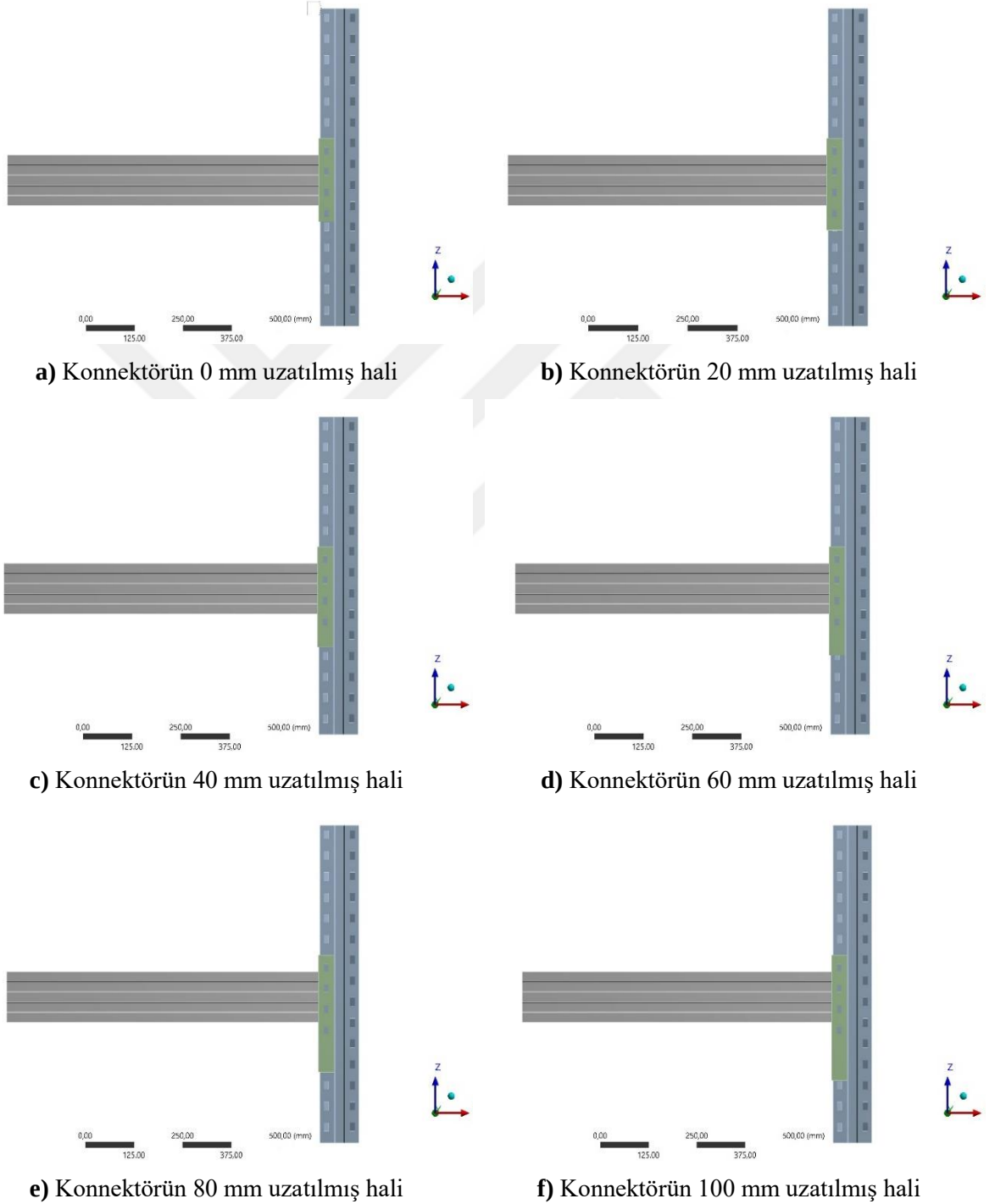
Şekil 44. Kirişin konnektördeki yatay konumunun değiştirildiği model detayları

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme

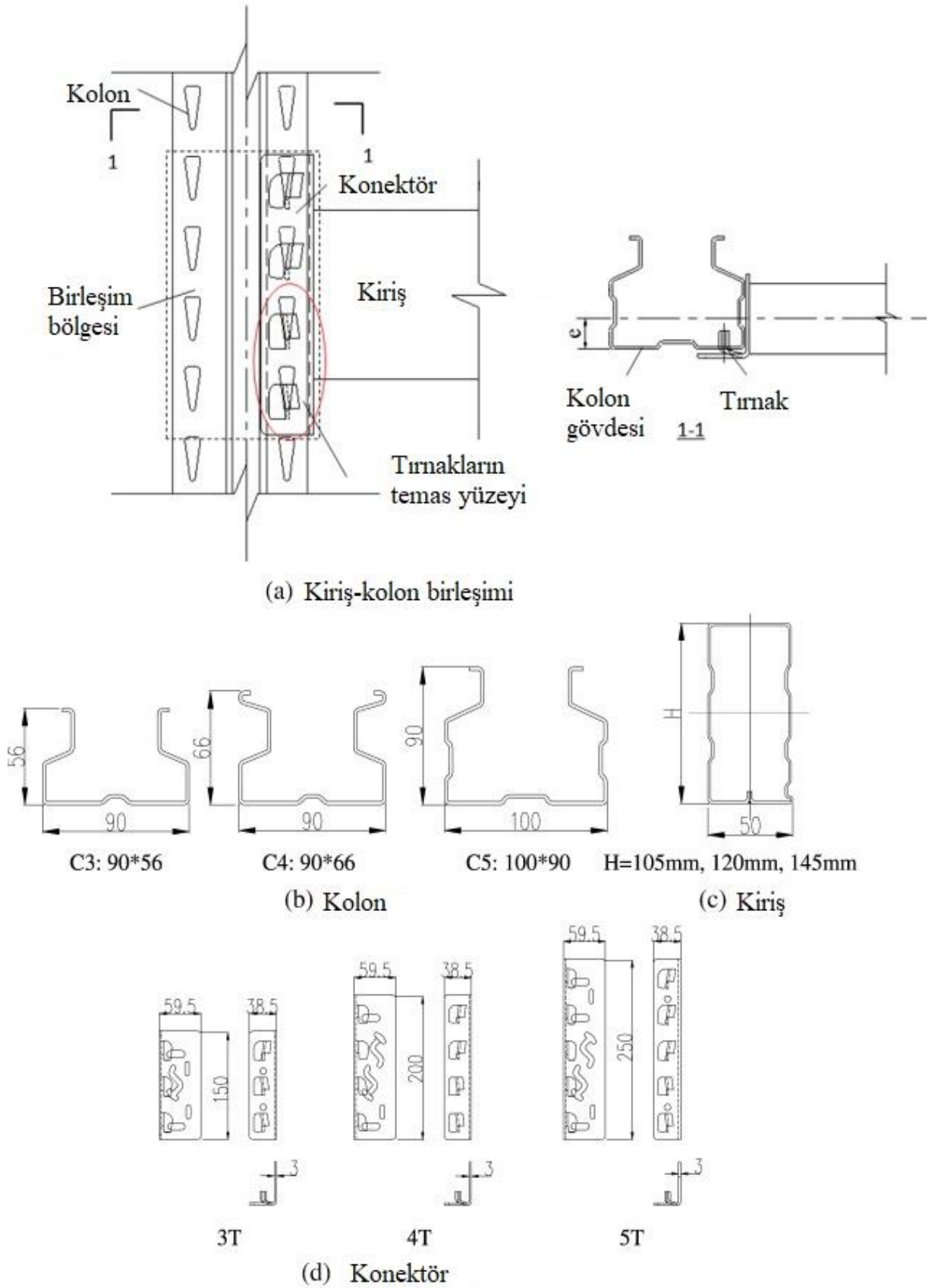
Zhao vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, deney numuneleri kiriş, kolon ve konnektörden oluşmaktadır. Kolon kesitleri C4* ve C5* olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları sırası ile 2,0 mm ve 2,5 mm'dir. Kirişler ise B105 ve B120 olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,5 mm'dir. Kiriş isimlendirmesindeki B105 için sırası ile B kirişi (*beam*), 105 ise mm cinsinden kiriş yüksekliğini temsil etmektedir. Son olarak konnektörler ise tırnak sayısına göre 3T ve 4T olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 3,0 mm'dir. Kiriş-kolon birleşim detayı Şekil 46.a'da, kolon en kesitleri Şekil 46.b'de, kiriş en kesitleri Şekil 46.c'de, konnektör en kesitleri ise Şekil 46.d'de verilmiştir. Tablo 5'te bu çalışmada kullanılan kolon en kesitlerinin detayları, Tablo 6'da kiriş en kesitlerinin detayları ve Tablo 7'de ise konnektör en kesitlerinin detayları sunulmuştur.

Shah vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, deney numuneleri kiriş, kolon ve konnektörden oluşmaktadır. Kolon kesitleri 2.6U ve 2U olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları sırası ile 2,6 mm ve 2,0 mm'dir. Kirişler ise 110B ve 125B olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,5 mm'dir. Kiriş isimlendirilmesindeki 110B için sırası ile "B" kirişi

(beam), 110 ise mm cinsinden kiriş yüksekliğini temsil etmektedir. Son olarak konnektörler ise tırnak sayısına göre 4T olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 4,0 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan kolon en kesitleri Şekil 47.a'da, kiriş en kesitleri Şekil 47.b'de ve son olarak konnektör en kesitleri Şekil 47.c'de verilmiştir. Tablo 8'de bu çalışmada kullanılan kolon en kesitlerinin detayları, Tablo 9'da kiriş en kesitlerinin detayları ve Tablo 10'da ise konnektör en kesitlerinin detayları sunulmuştur.



Şekil 45. Konnektör boyunun aşağı doğru uzatıldığı model detayları



Şekil 46. Zhao vd. (2017) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri

Tablo 5. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları

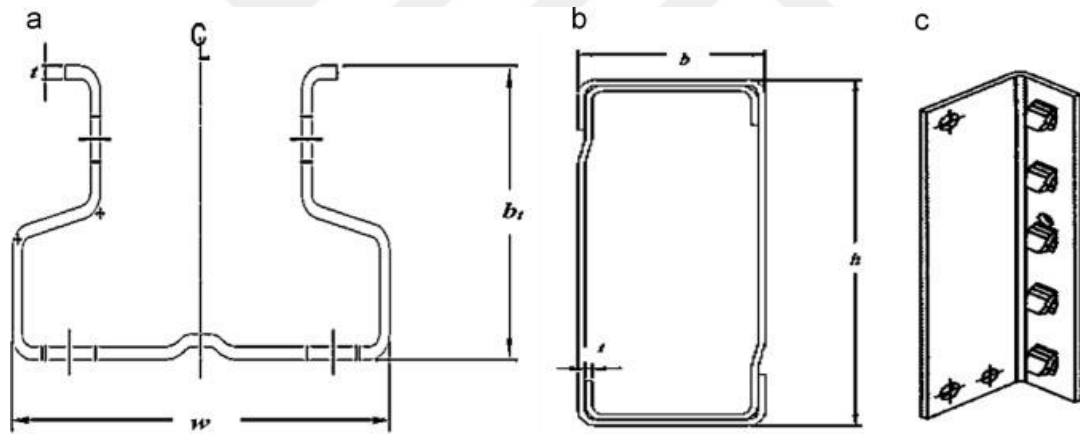
Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kolon boyu (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)
1	C4*	2,0	760	90	66
2	C5*	2,5	760	100	90

Tablo 6. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kiriş boyu (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
1	B105	1,5	800	50	105
2	B120	1,5	800	50	120

Tablo 7. Zhao vd. (2017) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Ön genişlik (mm)	Yan genişlik (mm)
1	3T	3,0	150	59,5	38,5
2	4T	3,0	200	59,5	38,5

**Şekil 47.** Shah vd. (2016) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri**Tablo 8.** Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kolon boyu (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)
1	2,6U	2,6	500	113,1	68,3
2	2U	2,0	500	112,2	67,6

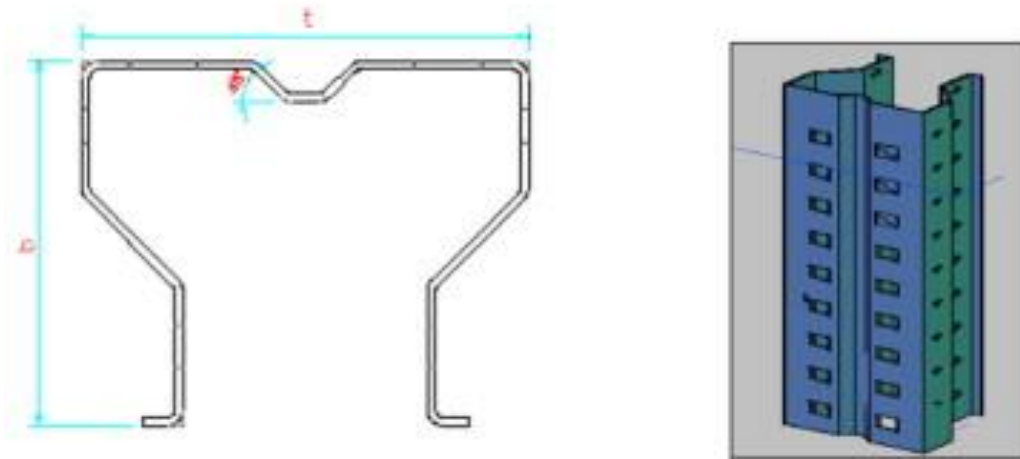
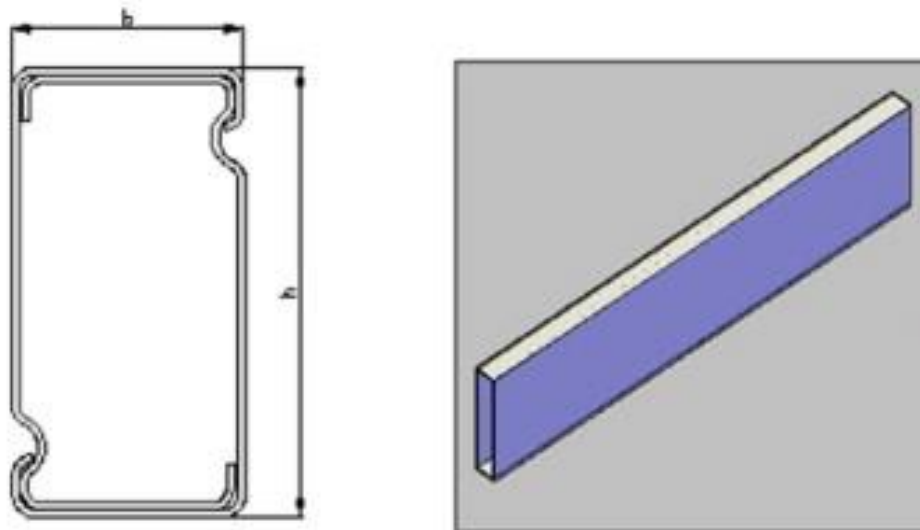
Tablo 9. Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları

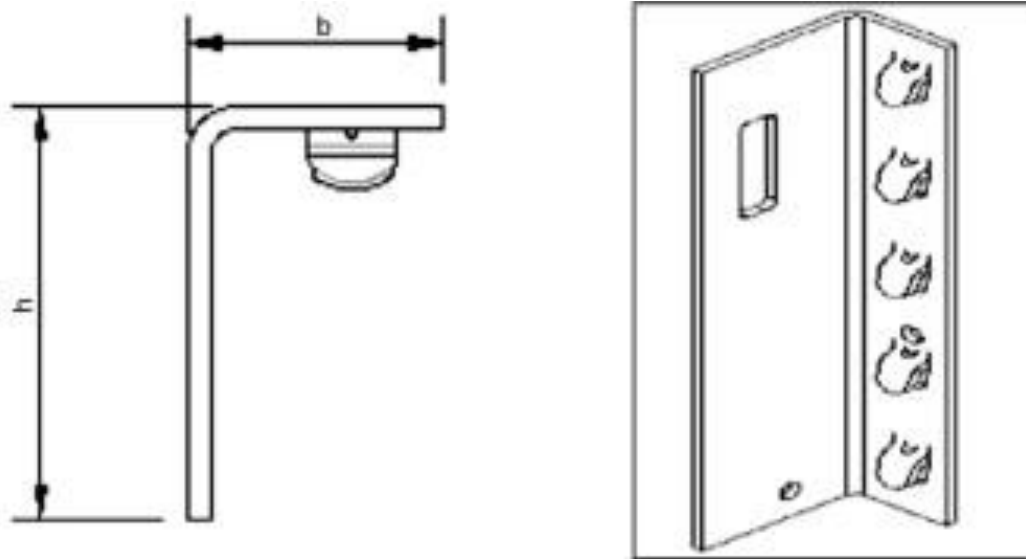
Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kiriş boyu (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
1	110B	1,5	900	40	110
2	125B	1,5	900	40	125

Tablo 10. Shah vd. (2016) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Ön genişlik (mm)	Yan genişlik (mm)
1	4T	4,0	200	60	38,5

Prabha vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kiriş-kolon birleşim deneyi yapılmıştır. Kolon kesitleri 2U olarak isimlendirilmiş olup et kalınlığı 2,0 mm'dir. Kiriş kesitleri ise 100BD ve 125BD olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,6 mm'dir. Kiriş isimlendirmesindeki 100BD için BD kirişi (*beam*), 100 ise mm cinsinden kiriş yüksekliğini temsil etmektedir. Son olarak konnektörler için ise 4L'deki 4 tırnak sayısını belirtmekte olup konnektörün et kalınlığı 3,5 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan kolon en kesitleri Şekil 48'de, kiriş en kesitleri Şekil 49'da ve son olarak konnektör en kesitleri Şekil 50'de verilmiştir. Tablo 11'de bu çalışmada kullanılan kolon en kesitlerinin detayları, Tablo 12'de kiriş en kesitlerinin detayları ve Tablo 13'te ise konnektör en kesitlerinin detayları sunulmuştur.

**Şekil 48.** Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan kolon en kesitleri**Şekil 49.** Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan kiriş en kesitleri



Şekil 50. Prabha vd. (2010) çalışmasında kullanılan konnektör en kesitleri

Tablo 11. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kolon boyu (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)
1	2U	2,0	500	110	90

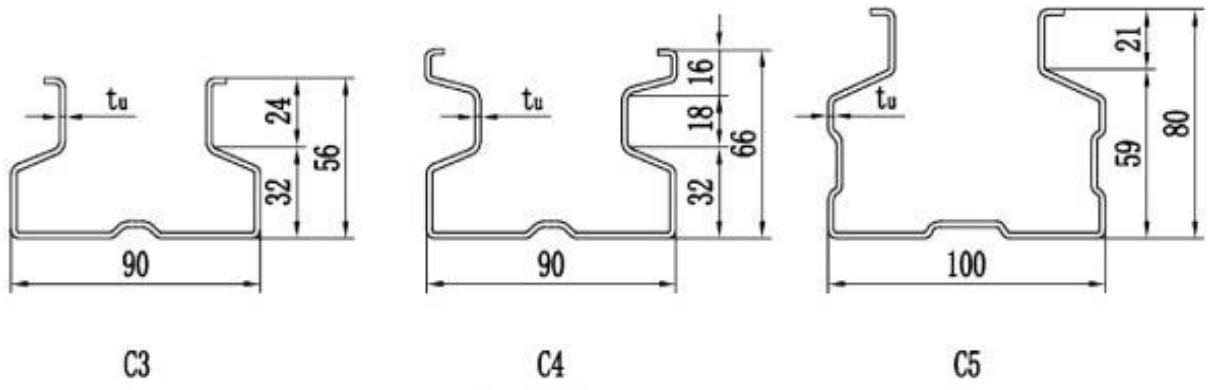
Tablo 12. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kiriş boyu (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
1	100B	1,6	1000	50	100
2	125B	1,6	1000	50	125

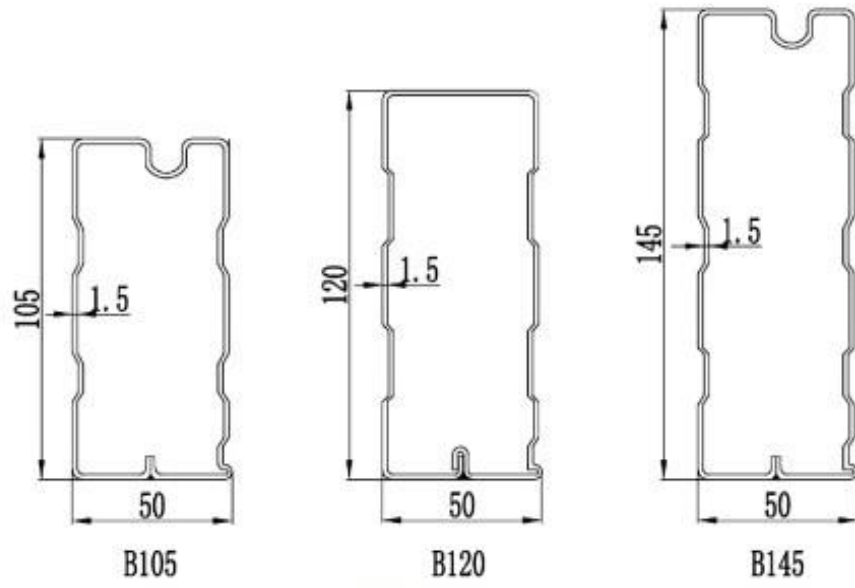
Tablo 13. Prabha vd. (2010) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Ön genişlik (mm)	Yan genişlik (mm)
1	4L	3,5	200	64	39,5

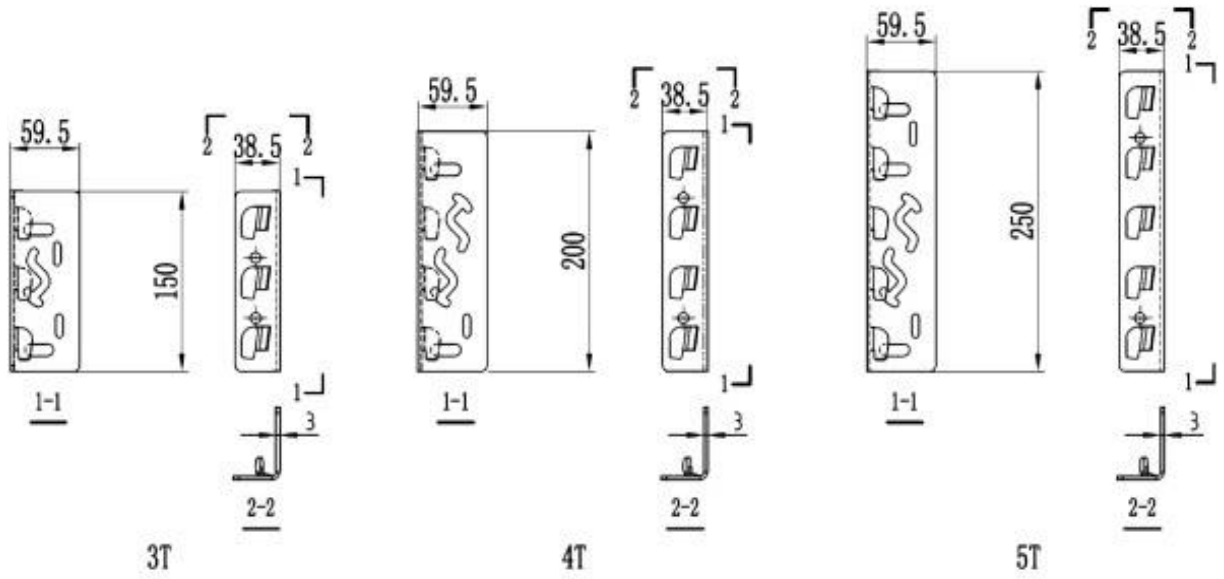
Zhao vd. (2014) tarafından kiriş-kolon birleşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kolon kesitleri C4 ve C5 olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,8 mm'dir. Kirişler ise B105, B120 ve B145 olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,5 mm'dir. Kiriş isimlendirmesindeki B105 için B kirişi (*beam*), 105 ise mm cinsinden kiriş yüksekliğini temsil etmektedir. Son olarak konnektörler ise tırnak sayısına göre 3T ve 4T olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 3,0 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan kolon en kesitleri Şekil 51.a'da, kiriş en kesitleri Şekil 51.b'de ve son olarak konnektör en kesitleri Şekil 51.c'de verilmiştir. Tablo 14'te bu çalışmada kullanılan kolon en kesitlerinin detayları, Tablo 15'te kiriş en kesitlerinin detayları ve Tablo 16'da ise konnektör en kesitlerinin detayları sunulmuştur.



a) Kolon



b) Kiriş



c) Konektör

Şekil 51. Zhao vd. (2014) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri

Tablo 14. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kolon boyu (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)
1	C4	1,8	760	90	66
2	C5	1,8	760	100	80

Tablo 15. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları

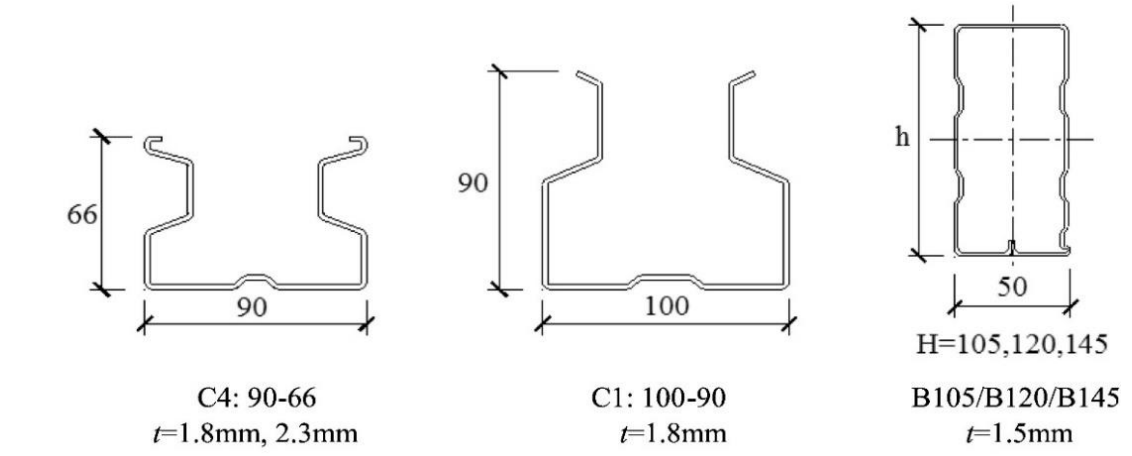
Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kiriş boyu (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
1	B105	1,5	800	50	105
2	B120	1,5	800	50	120
3	B145	1,5	800	50	145

Tablo 16. Zhao vd. (2014) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Ön genişlik (mm)	Yan genişlik (mm)
1	3T	3,0	150	59,5	38,5
2	4T	3,0	200	59,5	38,5

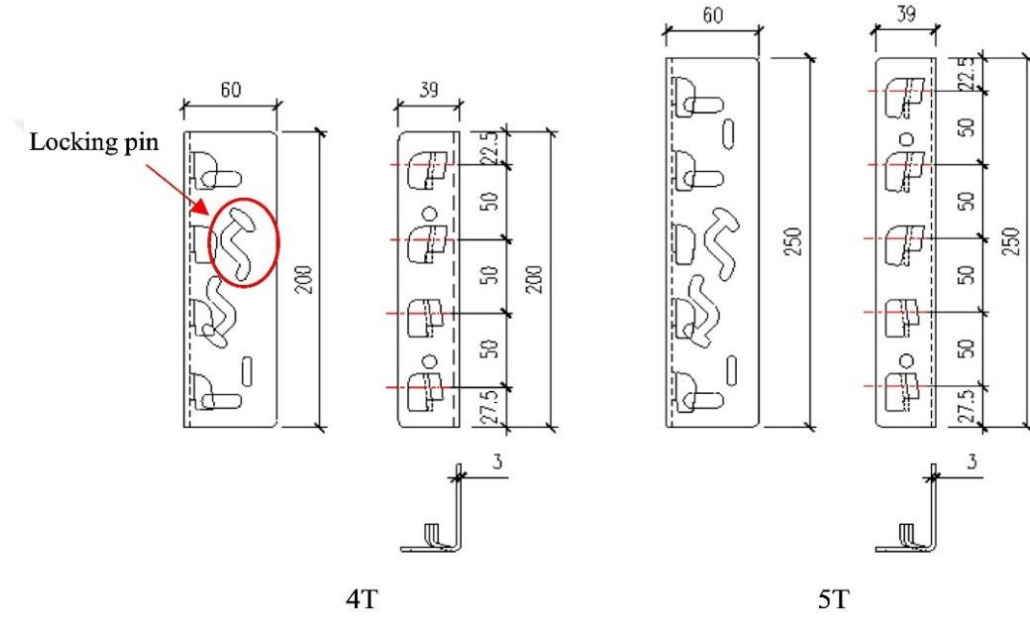
Zhao vd. (2018) tarafından sunulan çalışmada, kolon kesitleri 1.8C1 ve 2.3C4 olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları sırası ile 1,8 mm ve 2,3 mm'dir. Kirişler ise B105 ve B120 olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 1,5 mm'dir. Kiriş isimlendirmesindeki B105 için B kirişi (*beam*), 105 ise mm cinsinden kiriş yüksekliğini temsil etmektedir. Son olarak konnektörler ise tırnak sayısına göre 4T ve 5T olarak isimlendirilmiş olup et kalınlıkları 3,0 mm'dir. Bu çalışmada kullanılan kolon en kesitleri Şekil 52.a'da, kiriş en kesitleri Şekil 52.b'de, konnektör en kesitleri Şekil 52.c'de ve kiriş-kolon birleşimi Şekil 52.d'de verilmiştir. Tablo 17'de bu çalışmada kullanılan kolon en kesitlerinin detayları, Tablo 18'de kiriş en kesitlerinin detayları ve Tablo 19'da ise konnektör en kesitlerinin detayları sunulmuştur.

Geçmiş çalışmalardan alınan bu modeller üzerinde ilk olarak doğrusal çözümleme gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, von-Mises gerilmeleri malzemenin akma dayanımı aştığı için büyük sapmalar seçeneği (*large deflection*) aktif hale getirilerek doğrusal olmayan sonlu eleman çözümleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda tekil kuvvetin uygulandığı noktalar değişkenlik göstermektedir. Zhao vd. (2017) çalışmasında kuvvetin uygulandığı noktanın konnektöre olan uzaklığı 720 mm, Shah vd. (2016) çalışmasında 470 mm, Prabha vd. (2010) çalışmasında 470 mm, Zhao vd. (2014) çalışmasında 400 mm ve Zhao vd. (2018) çalışmasında ise 400 mm'dir.

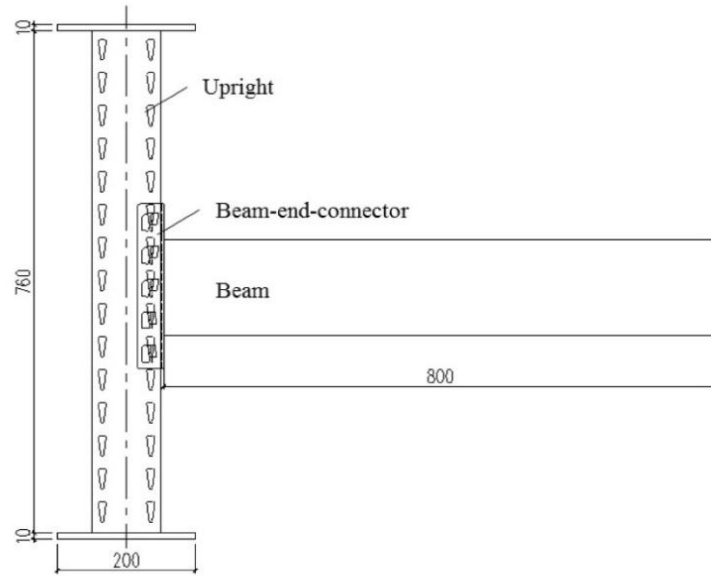


(a) Kolon

(b) Kiriş



(c) Konektör



(d) Kiriş-kolon birleşimi

Şekil 52. Zhao vd. (2018) çalışmasında kullanılan deney numunelerinin en kesitleri

Tablo 17. Zhao vd. (2018) Çalışmasında Kullanılan Kolon En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kolon boyu (mm)	Genişlik (mm)	Derinlik (mm)
1	1,8C1	1,8	760	100	90
2	2,3C4	2,3	760	90	66

Tablo 18. Zhao vd. (2018) Çalışmasında Kullanılan Kiriş En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Kiriş boyu (mm)	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
1	B105	1,5	800	50	105
2	B120	1,5	800	50	120
3	B145	1,5	800	50	145

Tablo 19. Zhao vd. (2018) Çalışmasında Kullanılan Konnektör En Kesit Detayları

Deney No	Numune adı	Et kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)	Ön genişlik (mm)	Yan genişlik (mm)
1	4T	3,0	200	59,5	38,5
2	5T	3,0	250	59,5	38,5

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında, kiriş-kolon birleşim davranışı ve kolonların aksel basınç altındaki davranışı hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir.

Deneysel inceleme safhasında kiriş-kolon birleşim davranışını incelemek üzere kullanılan farklı kolon kesitlerinin yanı sıra kirişin konnektör üzerindeki düşey konumu değiştirilmiş, yüksekliği farklı kirişler ele alınmış ve kolonların ağız açıklığına bulon yerleştirilerek yapısal davranış irdelenmiştir. Ayrıca deneylerden alınan veriler kullanılarak analitik bir yaklaşımla kiriş-kolon davranışı modellenmiştir.

Kolon aksel basınç deneylerinde ise kritik burkulma yükü ve göçme modları incelenmiş olup yine kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilmesi halinde davranıştaki değişim araştırılmıştır. Ayrıca kiriş-kolon birleşim deneylerinde kullanılan kolonlar aksel basınç deneyine tabi tutularak, özellikle tırnak bağlantısı sebebiyle gövdedeki boşluklar çevresinde ortaya çıkan hasarın taşıma kapasitesinde sebep olduğu kayıplar değerlendirilmiştir.

Sayısal çözümleme aşamasında ise kirişin konnektör üzerindeki düşey konumunun yanı sıra yatay konumu da değiştirilerek incelemeler yapılmış, ayrıca konnektör boyu aşağı yönde uzatılarak yapısal davranışa katkısı araştırılmıştır. Sayısal çözümleme sonuçları doğrultusunda kirişin yatay doğrultudaki konum değişikliği ve konnektör boyunun aşağı yönde uzatılması halinde moment taşıma kapasitesinde değişiklik olmazken, kirişin konnektördeki konumu düşey doğrultuda değiştiğinde moment taşıma kapasitesinin dikkate değer seviyede değiştiği gözlenmiştir.

Deneysel İnceleme Sonuçları

Kiriş-kolon birleşim davranışı

Kiriş-kolon birleşim davranışı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemek üzere tasarım değişkenleri; farklı kolon kesitleri ve et kalınlığı, kirişin konnektör üzerinde düşey doğrultudaki konumu, kiriş yüksekliği ve kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilmesi olarak belirlenmiştir. Dört ayrı kolon kesiti kullanılmış olup deney numunesi isimlendirmesinde C1, C2, C3 ve C4 kesit tiplerinin önünde kolon et kalınlığı değeri bulunmaktadır. Numune isimlendirmesinin detayları, “Materyal ve Metot” bölümünde Tablo 2’de sunulmuştur.

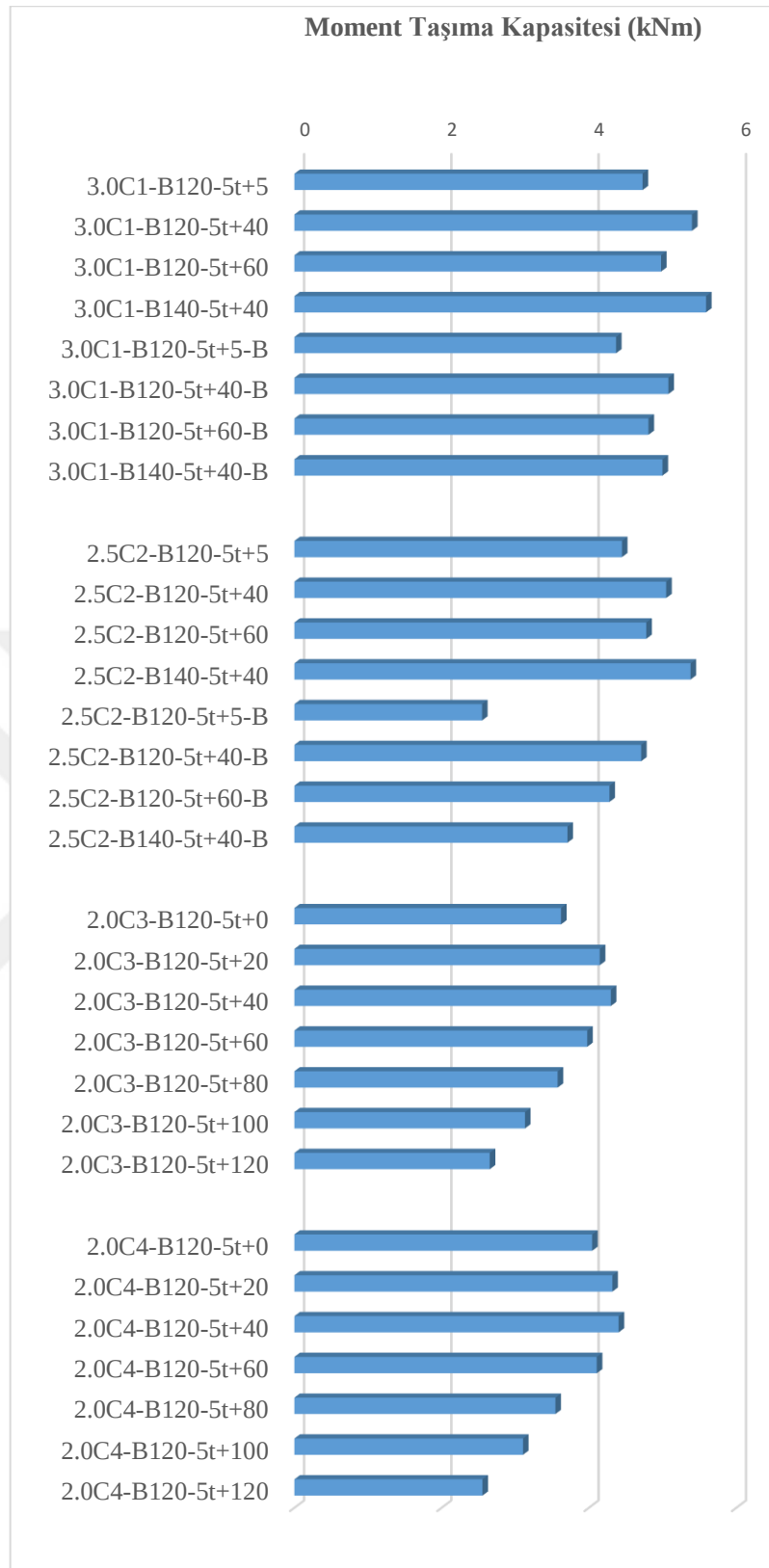
Tekdüze yükleme altında konsol kiriş yöntemiyle gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen moment taşıma kapasitesi, başlangıç dönme rijitliği, dönme kapasitesi ve süneklik

katsayısı değerleri Tablo 20'de verilmiştir. En yüksek moment değeri 3.0C1-B140-5T+40 numunesi için 5,59 kNm, en düşük değer ise 2.5C2-B120-5T+5-B bağlantısı için 2,55 kNm olarak kaydedilmiştir. Başlangıç dönme rijitliği ve süneklik açısından 3.0C1-B120-5T+5 numunesi en yüksek seviyeye ulaşmıştır. DeneySEL sonuçların detaylıca değerlendirilmesinden önce, kolon et kalınlığının artmasının beklendiği üzere yapısal başarıımı yükselttiği fakat kolon ağız açıklığına bulon montajının beklenmeyen davranışa ve oldukça düşük başarıma sebep olduğu açıkça görülmektedir.

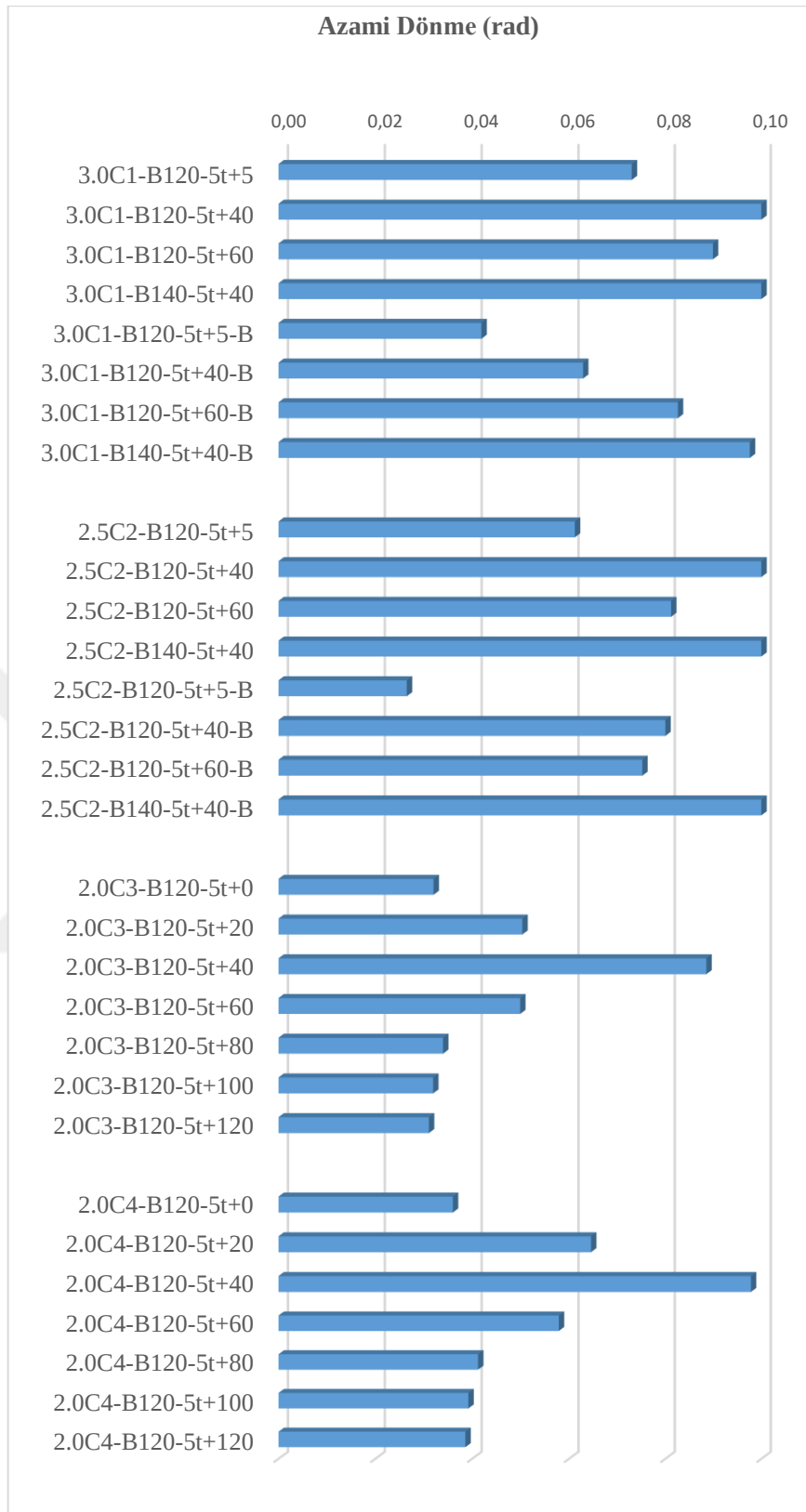
Kiriş-kolon birleşim deneylerinin kendi içerisinde karşılaştırmalarının yapılabilmesi için maksimum moment değerleri Şekil 53'te, maksimum dönme değerleri Şekil 54'te, dönme rijitliği değerleri Şekil 55'te ve süneklik değerleri Şekil 56'da verilmiştir.

Tablo 20. C1, C2, C3 ve C4 Kesitli Deney Sonuçlarının Özeti

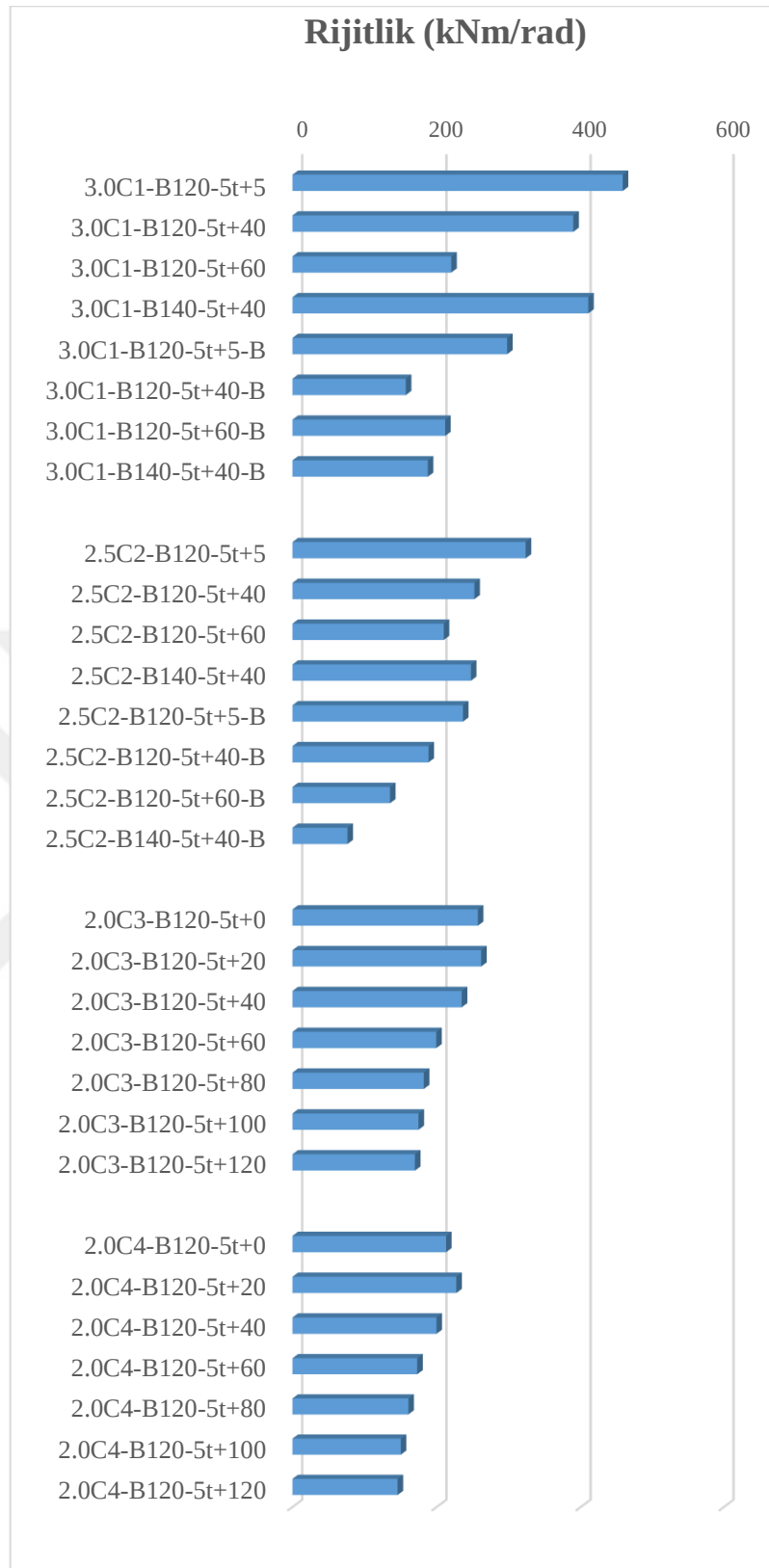
Deney No	Deney Adı	Maksimum Moment (kN·m)	Dönme Rijitliği (kN·m/rad)	Maksimum Dönme (rad)	Süneklik ($\mu=R_{max}/R_{ni}$)
1	3.0C1-B120-5T+5	4,73	458,5	0,073	13,60
2	3.0C1-B120-5T+40	5,40	389,6	0,110	11,46
3	3.0C1-B120-5T+60	4,98	220,3	0,090	6,63
4	3.0C1-B140-5T+40	5,59	410,4	0,122	13,13
5	3.0C1-B120-5T+5-B	4,37	297,8	0,042	1,46
6	3.0C1-B120-5T+40-B	5,08	157,2	0,063	1,41
7	3.0C1-B120-5T+60-B	4,81	211,9	0,083	4,57
8	3.0C1-B140-5T+40-B	5,00	187,8	0,098	5,65
9	2.5C2-B120-5T+5	4,45	323,5	0,061	8,67
10	2.5C2-B120-5T+40	5,05	252,4	0,101	7,80
11	2.5C2-B120-5T+60	4,78	209,9	0,081	5,79
12	2.5C2-B140-5T+40	5,38	247,6	0,115	7,94
13	2.5C2-B120-5T+5-B	2,55	236,6	0,027	3,79
14	2.5C2-B120-5T+40-B	4,71	188,7	0,080	3,68
15	2.5C2-B120-5T+60-B	4,28	135,3	0,075	3,00
16	2.5C2-B140-5T+40-B	3,71	76,4	0,130	2,86
17	2.0C3-B120-5T+0	3,62	257,2	0,032	2,33
18	2.0C3-B120-5T+20	4,15	261,8	0,050	3,26
19	2.0C3-B120-5T+40	4,30	234,8	0,089	4,05
20	2.0C3-B120-5T+60	3,98	199,5	0,050	2,32
21	2.0C3-B120-5T+80	3,58	182,2	0,034	1,56
22	2.0C3-B120-5T+100	3,13	174,9	0,032	1,60
23	2.0C3-B120-5T+120	2,66	169,9	0,031	1,85
24	2.0C4-B120-5T+0	4,05	213,1	0,036	1,93
25	2.0C4-B120-5T+20	4,32	227,3	0,065	3,13
26	2.0C4-B120-5T+40	4,41	199,8	0,098	4,54
27	2.0C4-B120-5T+60	4,11	173,1	0,058	2,14
28	2.0C4-B120-5T+80	3,55	160,8	0,041	1,54
29	2.0C4-B120-5T+100	3,11	150,3	0,039	1,64
30	2.0C4-B120-5T+120	2,56	145,9	0,039	1,87



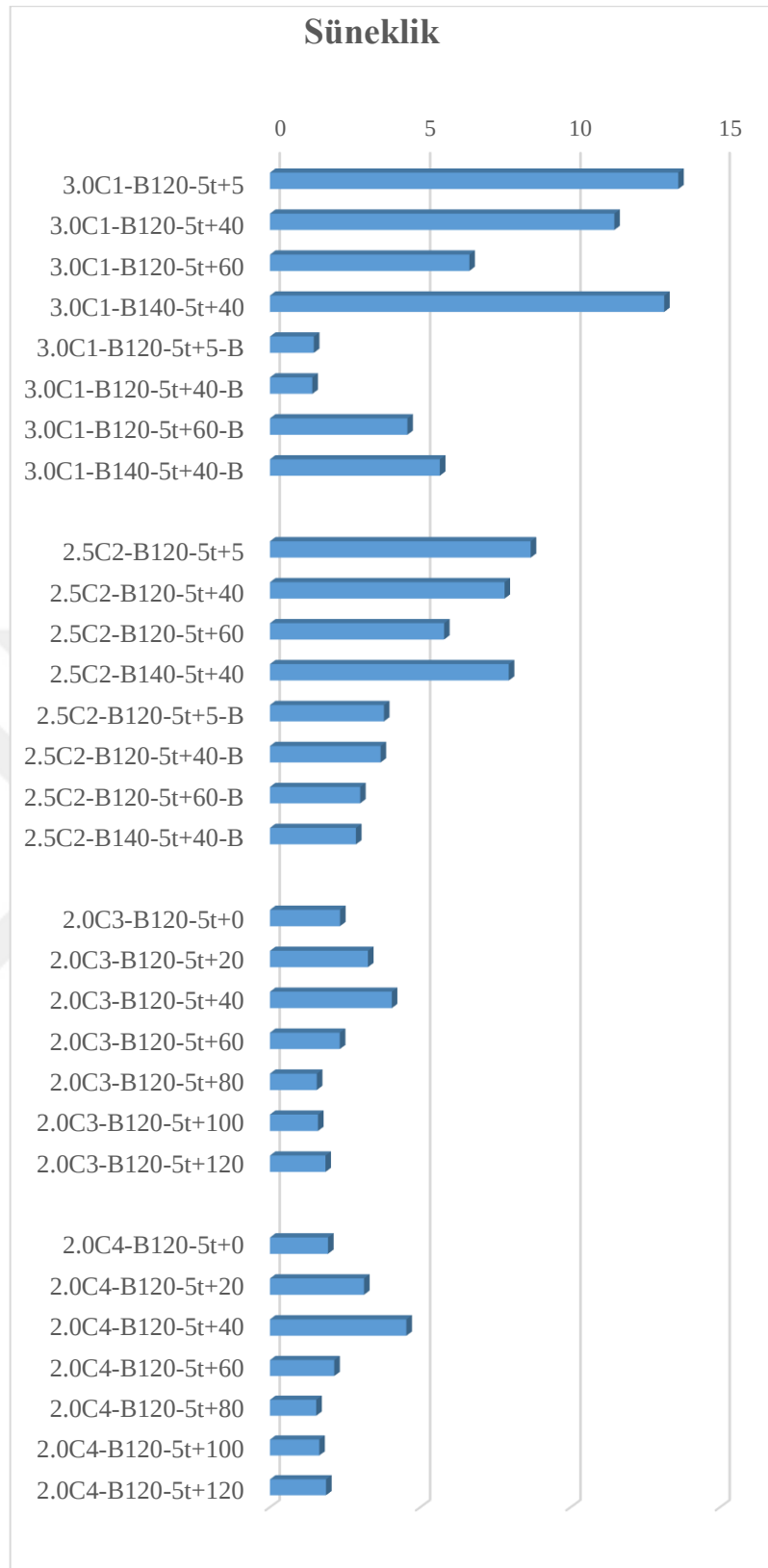
Şekil 53. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için moment taşıma değerleri



Şekil 54. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için azami dönme değerleri



Şekil 55. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için başlangıç dönme rijitliği değerleri



Şekil 56. Kiriş-kolon birleşim deneyleri için süneklik değerleri

Kiriş-kolon birleşim davranışını incelemek üzere gerçekleştirilen deneyler sonucunda, tırnaklarda deformasyon ve kopma, bağlantı elemanının eğilmesi, kolon gövdesinin yırtılması, kaynak bölgesinin kırılması ve kirişte burkulma türevi hasar şeklinde göçme modları gözlenmiştir. Farklı tasarım özelliklerine sahip deney numuneleri, farklı deformasyon modları sergilemiştir.

Deneylerde gözlenen beş farklı göçme modu dâhilinde FM-I koduyla tanımlanan ilk göçme modu, konnektörde ve konnektör tırnaklarında ciddi seviyede deformasyonlar olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 57). FM-II, konnektör üzerindeki deformasyonlar ve konnektör tırnaklarındaki kopma olarak tanımlanmıştır (Şekil 58). FM-III modu, konnektörde nispeten hafif deformasyonlar ve kiriş-konnektör bağlantısının kaynak bölgesinden ayrılmasını temsil etmektedir (Şekil 59). FM-IV modu ise birçok hasarın birleşimi olarak konnektördeki deformasyonlar, konnektör tırnaklarında görülen öncül hasarlar, kiriş-konnektör bağlantısının kaynak bölgesinden ayrılması ve kirişin burkulması şeklinde sınıflandırılmıştır (Şekil 60). Sınıflandırmada son olarak tanımlanan FM-V modunda ise, konnektör tırnaklarındaki yüzeysel deformasyonlar ile konnektör seviyesinde kolona monte edilen bulonların etkisiyle kolon gövdesinin yırtılması gözlenmiştir (Şekil 61).

Bulonsuz bağlantılar için baskın göçme modları FM-I ve FM-II olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle gerilme yığılması sebebiyle tırnaklarda deformasyon ve kopma yanında konnektörde de deformasyon meydana gelmiştir. Daha yüksek değerdeki et kalınlığından dolayı konnektörde önemli bir yırtılmaya rastlanmazken, bazı deney numunelerinde konnektör tırnaklarının kırıldığı görülmüştür.

Ayrıca kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilen kiriş-kolon birleşim numunelerinde sıra dışı göçme modları gözlenmiştir. Deneysel inceleme öncesinde, bulon montajının kolon ağız açıklığında ortaya çıkabilecek genişlemeyi önleyerek birleşim davranışını iyileştirebileceği öngörülmüştür. Bu düşüncenin aksine, birleşimin sünek davranışını kısıtlayarak ve kaynak bölgesinde ayrılmaya, kirişte burkulmaya ve hatta kolon gövdesinde yırtılmaya sebep olduğu tespit edilmiştir (FM-III, -IV ve -V). Ayrıca, konnektörün üst ve alt seviyelerinde yapılan ölçümler, bulon montajının, beklenenin aksine kolon ağız açıklığındaki kapanmayı kısıtlamadığını ortaya koymuştur. Kiriş-kolon birleşim deneylerinde görülen göçme modları Tablo 21'de izah edilmiştir.

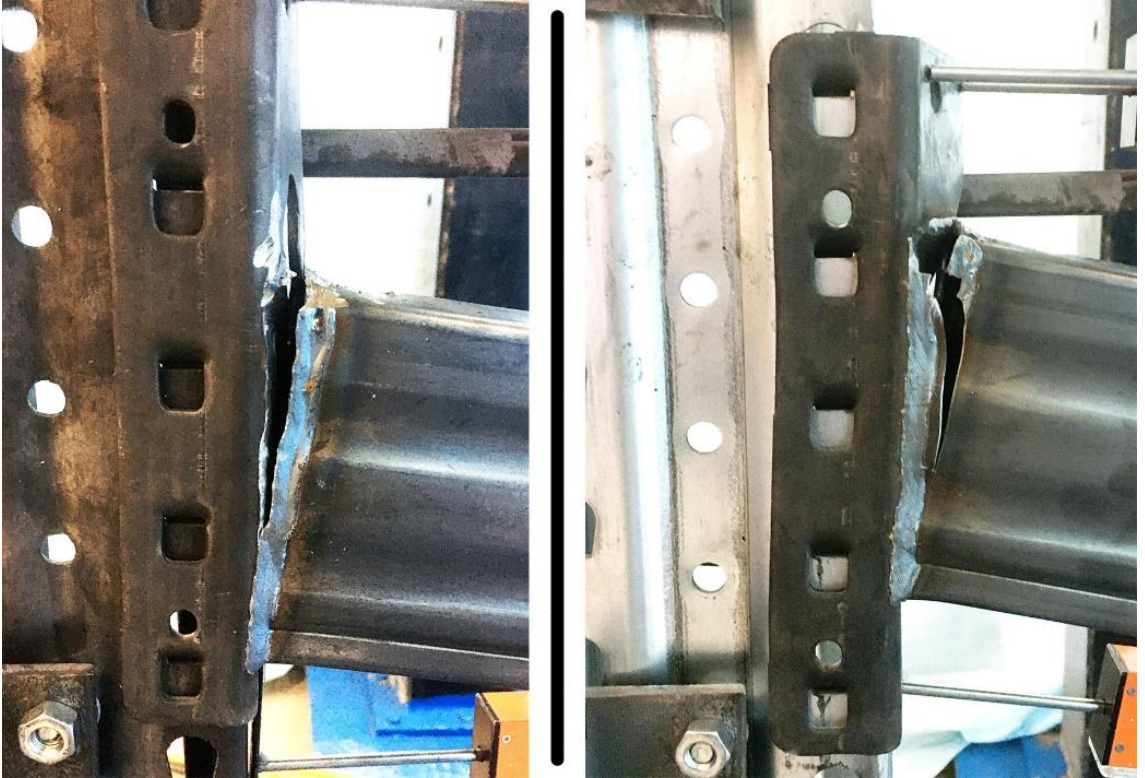
Tablo 21. Kiriş-Kolon Birleşim Deneylerinde Görülen Göçme Modları

Deney No	Test specimen	Failure mode
1	3.0C1-B120-5T+5	FM-I
2	3.0C1-B120-5T+40	FM-II
3	3.0C1-B120-5T+60	FM-I
4	3.0C1-B140-5T+40	FM-II
5	3.0C1-B120-5T+5-B	FM-III
6	3.0C1-B120-5T+40-B	FM-III
7	3.0C1-B120-5T+60-B	FM-IV
8	3.0C1-B140-5T+40-B	FM-II
9	2.5C2-B120-5T+5	FM-I
10	2.5C2-B120-5T+40	FM-I
11	2.5C2-B120-5T+60	FM-I
12	2.5C2-B140-5T+40	FM-II
13	2.5C2-B120-5T+5-B	FM-III
14	2.5C2-B120-5T+40-B	FM-II
15	2.5C2-B120-5T+60-B	FM-I
16	2.5C2-B140-5T+40-B	FM-V

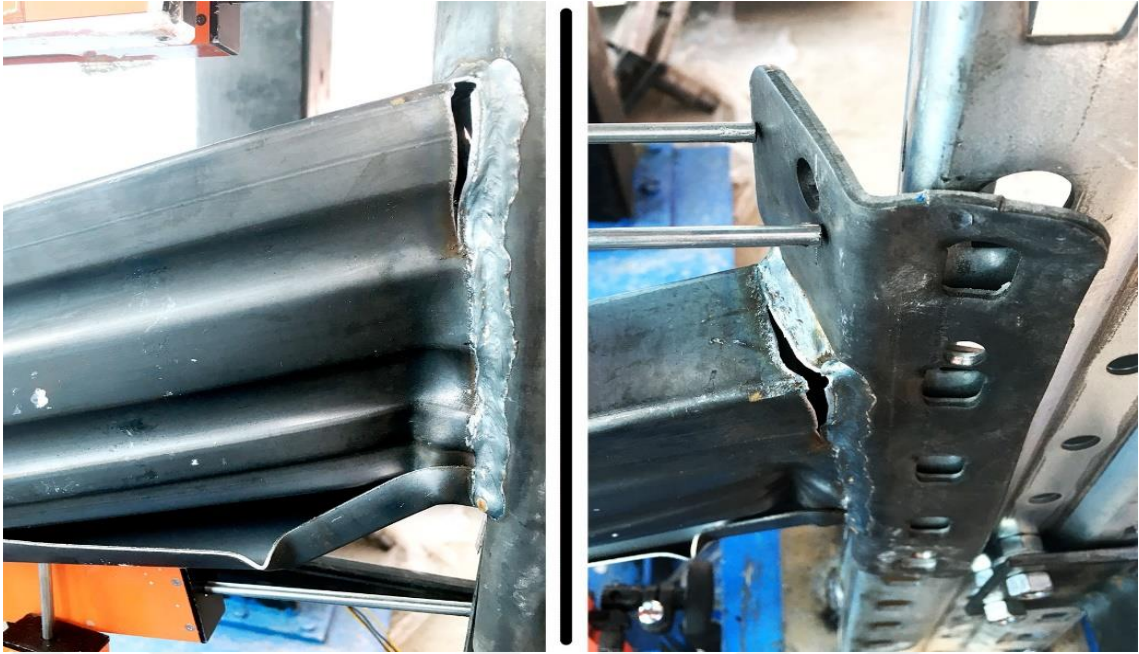
**Şekil 57.** Göçme modu – I (FM – I)



Şekil 58. Göçme modu – II (FM – II)



Şekil 59. Göçme modu – III (FM – III)



Şekil 60. Göçme modu – IV (FM – IV)



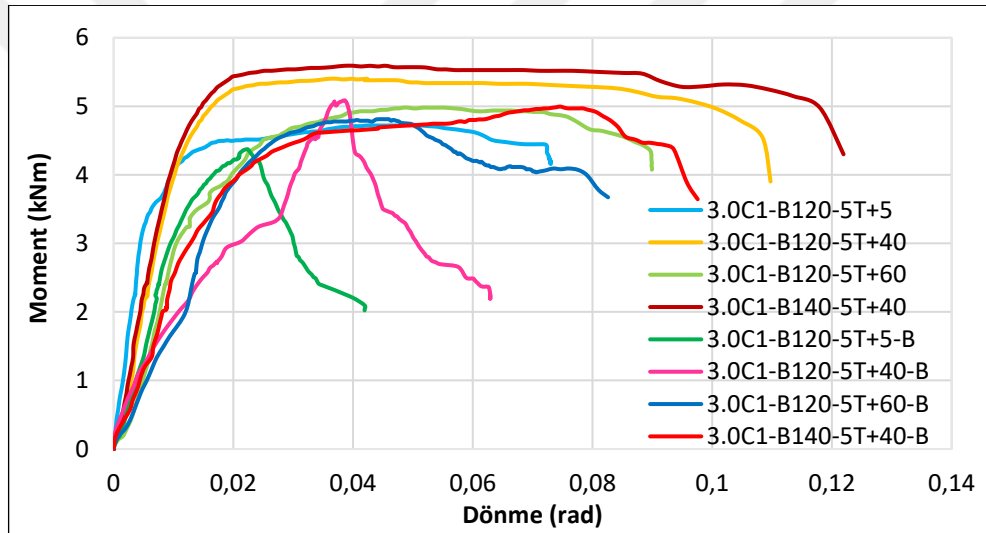
Şekil 61. Göçme modu – V (FM – V)

Zhao vd. (2014) tarafından da öne sürüldüğü üzere, gerçekleştirilen deneylerde ortaya çıkan göçme modlarını en iyi açıklayan parametrenin t_u/t_t oranı olduğu açıkça görülmektedir. Bu bağıntıdaki t_u kolon et kalınlığını, t_t ise konnektör et kalınlığını temsil etmektedir. Kiriş-kolon birleşimlerinde t_u/t_t oranı arttıkça, göçme genel olarak kiriş ve konnektörde meydana gelirken; bu oran azaldıkça kolon ve konnektördeki hasarlar göçme mekanizmasında daha etkili olmaktadır. Farklı nitelikteki kiriş-kolon birleşimleri üzerinde yapılan diğer bazı deneysel araştırmalarda, genel olarak konnektördeki tırnakların göçme mekanizmasında hâkim olduğu ve kolon hasarı sebebiyle ortaya çıkacak göçmenin esasen istenmediği ifade edilmiştir (Aguirre

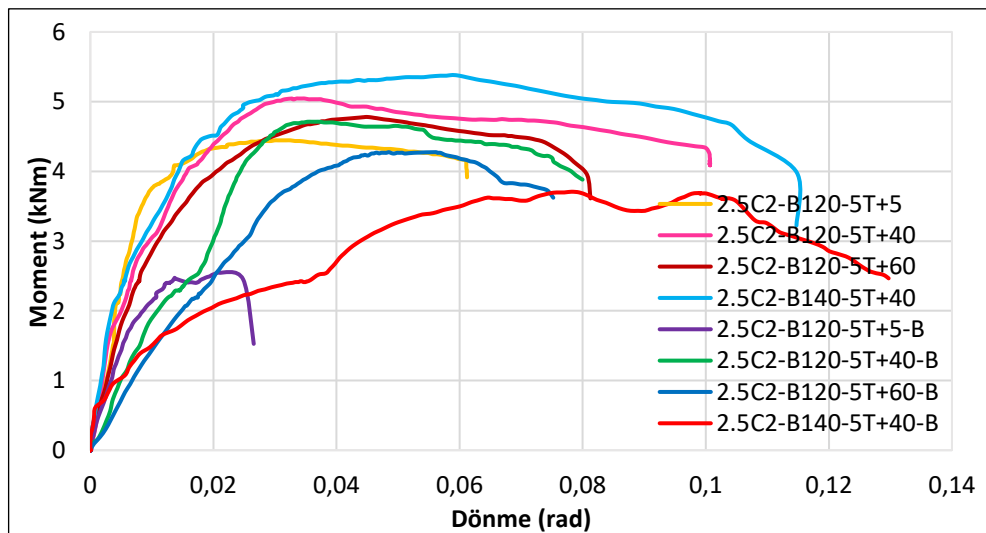
2005). Beşinci göçme modu (FM–V) haricinde, bu çalışmada karşılaşılan tüm göçme modları bu ifadeyi desteklemektedir.

Kiriş konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesi

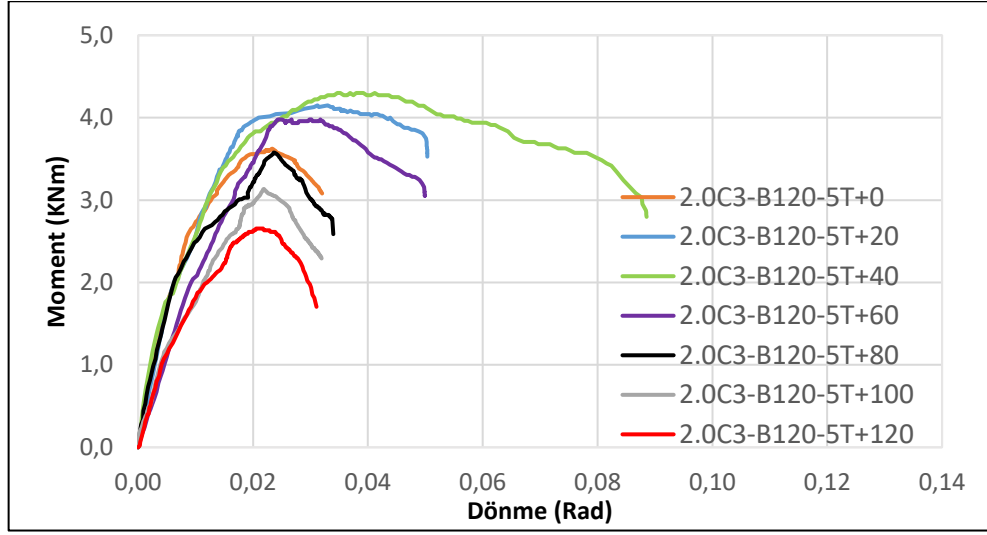
Daha önceden gerçekleştirilmiş olan sayısal çözümlerlerde, kirişin konnektör üzerindeki konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesinin, kiriş-kolon birleşimlerinin davranışında değişime sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçtan yola çıkılarak kiriş-kolon birleşim deneyleri için kirişin konnektöre farklı konumlarda kaynaklandığı deney numuneleri hazırlanmıştır. C1, C2, C3 ve C4 kolon kesitleriyle yapılmış olan kiriş-kolon birleşim deneylerinde moment taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ve azami dönme değerleri incelenmiştir. C1, C2, C3 ve C4 kolonları ile yapılmış olan kiriş-kolon deneylerin moment-dönme eğrileri Şekil 62-65 arasında verilmiştir.



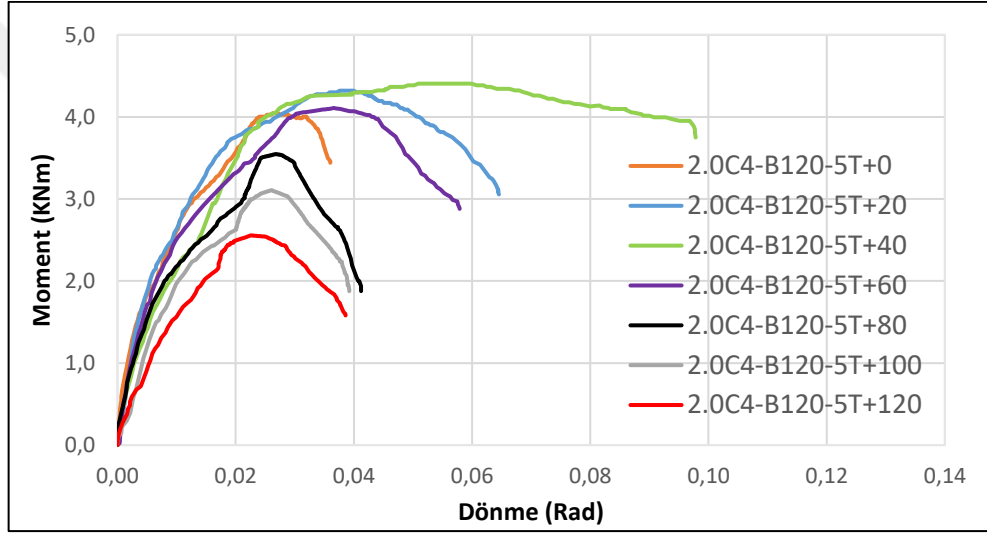
Şekil 62. C1 kesitlerinin moment-dönme eğrileri



Şekil 63. C2 kesitlerinin moment-dönme eğrileri



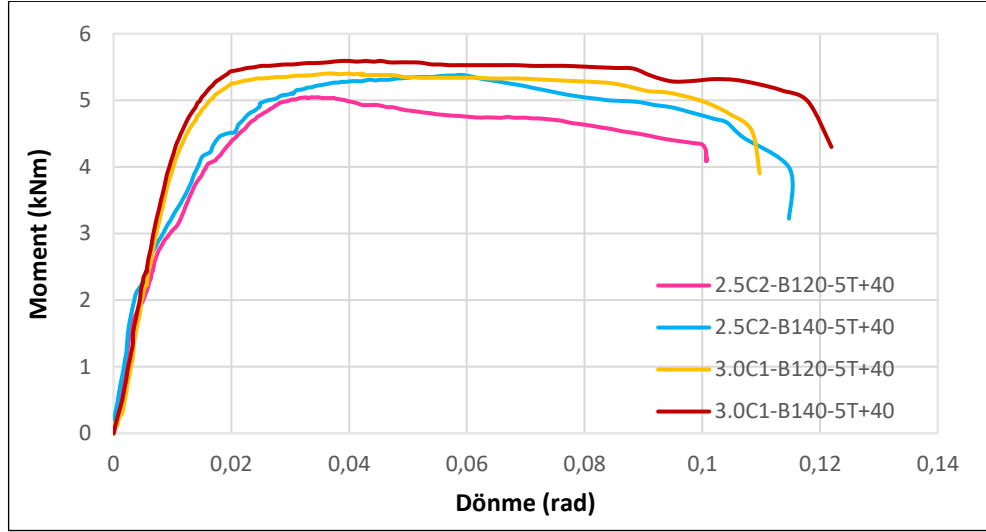
Şekil 64. C3 kesitlerinin moment-dönme eğrileri



Şekil 65. C4 kesitlerinin moment-dönme eğrileri

Kiriş yüksekliğinin değiştirilmesi

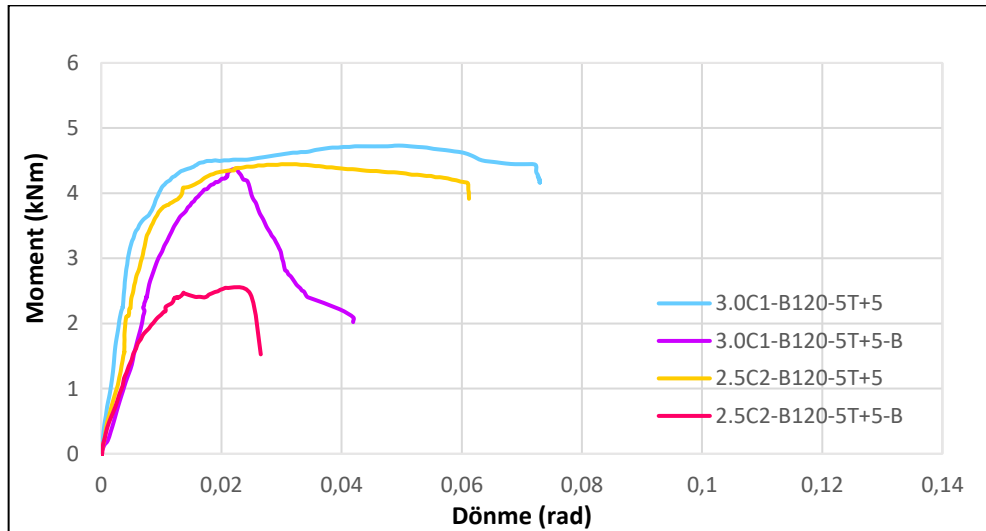
C1 ve C2 kolon kesiti ile gerçekleştirilen kiriş-kolon birleşim deneylerinde, kiriş yüksekliğinin birleşim davranışı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla, 120 mm yüksekliğindeki kirişlere ilaveten 140 mm yüksekliğindeki kirişler de dikkate alınmıştır. Diğer tasarım değişkenlerinden etkilenmemesi için, kiriş düşey doğrultuda konnektörün ortasına kaynaklanmış ve beklendiği üzere kiriş yüksekliği arttıkça moment taşıma kapasitesi ve dönme rijitliği değerlerinde de artış görülmüştür. C1 ve C2 kolon kesitlerinin kullanıldığı deneylere ait moment-dönme grafikleri Şekil 66'da verilmiştir.



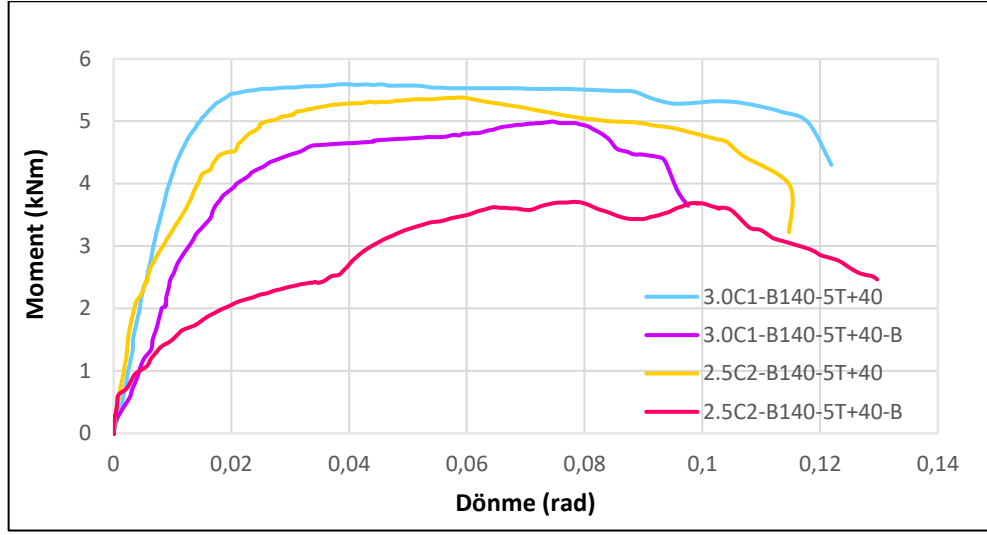
Şekil 66. +40 konumunda kirişlerin moment-dönme eğrileri

Kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilmesi

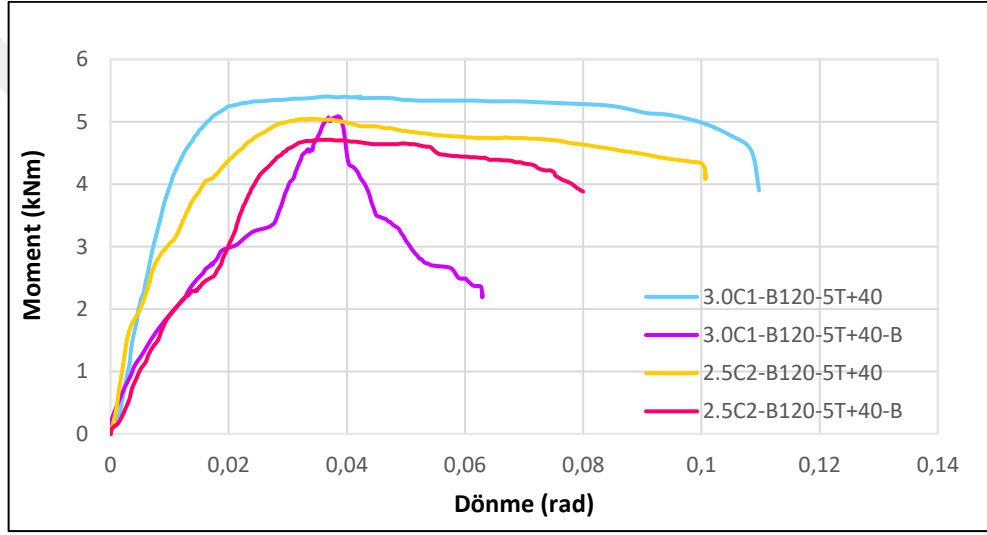
Geçmiş çalışmalarda gerçekleştirilen kiriş-kolon birleşimi deneylerinde, konnektördeki tırnakların kolon yan yüzeyine uyguladığı yük sebebiyle etkisiyle kolon ağızında kapanma ve açılmalar gözlenmiştir. Depolama raf sistemlerindeki çapraz bağlantıların kolonlara montajında kullanılan bulonların etkisini tespit edebilmek maksadıyla konnektörün alt ve üst noktalarına denk gelecek şekilde kolon ağız açıklıklarına çelik bir boru ve boru içine de bulon yerleştirmek suretiyle deneysel inceleme gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bulon montajı sebebiyle moment taşıma kapasitesi ve dönme rijitliği değerlerinde düşüş görülmüştür. C1 ve C2 kolon kesitlerinin kullanıldığı deneylere ait moment-dönme grafikleri Şekil 67-70 arasında verilmiştir.



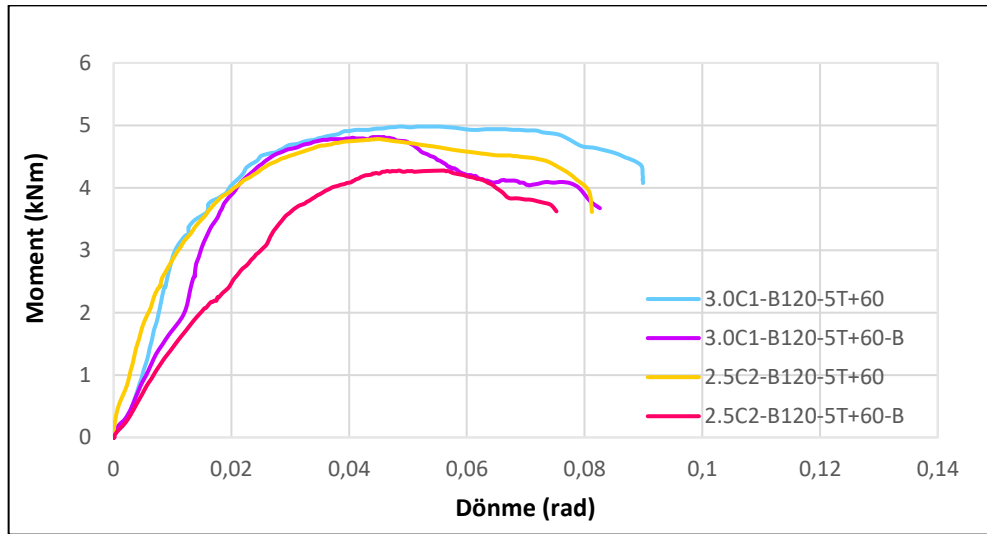
Şekil 67. B120 kirişli birleşimlerin moment-dönme eğrileri



Şekil 68. B140 kirişli birleşimlerin moment-dönme eğrileri



Şekil 69. +40 konumunda bulonlu ve bulonsuz birleşimlerin moment-dönme eğrileri



Şekil 70. +60 konumunda bulonlu ve bulonsuz birleşimlerin moment-dönme eğrileri

Davranışın analitik bir modelle tanımlanması

Soğuk şekillendirilmiş depolama raf sistemlerinde kiriş-kolon bağlantılarının moment-dönme ilişkisi tahmin edilemediği için analitik modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Frye ve Morris (1975) daha önce sıcak haddelenmiş çelik profillerin kullanıldığı birleşimlerde bu ilişkiyi tahmin etmek için analitik bir model önermişlerdir. Bu çalışmada, Frye ve Morris (1975)'in analitik modeli temelinde, soğuk şekillendirilmiş depo raf sistemleri için moment-dönme ilişkisi dört bağıntılı bir metodoloji kapsamında temsil edilmiştir. Başlangıç dönme rijitliği (S_k), moment taşıma kapasitesi (M_u), azami moment seviyesindeki dönme (θ_u) ve moment-dönme eğrisini oluşturan bağıntılar bu modelin bileşenleridir. Moment taşıma kapasitesinin (M_u) analitik olarak türetilmesinden önce, iyi tasarlanmış bir formülasyon oluşturmak için bu çalışmanın deneysel sonuçları kendi içinde karşılaştırılmıştır. Moment taşıma kapasitesinin, diğer tasarım değişkenlerinden ziyade özellikle kolon et kalınlığı (t_u) ve kiriş yüksekliğinden (h_b) birinci derecede etkilendiği görülmüştür. Deneysel sonuçlara uygun olarak, kolon et kalınlığı (t_u) ve kiriş yüksekliği (h_b) kullanılarak ikinci dereceden bir polinom bağıntısı türetilmiştir. İlk iki adımda, moment taşıma kapasitesi (M_u) ve başlangıç dönme rijitliği (S_k) için hesaplamalara sırasıyla λ_M ve λ_S dâhil edilmiştir. Bu katsayılar, bulon montajının etkisini dikkate almak için kullanılmakta olup λ_M katsayısı bulonlu bağlantılar için 0,92, bulonsuz bağlantılar için ise 1,00 olarak belirlenmiştir.

$$M_u = \lambda_M \cdot (6.5 \cdot 10^5 \cdot t_u^2 - 1800 \cdot t_u + 42 \cdot h_b) \quad (\text{kNm}) \quad (22)$$

Başlangıç dönme rijitliği (S_k) için, deneysel sonuçlardan elde edilen başlangıç rijitlik değerleri kullanılarak ve regresyon analizi yapılarak aşağıdaki gibi bir polinom bağıntısı elde edilmekte olup bu adımda konnektörün yüksekliği de (h_c) hesaba dâhil edilmektedir. λ_S katsayısı bulonlu bağlantılarda 0,48, bulonsuz bağlantılarda ise 1,00 olarak belirlenmiştir.

$$S_k = \lambda_S \cdot (41.5 \cdot 10^6 \cdot t_u^2 + 10 \cdot h_b^2 + 40 \cdot h_c) \quad (\text{kNm/rad}) \quad (23)$$

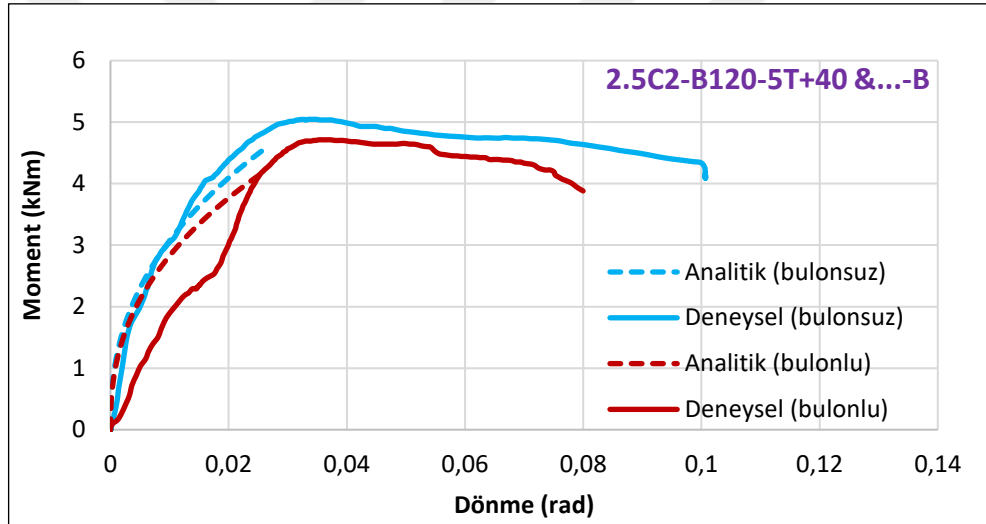
Moment taşıma kapasitesi (M_u) ve başlangıç dönme rijitliği (S_k) oranı kullanılarak azami moment seviyesindeki dönme değerine (θ_u) ulaşılmaktadır.

$$\theta_u = \frac{M_u}{S_k} \quad (\text{rad}) \quad (24)$$

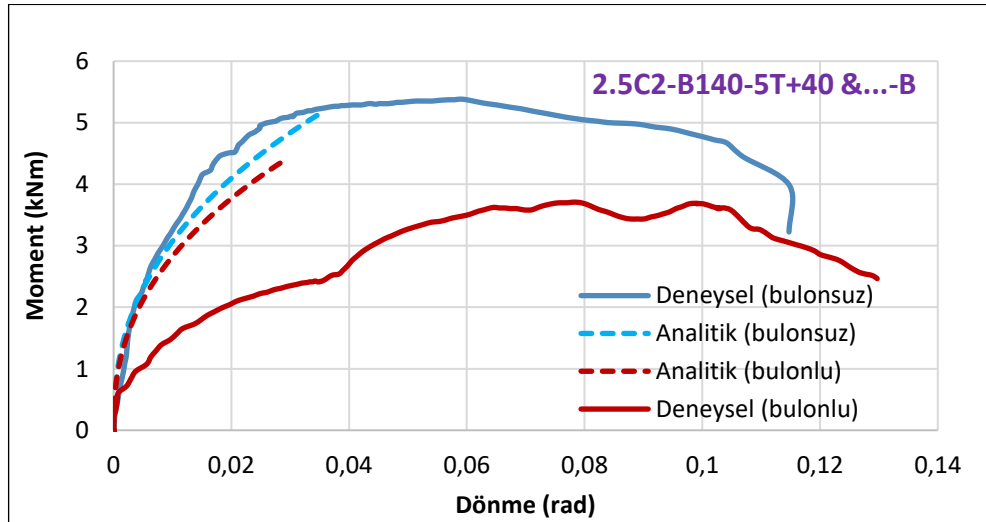
Son olarak, moment-dönme eğrisini çizmek için genel denklem, deneysel verilerin ve analitik sonuçların uyumluluğu dikkate alınarak aşağıdaki analitik model ile temsil edilmektedir. Bu bağıntıdaki M anlık moment değeri, θ_r ise bu andaki dönme değeri olarak tanımlanmaktadır.

$$M = \frac{5.5 * S_k * \theta_r}{\left[1 + \frac{\theta_r^{2.4}}{\theta_u}\right]^{-2.4}} \quad (\text{kNm}) \quad (25)$$

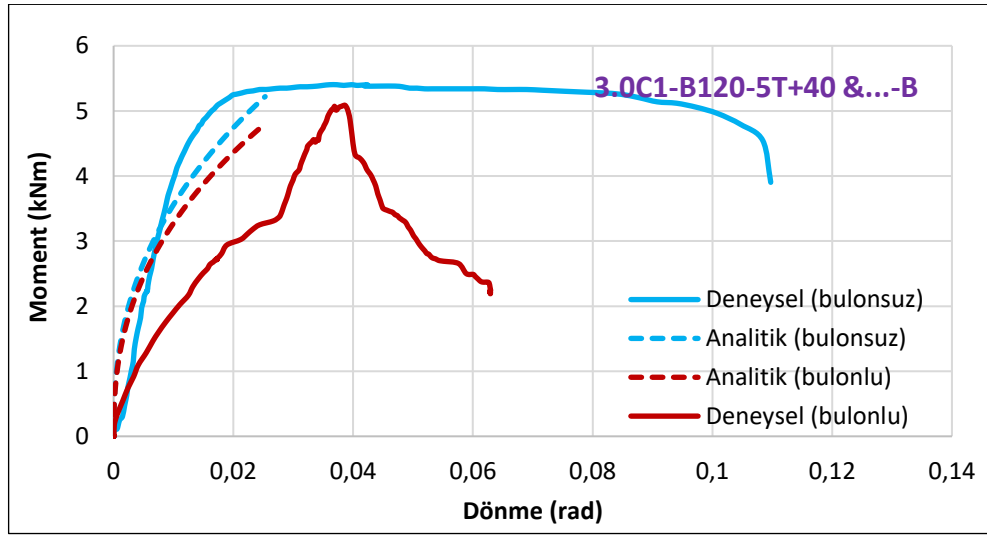
Tüm değişkenler bağıntılardaki yerlerine yerleştirilerek M_u , S_k ve θ_u değerleri elde edilebilmektedir. Bu analitik modelleme yaklaşımında sıfırdan başlayıp θ_u değerine ulaşılan kadar devam edilerek anlık moment değerleri belirlenmekte ve nihai bağıntı kullanılarak moment-dönme eğrileri oluşturulmaktadır. Birçok tasarım değişkeni içermesine karşın kararlı bir tahmin yöntemi oluşturmak ve metodolojiyi doğrulamak amacıyla kirişin düşey doğrultudaki konumu +40 mm olarak seçilmiştir. Analitik model ile ulaşılan moment-dönme eğrileri, deneysel çıktılarla karşılaştırmalı olarak Şekil 71-76 arasında verilmiş olup eğrinin azami moment seviyesine kadar olan kısmını tahmin etmede kayda değer başarı sergilemiştir. Ek olarak model, başlangıç dönme rijitliğini tahmin etmede de önemli ölçüde başarılı olmuştur. Analitik modelden elde edilen moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerleri ile tahmine dair hata yüzdeleri, deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak Tablo 22'de sunulmuştur.



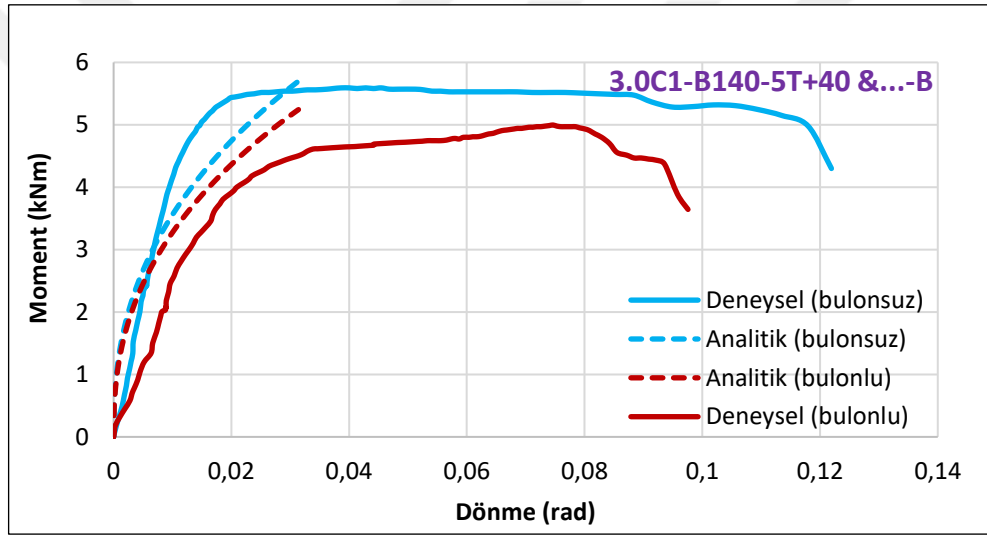
Şekil 71. 2.5C2-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması



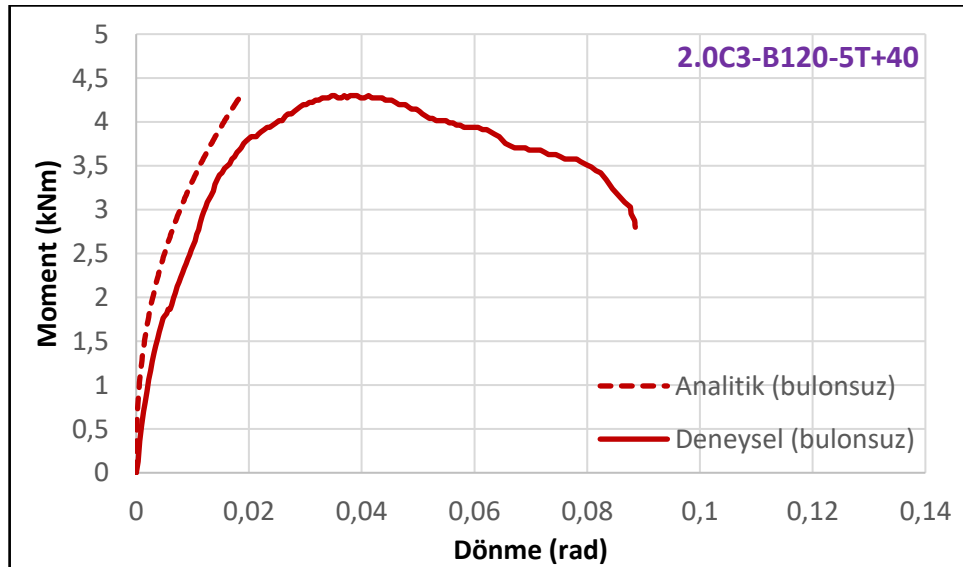
Şekil 72. 2.5C2-B140-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması



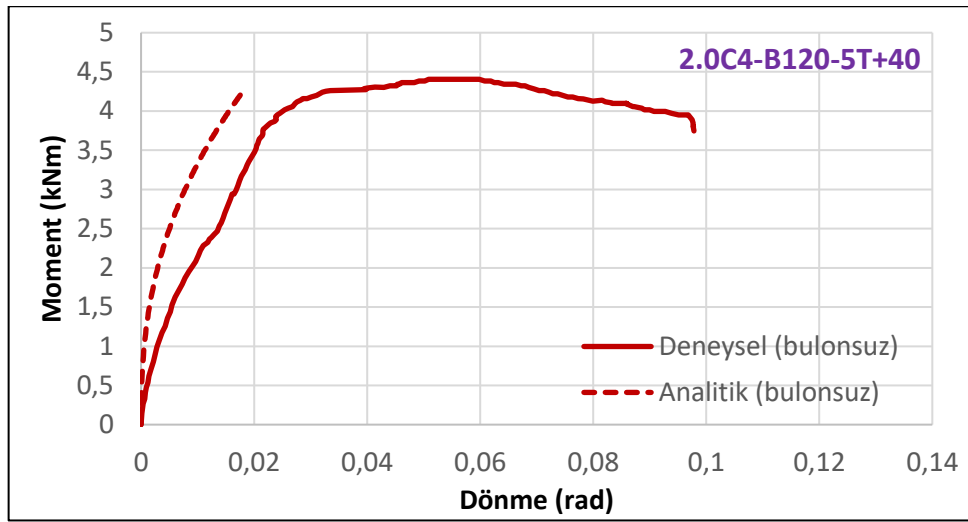
Şekil 73. 3.0C1-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 74. 3.0C1-B140-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 75. 2.0C3-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması



Şekil 76. 2.0C4-B120-5T+40 analitik ve deneysel moment-dönme eğrilerinin karşılaştırması

Tablo 22. Analitik Model İle Elde Edilen Tahmin Sonuçları

Deney No	Deney Adı	Analitik		Deneysel		M_u için tahmini hata (%)	S_k için tahmini hata (%)
		M_u (kNm)	S_k (kNm/rad)	M_u (kNm)	S_k (kNm/rad)		
1	3.0C1-B120-5T+40	5,22	383,2	5,40	389,6	3,3	1,6
2	3.0C1-B140-5T+40	6,03	383,3	5,59	410,4	7,8	6,6
3	2.5C2-B120-5T+40	4,60	269,1	5,05	252,4	8,8	6,6
4	2.5C2-B140-5T+40	5,16	269,2	5,38	247,6	4,1	8,7
5	2.0C3-B120-5T+40	3,84	236,8	4,3	234,8	10,7	0,8
6	2.0C4-B120-5T+40	3,84	236,8	4,4	199,8	12,7	18,5
7	3.0C1-B120-5T+40-B	4,80	183,9	5,08	157,2	5,4	16,9
8	3.0C1-B140-5T+40-B	5,55	183,9	5,00	187,7	10,9	-2,0
9	2.5C2-B120-5T+40-B	4,23	129,2	4,71	188,7	10,1	31,5
10	2.5C2-B140-5T+40-B	4,74	129,2	3,71	76,4	27,9	69,2
Ortalama hata				(bulonsuz)		7,9	7,15
				(tüm numuneler)		10,2	15,8

Bu çalışmadaki analitik model, deneysel sonuçların kendi içinde kararlı olduğunu ve kiriş-kolon birleşimlerinde yapısal davranışın tahmini için bir modelleme yaklaşımının kullanılabileceğini göstermek için geliştirilmiştir. Analitik model kullanılarak elde edilen tahmini moment-dönme eğrileri ve sayısal değerler de kolon ağzı açıklığındaki bulon montajının beklenmeyen davranışlara sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Bulon montajı hariç tutulduğunda azami tahmin hatası moment taşıma kapasitesi (M_u) için %7,94 ve başlangıç dönme rijitliği (S_k) için %7,15'dir. Deneylerin tamamı dikkate alındığında M_u için ortalama tahmin hatası %10,2 ve S_k için %15,87 olmasına rağmen, en yüksek tahmin hataları her iki çıktı için de kabul edilemez seviyelere ulaşmaktadır. Bir kez daha vurgulamak gerekir ki, bu açıklama içinde bulon montajının sıra dışı davranışı göz ardı edilmemelidir.

Kolon eksenel basınç davranışı

Kolon eksenel basınç davranışını incelemek üzere dört farklı kolon kesiti ve farklı et kalınlıkları kullanılmış olup her grup için 4 tekrarlı olacak şekilde 40, 70 ve 120 cm boylarında kolon numuneleri incelenmiştir. Özellikle kritik burkulma yükünün tespiti için gerçekleştirilen deneylerde kullanılan numune boyları EN 15512’de belirtilen kıstaslar doğrultusunda belirlenmiştir.

Raf sisteminde kullanılan çapraz bağlantı elemanlarının davranışa etkisini görmek için ayrıca kolon ağız açıklıklarına bulon yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Kolonların alt ve üst uçlarına kaynaklanan taban plâkalarında 5 mm girintili 30 mm genişliğinde boşluk yapısı oluşturulmuş, bu boşluğa 50 mm çapında bir bilye yerleştirilerek mesnet bölgesi oluşturulmuştur.

Tablo 23’te C1, C2, C3 ve C4 kolonları için bulonlu ve bulonsuz numunelere ait ortalama kritik burkulma yükü değerleri ve burkulma modu bilgileri sunulmuştur. “Kuramsal Temeller” bölümünde detaylıca izah edildiği üzere; burkulma modları yerel (L), çarpılmalı (D), burulma ve eğilmeli (TF) ve eğilmeli (F) olarak tanımlanmaktadır.

Deney numunelerinin baskın göçme modu resimleri ise Şekil 77’de verilmiş olup bulonlu ve bulonsuz numunelerin göçme modları arasındaki farklar belirgin olarak gözükmemektedir. 3.0C1, 2.5C2, 1.5C3, 2.0C3 ve 2.0C4 kesitleri için bulonlu ve bulonsuz numunelerin ortalama kritik burkulma yükü değerlerine göre karşılaştırmalı sonuçları Şekil 78-82 arasında verilmiştir.

Sayısal Çözümleme Sonuçları

Geçmiş çalışmalarda bulunan toplam 17 adet deneysel çalışmada bulunan numuneler için sonlu elemanlar modelleri oluşturularak sayısal çözümlemeye tabi tutulmuştur. Sayısal çözümleme sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulandıktan sonra literatürde bulunan 5 farklı konnektör modeli için malzeme ve boyut özellikleri sabit tutularak kirişin konnektör üzerindeki konumunun yatay ve düşey doğrultularda değiştirildiği ve konnektör boyunun aşağı yönde uzatıldığı modeller için sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir.

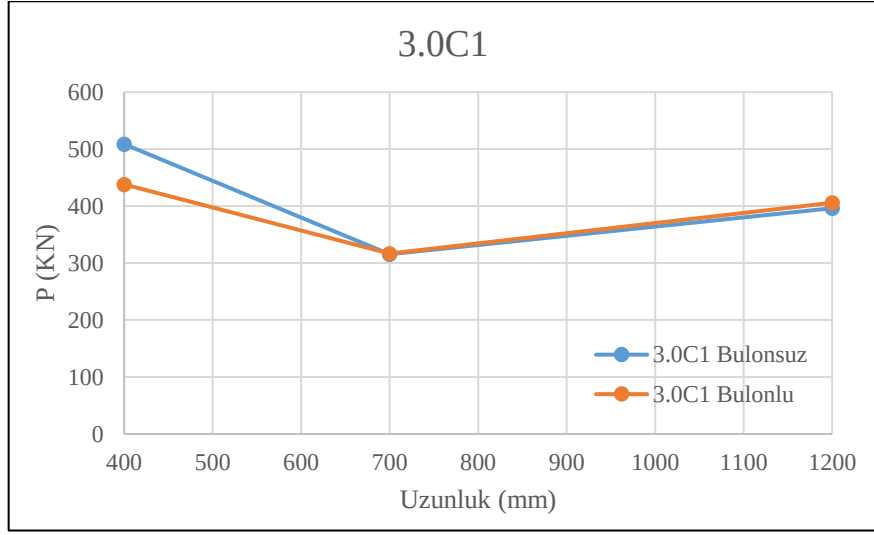
Bu çözümlemeler sonucunda, kirişin konnektör üzerindeki konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesi halinde davranışın kayda değer seviyede farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Zira bu tespite binaen deneysel aşamada sadece kirişin düşey konum farklılığı incelenmiştir.

Tablo 23. Kolon Kesitleri İçin Kritik Burkulma Yüğü Değerleri

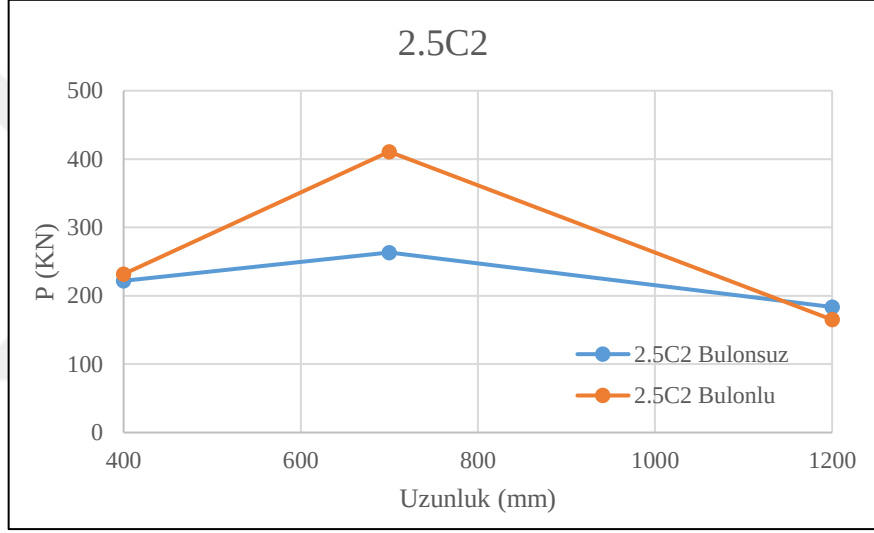
Deney Adı	Kritik Burkulma Yüğü (kN)	Burkulma Modu
3.0C1-H40	508,8	TF
3.0C1-H40-B	438,1	TF
3.0C1-H70	315,5	D
3.0C1-H70-B	316,7	TF
3.0C1-H120	396,4	TF+D
3.0C1-H120-B	406,0	TF
2.5C2-H40	221,8	D
2.5C2-H40-B	231,8	TF
2.5C2-H70	263,4	D
2.5C2-H70-B	410,8	TF
2.5C2-H120	183,6	TF+D
2.5C2-H120-B	165,1	TF
1.5C3-40	94,0	D
1.5C3-40-B	104,4	TF
1.5C3-70	79,7	D
1.5C3-70-B	89,6	TF
1.5C3-120	89,1	TF+D
1.5C3-120-B	93,3	TF
2.0C3-40	153,9	TF
2.0C3-40-B	162,5	TF
2.0C3-70	114,7	D
2.0C3-70-B	167,2	TF
2.0C3-120	148,0	TF+D
2.0C3-120-B	158,3	TF
2.0C4-40	152,5	D
2.0C4-40-B	164,3	TF
2.0C4-70	154,4	D
2.0C4-70-B	178,6	TF
2.0C4-120	153,2	TF+D
2.0C4-120-B	140,3	TF



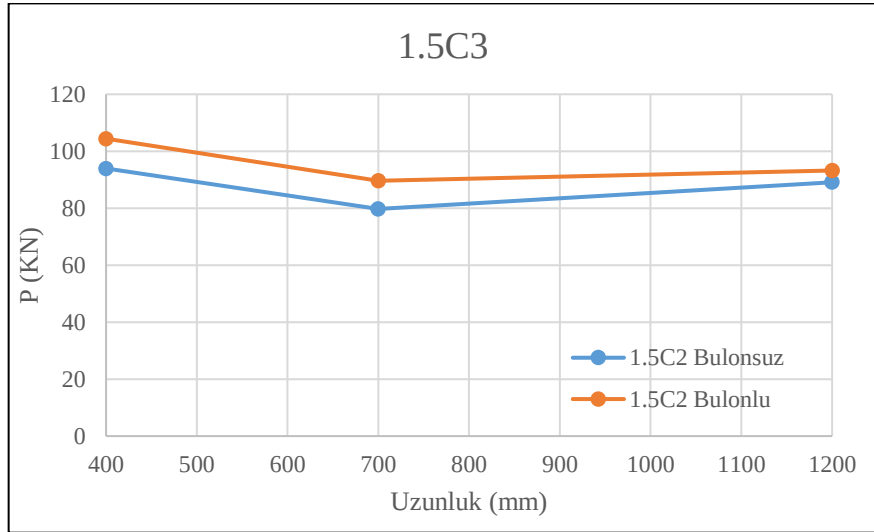
Şekil 77. Eksenel basınç deneylerinde görülen göçme modları



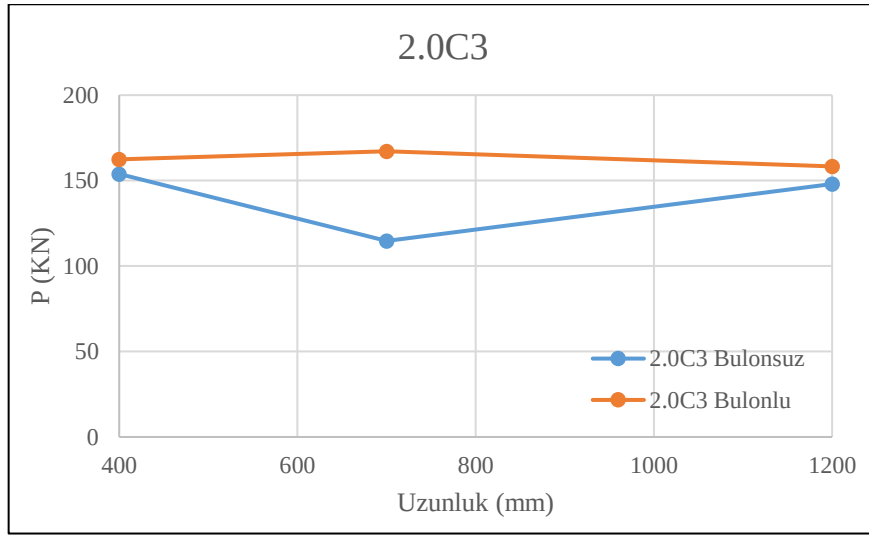
Şekil 78. 3.0C1 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri



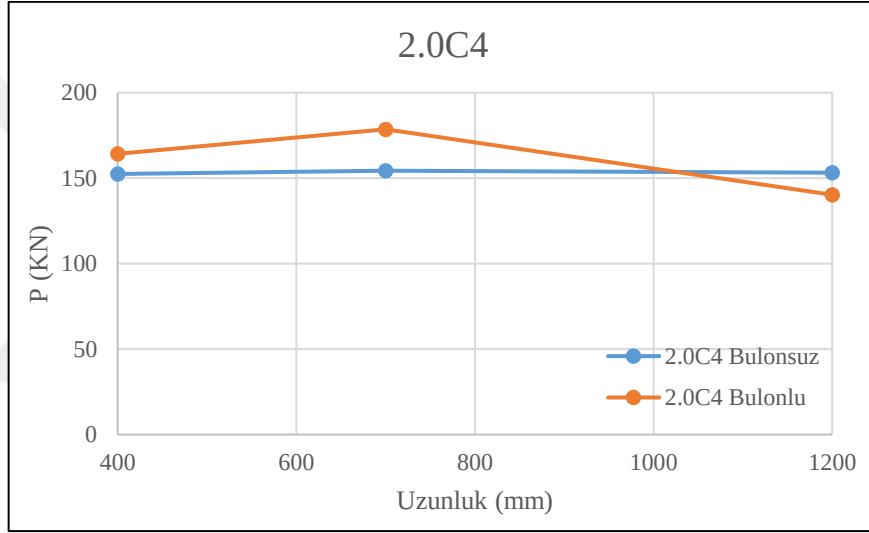
Şekil 79. 2.5C2 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri



Şekil 80. 1.5C3 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri



Şekil 81. 2.0C3 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri



Şekil 82. 2.0C4 kesiti için bulonlu ve bulonsuz kritik burkulma yükü değerleri

Hasarlı kolon eksenel basınç davranışı

Kiriş-kolon birleşim deneyleri yapıldıktan sonra birleşimden alınan 76 cm boyundaki kolon numuneleri ayrıca eksenel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Burkulma modu bilgilerine ilaveten 3.0C1, 2.5C2, 2.0C3 ve 2.0C4 kesitleri için ortalama kritik burkulma yükü değerleri ve burkulma modu sınıflandırmaları Tablo 24’te sunulmuştur. Deneylerde görülen için baskın göçme modu resimleri ise Şekil 83’te verilmiştir.

Tablo 24. C1, C2, C3 ve C4 Hasarlı Kesitleri İçin Burkulma Davranışı Bilgileri

Deney Adı	Eksenel Yük (kN)	Değişim (%)	Burkulma Modu
3.0C1-B120-5T+5-U	282,7	-12	TF+D
3.0C1-B120-5T+40-U	282,6	-12	TF+D
3.0C1-B120-5T+60-U	246,3	-24	D
3.0C1-B140-5T+40-U	293,2	-9	TF+D
3.0C1-B120-5T+5-B-U	271,1	-16	TF+D
3.0C1-B120-5T+40-B-U	277,6	-14	TF+D
3.0C1-B120-5T+60-B-U	308,1	-5	D
3.0C1-B140-5T+40-B-U	320,6	-1	TF+D
3.0C1-H760-1	319,1	0	D
3.0C1-H760-2	326,8	0	D
2.5C2-B120-5T+5-U	183,1	-2	TF+D
2.5C2-B120-5T+40-U	226,1	22	TF+D
2.5C2-B120-5T+60-U	176,7	-5	D
2.5C2-B140-5T+40-U	215,0	16	TF+D
2.5C2-B120-5T+5-B-U	193,0	4	TF+D
2.5C2-B120-5T+40-B-U	204,5	10	TF+D
2.5C2-B120-5T+60-B-U	181,4	-2	D
2.5C2-B140-5T+40-B-U	144,9	-22	TF+D
2.5C2-H760-1	187,1	0	D
2.5C2-H760-2	185,0	0	D
2.0C3-B120-5T+0-U	79,8	-30	TF+D
2.0C3-B120-5T+20-U	76,1	-33	TF+D
2.0C3-B120-5T+40-U	77,7	-32	TF+D
2.0C3-B120-5T+60-U	78,5	-31	TF+D
2.0C3-B120-5T+80-U	95,0	-16	D
2.0C3-B120-5T+100-U	96,1	-15	D
2.0C3-B120-5T+120-U	100,2	-12	D
2.0C3-H760-1	130,4	0	D
2.0C3-H760-2	96,9	0	D
2.0C4-B120-5T+0-U	115,2	0	TF+D
2.0C4-B120-5T+20-U	101,9	-11	TF+D
2.0C4-B120-5T+40-U	99,6	-13	TF+D
2.0C4-B120-5T+60-U	109,7	-5	TF+D
2.0C4-B120-5T+80-U	108,4	-6	D
2.0C4-B120-5T+100-U	113,3	-2	D
2.0C4-B120-5T+120-U	113,9	-1	D
2.0C4-H760-1	114,3	0	D
2.0C4-H760-2	115,8	0	D



Şekil 83. Hasarlı kolonlar için eksenel basınç deneylerinde görülen göçme modları

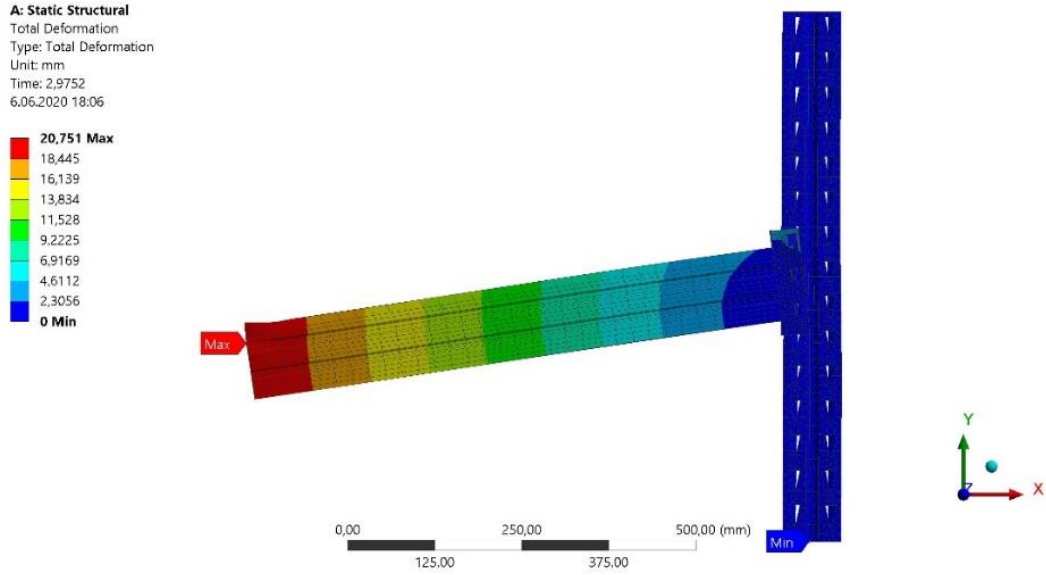
Kiriş-kolon birleşim davranışı

Bu tez kapsamında, geçmiş çalışmalardan alınan beş farklı kiriş-kolon birleşimi için üç tasarım değişkeni üzerinde sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Bunlar, kirişin konnektördeki düşey konumunun değiştirilmesi, kirişin konnektördeki yatay konumunun değiştirilmesi ve son olarak konnektör boyunun aşağı yönde uzatılması olarak belirlenmiştir. Toplamda 70 adet sonlu elemanlar temelindeki sayısal çözümleme sonuçları için moment-dönme eğrilerinden elde edilen veriler incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

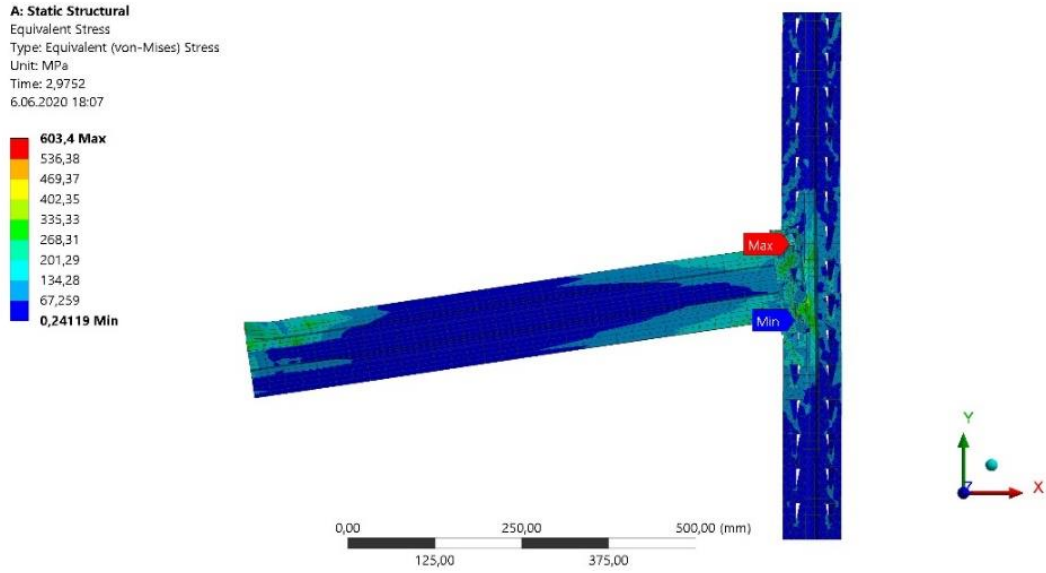
- ✓ Kirişin konnektör üzerindeki konumu düşey doğrultuda 0 mm'den 80 mm'ye hareket ettirildiğinde moment taşıma kapasitelerinde %20-50 arasında bir artış gözlenirken, dönme rijitliği değerinde ise %10'luk bir artış söz konusudur.
- ✓ Kirişin konnektör üzerindeki konumu yatay doğrultuda 0 mm'den 12 mm'ye hareket ettirildiğinde moment taşıma kapasitelerinin değişimine dair genel bir ifade kullanılamamakta olup enerji yutma kapasitesinde ve dönme rijitliği değerinde %10 civarında bir artış görülebilmektedir.
- ✓ Konnektör boyu aşağı yönde 0 mm'den 100 mm'ye kadar uzatıldığında moment taşıma kapasitelerinde genelleştirilebilecek bir eğilim söz konusu değildir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen sonlu eleman çözümlerinin kabul edilebilir sonuçlar vermesi için deneysel sonuçlar ile doğrulama yapılması gerekmektedir. Zhao vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulunan C4*-B105-3T kiriş-kolon numunesinin üç boyutlu modeli oluşturulduktan sonra, ANSYS 18.1'de statik analiz türü seçilmiştir. Burada öncelikle kiriş, kolon ve konnektör için Elastisite Modülü, Akma Dayanımı ve Poisson Oranı değerleri girilmiştir. Bu işlemin akabinde üç boyutlu model açılarak çözüm adımı sayısı 50 olarak seçilmiştir. Modelde birleşim türleri kontrol edilerek konnektör ile kiriş için kaynaklı birleşim ve konnektör ile kolon için sürtünmeli birleşim seçilip sürtünme değeri 0,2 olarak girilmiştir. Doğrusal çözüm yapıldığında sistemdeki azami von-Mises gerilmesinin akma dayanımını aştığı görülmüştür. Dolayısı ile doğrusal olmayan çözümleme için “*büyük deformasyonlar*” (large deflection) aktif edilmiştir. Bu işlemler sonucunda kiriş ucundaki yer değiştirme ve von-Mises gerilme değerlerini verecek şekilde ayarlamalar yapılmıştır. Çözüm sonucunda kiriş ucundaki yer değiştirme değerlerinin gösterimi Şekil 84'te ve von-Mises gerilme dağılımı ise Şekil 85'te verilmiştir.

Bütün modeller için oluşturulan sonlu eleman çözümleri deney sonuçları ile yakın bir uyum sergilemiştir. Literatürde gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan farklı olarak kirişin konnektördeki düşey konumu değişikçe göçme modlarında farklılıklar gözlenmiştir. Konnektör tırnaklarının kesit alanlarının azalmasından dolayı azami gerilemeler tırnaklarda ve tırnakların oturduğu kolon yuvalarında oluşmaktadır.

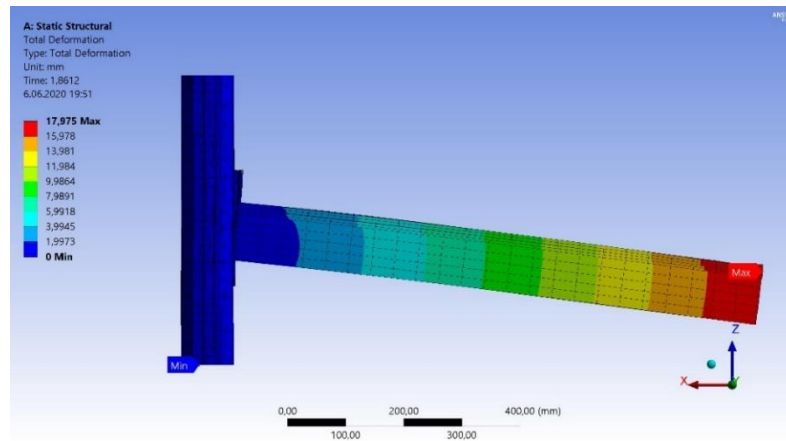


Şekil 84. C4*-B105-3T için yer değıştirme değeri

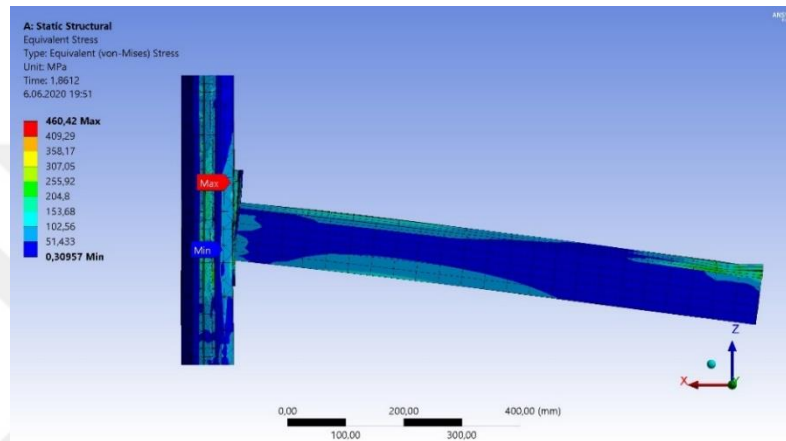


Şekil 85. C4*-B105-3T için von-Mises gerilme değeri

Shah vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bulunan 2U-4L-100B kiriş-kolon birleşimi için sayısal çözümleme sonucunda elde edilen kiriş ucundaki yer değıştirme değeri Şekil 86’da ve von-Mises gerilme dağılımı ise Şekil 87’de verilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar çözüm sonuçlarının daha iyi yorumlanabilmesi için moment-dönme ($M-\theta$) eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi için yapılmış olan doğrulama sonuçlarından ikisi için moment-dönme eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 88 ve Şekil 89’de verilmiştir. Sayısal çözümleme sonuçları deneysel sonuçlara yakın bir davranış sergilemiştir. Toplam 17 adet kiriş-kolon birleşim deneyleri için yapılan sonlu eleman çözümlemelerinden elde edilen moment-dönme eğrileri çizilerek göçme yükü, azami moment ve dönme rijitliği değeri hesaplanmış ve Tablo 25’te verilmiştir.



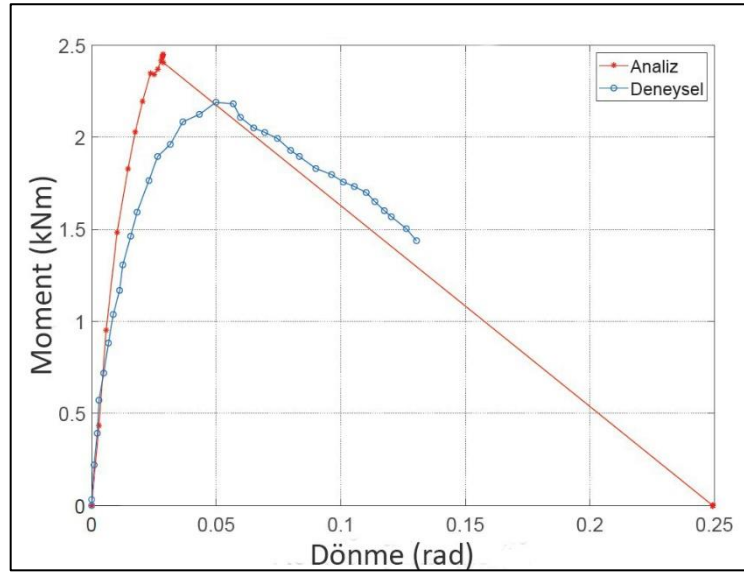
Şekil 86. 2U-4L-100B için maksimum yer değiştirme değerleri



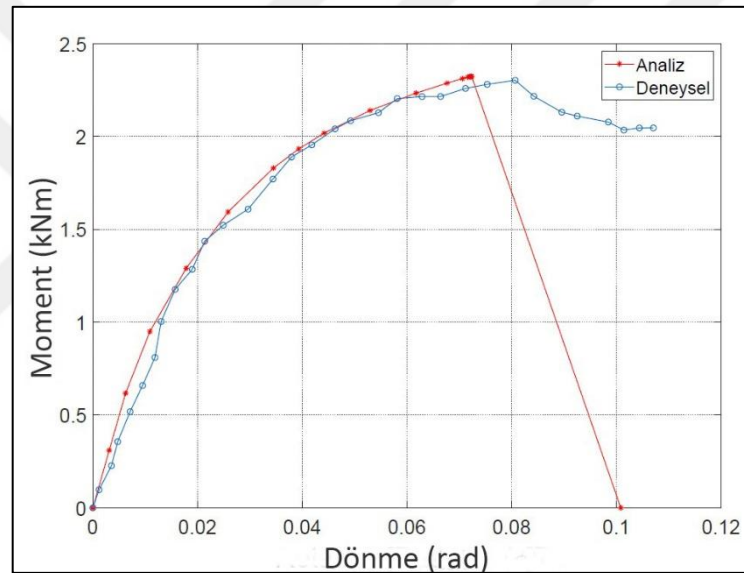
Şekil 87. 2U-4L-100B için von-Mises gerilme değerleri

Tablo 25. (Bernuzzi ve Simoncelli 2016), (Gusella vd. 2018), (Z. J. Lyu vd. 2018), (Shah vd. 2016) ve (Zhao vd. 2014) Çalışmaları İçin Deneysel İnceleme ve Sayısal Çözümleme Sonuçları

Deney No	Deney Adı	Göçme yükü (kN)		Maksimum moment kapasitesi (kNm)		İlk dönme rijitliği (kNm/rad)	
		Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal
1	C4*-B105-3T	3,21	4,47	2,31	2,45	130,7	145,1
2	C5*-B120-4T	3,97	4,32	2,86	3,11	264,5	180,9
3	2.6U-110B-4T	5,26	5,00	2,47	2,35	177,3	141,5
4	2.6U-125B-4T	4,96	4,55	2,33	2,14	197,2	125,3
5	2U-110B-4T	4,66	5,57	2,19	2,62	195,2	156,3
6	2U-125B-4T	4,57	6,11	2,15	2,87	196,2	139,9
7	2U-4L-100BD	2,83	3,89	1,33	1,83	53,6	81,1
8	2U-4L-125BD	5,60	5,49	2,25	2,34	70,6	68,1
9	C4-B105-3T	4,32	4,89	1,60	1,81	86,9	116,3
10	C5-B105-4T	6,22	6,27	2,30	2,32	131,3	135,7
11	C5-B120-3T	6,00	6,95	2,22	2,57	81,1	116,1
12	C5-B120-4T	6,49	6,95	2,40	2,57	133,2	141,3
13	C5-B145-4T	10,30	8,16	3,81	3,02	141,8	159,4
14	1.8C1-B105-4T	6,76	6,73	2,50	2,49	114,8	124,1
15	1.8C1-B120-4T	6,22	6,89	2,30	2,55	101,8	139,9
16	1.8C1-B120-5T	7,41	8,14	2,74	3,01	206,8	148,4
17	2.3C4-B120-5T	5,92	6,62	2,19	2,45	230,3	187

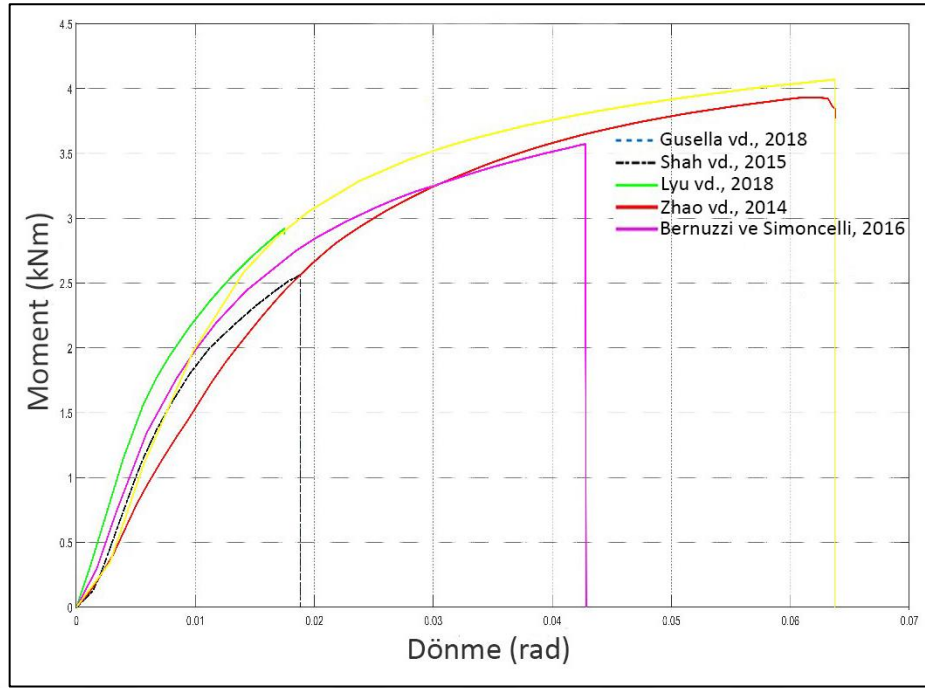


Şekil 88. C4*-B105-3T numunesi için moment-dönme eğrileri



Şekil 89. 2U-4L-125BD numunesi için moment-dönme eğrileri

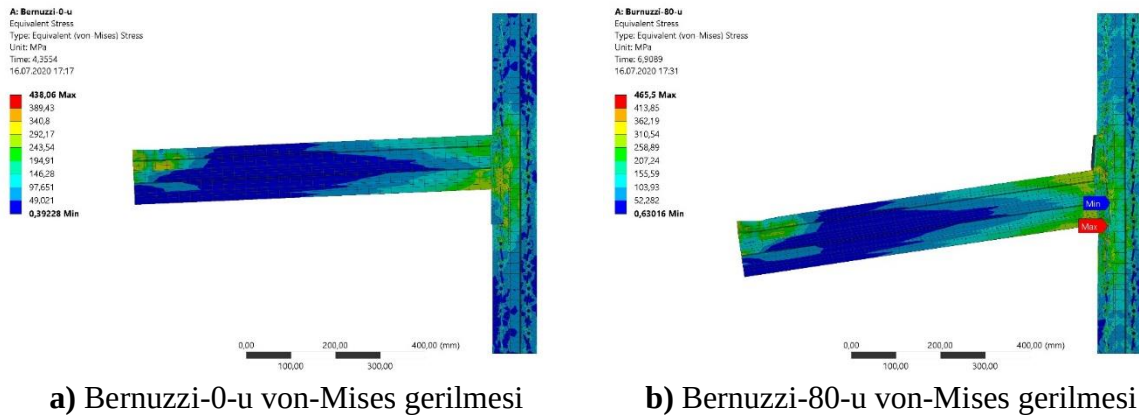
Bu çalışma kapsamında temel olarak beş farklı birleşim tipi için malzeme özellikleri ve sonlu eleman modeli özellikleri aynı kalacak şekilde sırası ile kirişin konnektör üzerindeki konumu düşey doğrultuda 20 cm değiştirilerek 0, 20, 40, 60 ve 80 mm değerlerinde değiştirilerek sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Bir diğer tasarım değişkeni olarak, kirişin konnektör üzerindeki konumu düşey doğrultuda sabit tutulmuş ancak yatay doğrultuda iç kısma doğru 0, 6 ve 12 mm değerlerinde hareket ettirilerek sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Son olarak da kirişin konnektör üzerindeki yatay ve düşey doğrultudaki konumu sabit tutularak konnektör boyu aşağı yönde 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm değerlerinde uzatılarak inceleme yapılmıştır. Sayısal çözümlemesi yapılan beş ayrı modelin moment-dönme eğrileri Şekil 90'da verilmiştir.



Şekil 90. Geçmiş çalışmalardaki kiriş-kolon birleşimleri için moment-dönme eğrileri

Kiriş konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesi

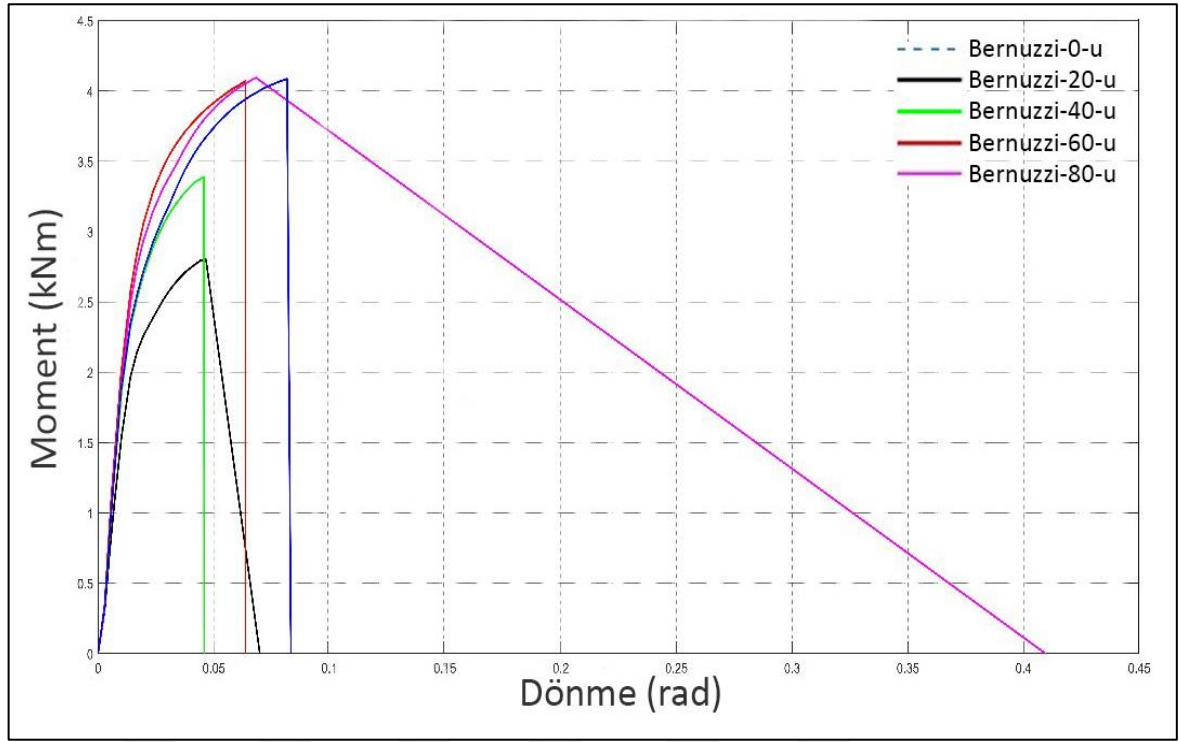
Kiriş konumunun düşey doğrultuda değişiminin incelenmesi kapsamında kiriş üst noktası ile konnektör üst noktası aynı hizaya gelecek şekilde ilk model oluşturulmuş ve buna 0 mm konumu denmiştir. İsimlendirmede ise hangi çalışma modeli kullanılmış ise onun ilk yazarı, devamında konnektör konumu ve düşey doğrultuda hareket olduğunu belirtmek için “u” harfi kullanılmıştır. Örnek ile açıklayacak olursak; “Bernuzzi-0-u” modelinde çalışmanın Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli olduğu, kiriş üst noktasının konnektör üst noktasından 0 mm aşağıda olduğu ve kirişin düşey doğrultuda hareket ettirildiği belirtilmektedir. Sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 91’de, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 92’de verilmiştir.



a) Bernuzzi-0-u von-Mises gerilmesi

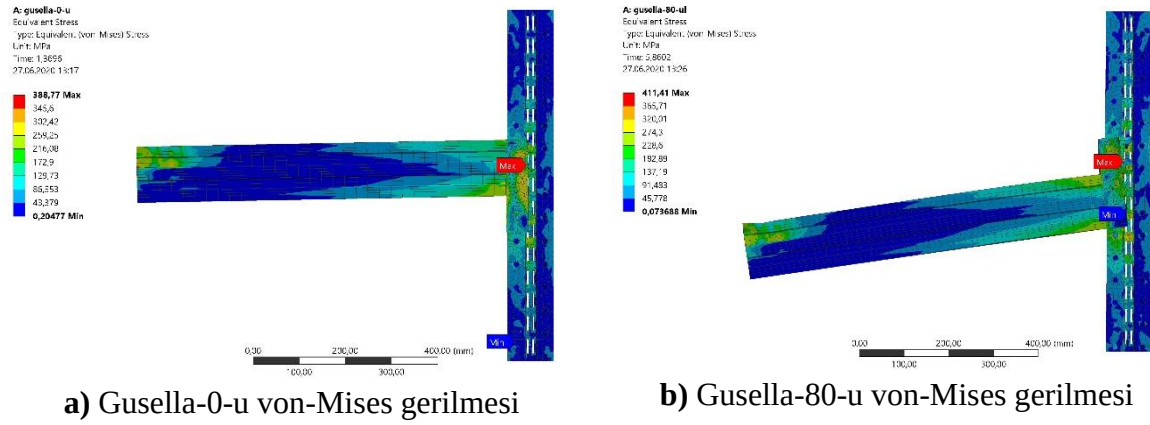
b) Bernuzzi-80-u von-Mises gerilmesi

Şekil 91. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

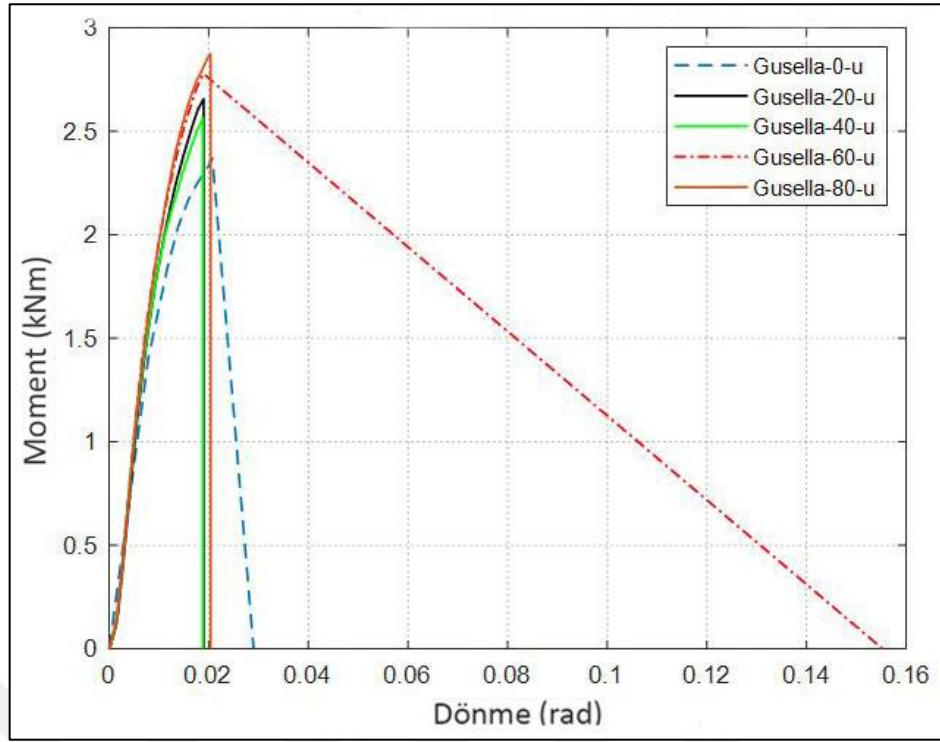


Şekil 92. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Bernuzzi ve Simoncelli (2016) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 93'te, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 94'te verilmiştir.

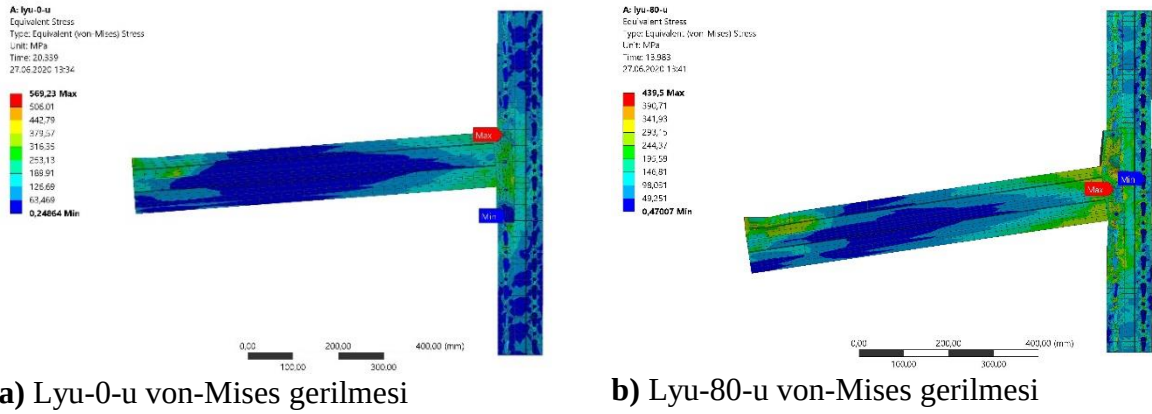


Şekil 93. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

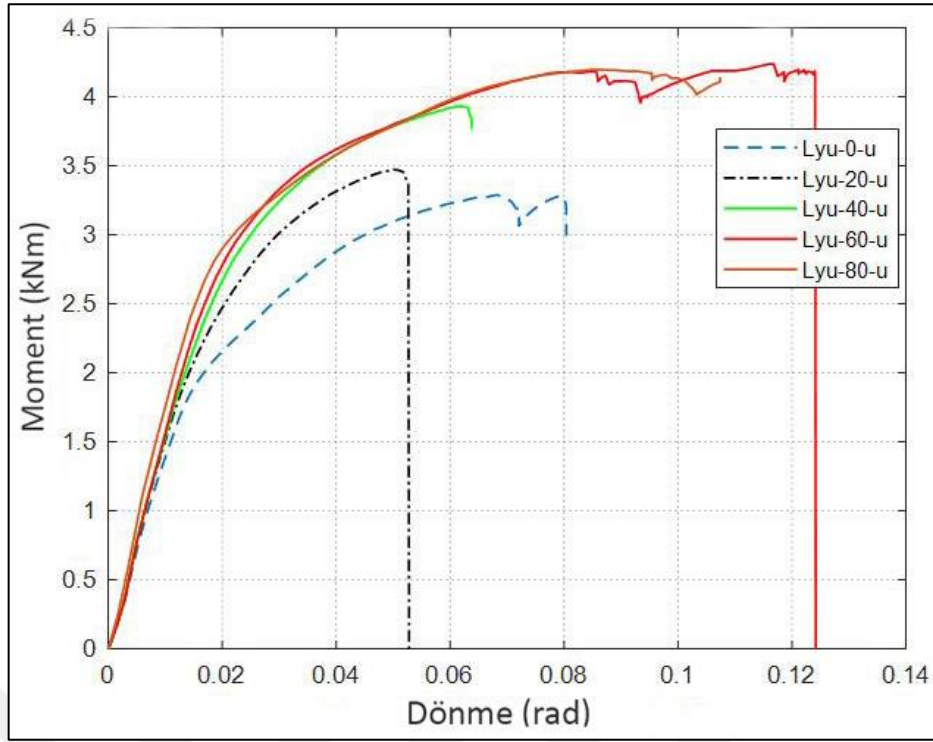


Şekil 94. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Lyu vd. (2018) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 95'te, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 96'da verilmiştir.

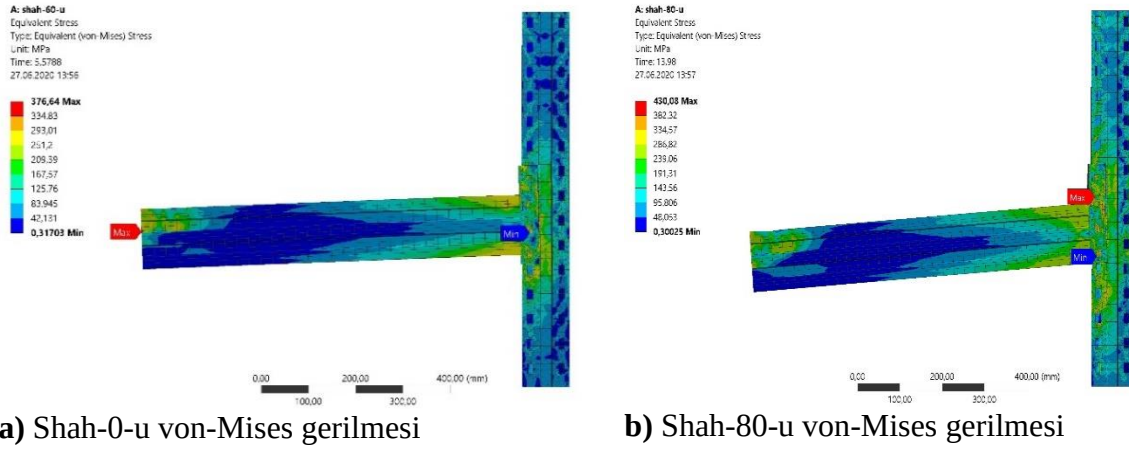


Şekil 95. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

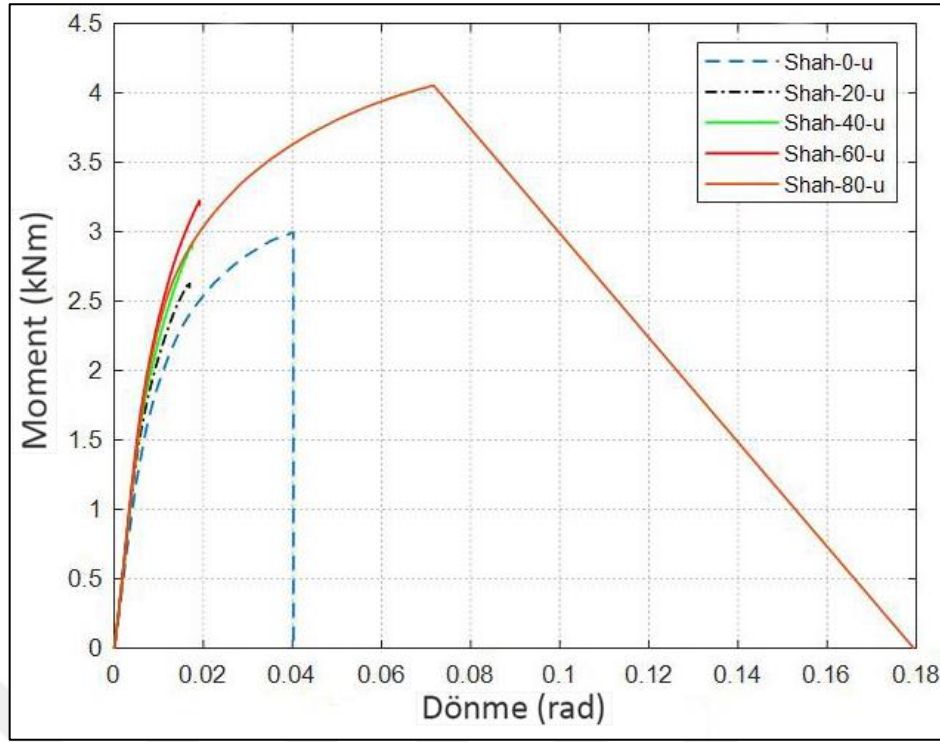


Şekil 96. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Shah vd. (2016) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 97’de, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 98’de verilmiştir.

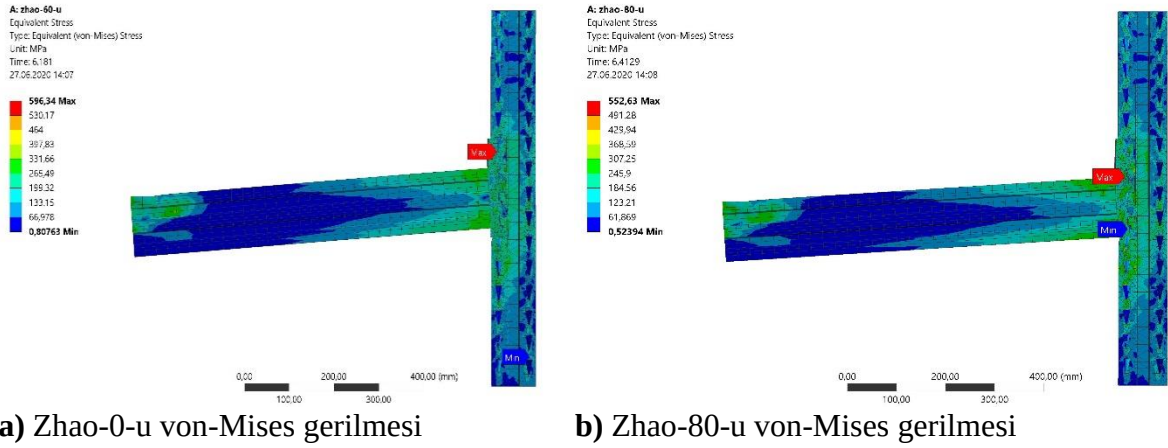


Şekil 97. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 98. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

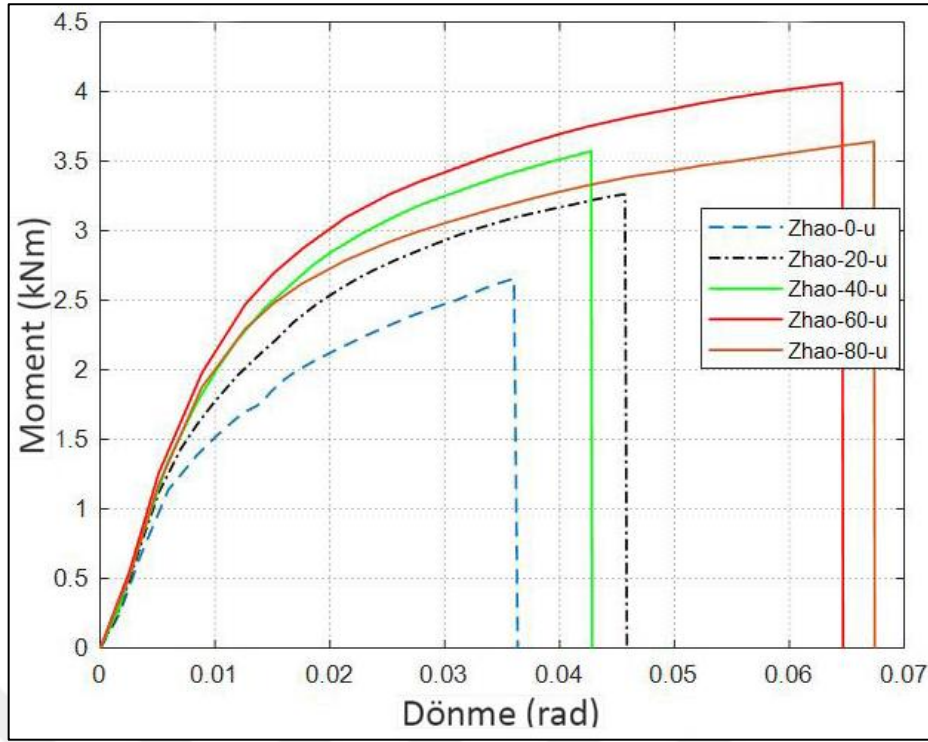
Zhao vd. (2014) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 99’da, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 100’de verilmiştir.



a) Zhao-0-u von-Mises gerilmesi

b) Zhao-80-u von-Mises gerilmesi

Şekil 99. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 100. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı düşey konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Sonlu elemanlar çözümlemesi sonucunda oluşturulan moment-dönme eğrilerinin yorumlamasını kolaylaştırmak için, bütün modellere ait moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerleri ayrıca Tablo 26’da sunulmuştur.

Tablo 26. Kiriş Konumunun Düşey Doğrultuda Değiştirildiği Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları

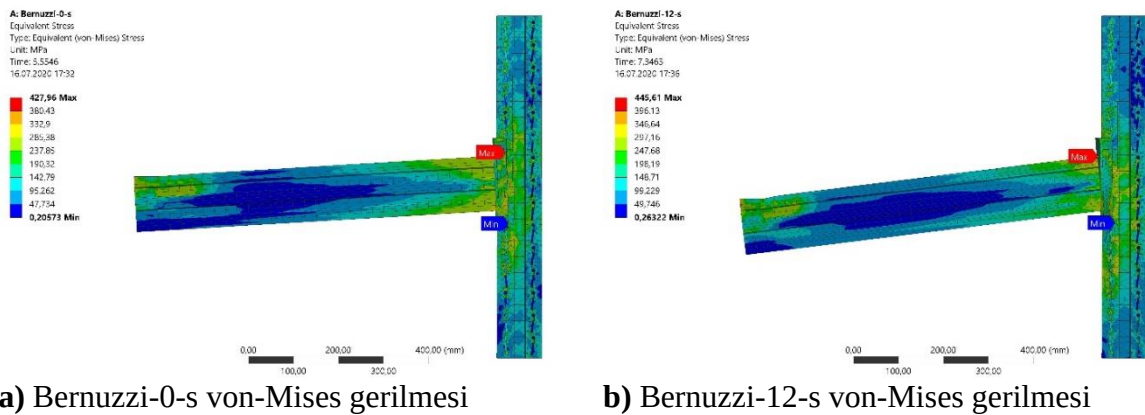
Deney No	Çalışmanın Adı	Sonlu elemanlar modelinin Adı	Moment taşıma kapasitesi (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
1	Bernuzzi ve Simoncelli (2016)	Bernuzzi-0-u	2,80	105
2		Bernuzzi-20-u	3,40	112
3		Bernuzzi-40-u	4,10	120
4		Bernuzzi-60-u	4,15	139
5		Bernuzzi-80-u	4,17	135
6	Gusella vd. (2018)	Gusella-0-u	2,40	183
7		Gusella-20-u	2,70	205
8		Gusella-40-u	2,65	210
9		Gusella-60-u	2,70	215
10		Gusella-80-u	2,85	216
11	Lyu vd. (2018)	Lyu-0-u	3,30	150
12		Lyu-20-u	3,45	160
13		Lyu-40-u	3,90	172
14		Lyu-60-u	4,25	180
15		Lyu-80-u	4,20	185

Tablo 26. (Devamı)

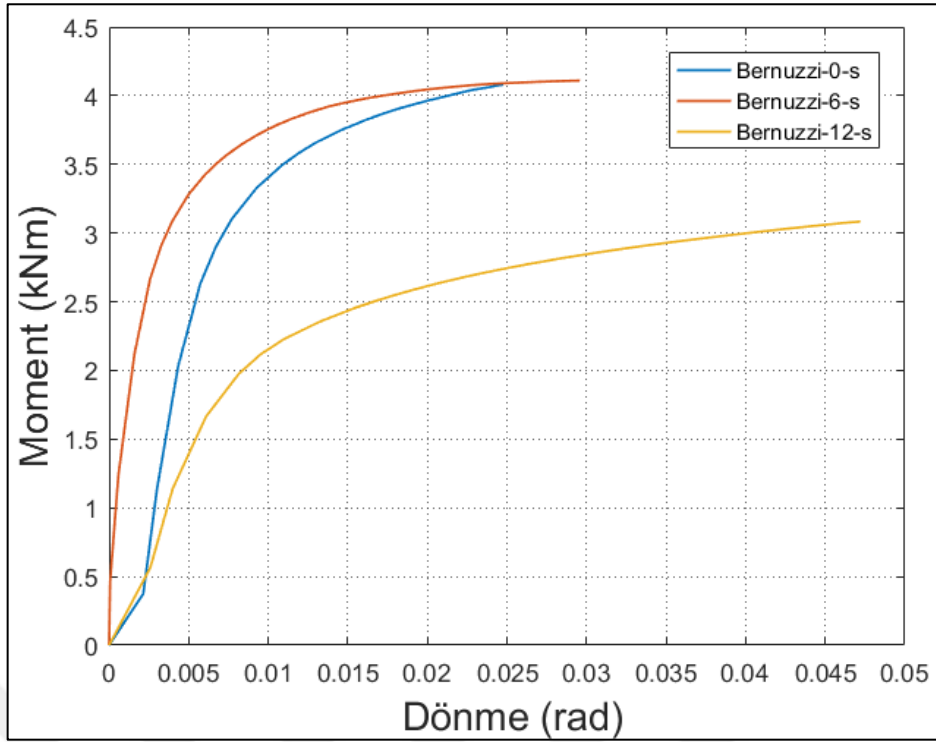
16		Shah-0-u	3,00	200
17		Shah-20-u	2,65	215
18	Shah vd. (2016)	Shah-40-u	2,90	220
19		Shah-60-u	3,25	225
20		Shah-80-u	4,10	230
21		Zhao-0-u	2,70	150
22		Zhao-20-u	3,30	164
23	Zhao vd. (2014)	Zhao-40-u	3,60	170
24		Zhao-60-u	4,08	200
25		Zhao-80-u	3,65	190

Kiriş konumunun yatay doğrultuda değiştirilmesi

Kiriş konumunun yatay doğrultuda değişiminin incelenmesi kapsamında kiriş orta noktası ile konnektör orta noktası çakışık olacak şekilde tüm modellerde sabit tutulurken yatay doğrultuda kiriş dış yüzeyi ile konnektör dış yüzeyi birbirine paralel olacak şekilde konumlandırılmaktadır. Öncelikli olarak kirişin düşeydeki dış yüzeyi ile konnektörün dış yüzeyleri arasındaki fark 0, 6 ve 12 mm olacak şekilde konumlandırılıp sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. İsimlendirmede ise hangi çalışma modeli kullanılmış ise onun ilk yazarı, devamında konnektör konumu ve yatay doğrultuda hareket olduğunu belirtmek için “s” harfi kullanılmıştır. Örnek ile açıklayacak olursak; “Bernuzzi-0-s” modelinde çalışmanın Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli olduğu, kiriş merkezi ile konnektör merkezi arasındaki yatay mesafenin 0 mm değerinde olduğu ve s ise kirişin yatay doğrultuda hareket ettirildiği belirtilmektedir. Sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 101’de farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 102’de verilmiştir.

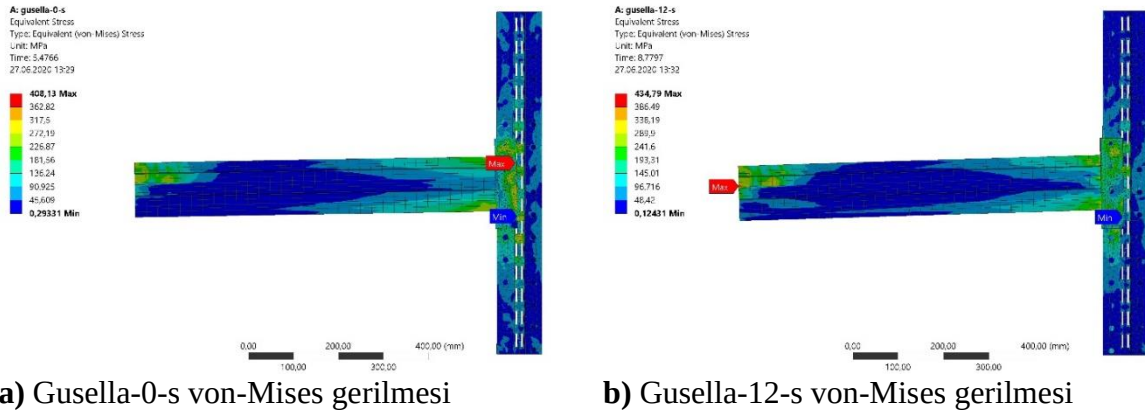


Şekil 101. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

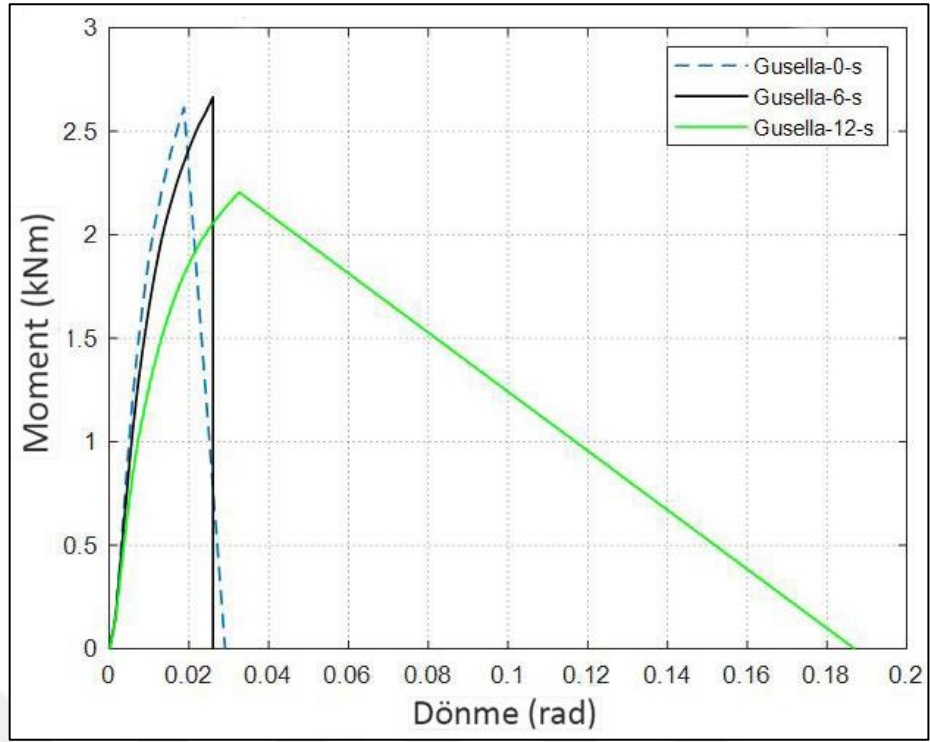


Şekil 102. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Gusella vd. (2018) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 103'te, farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 104'te verilmiştir.

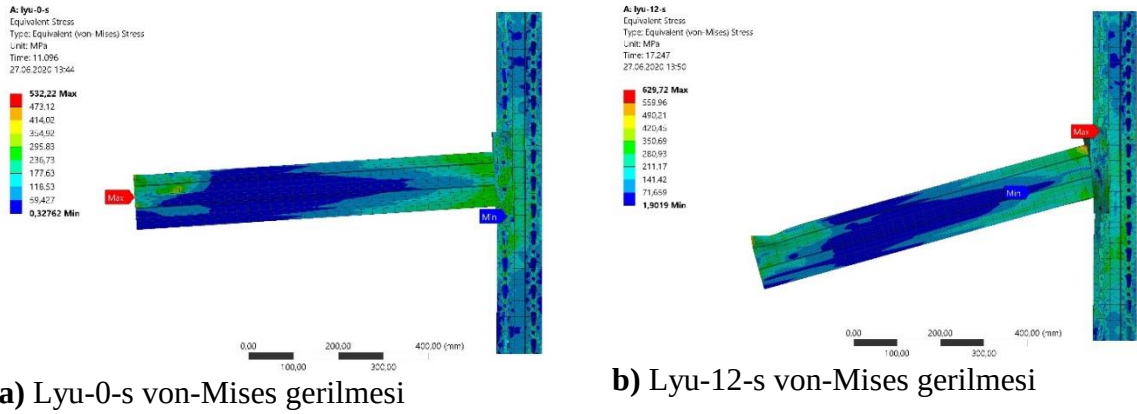


Şekil 103. Gusella vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

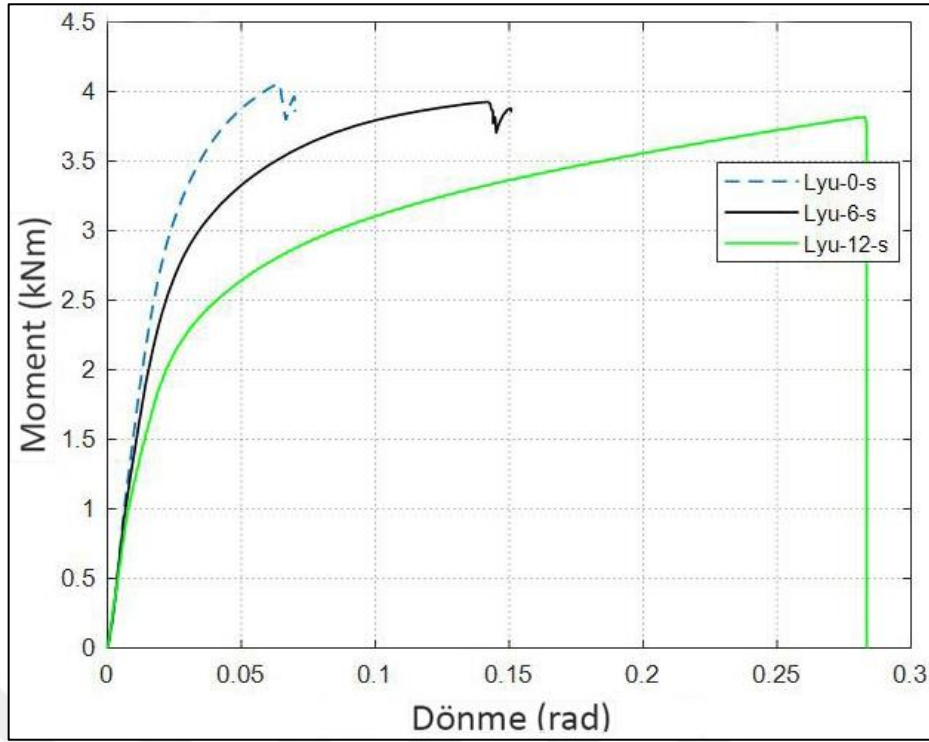


Şekil 104. Gusella vd. (2018) modeli kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Lyu vd. (2018) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 105'te farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 106'da verilmiştir.

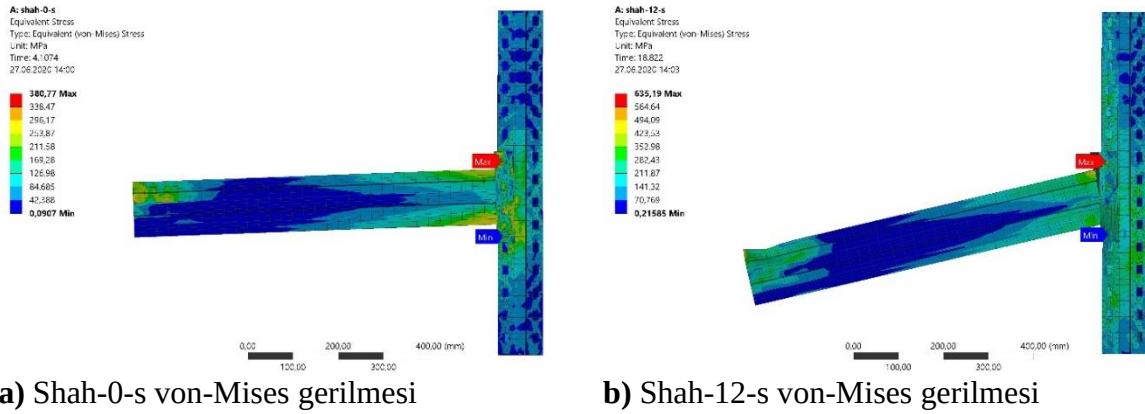


Şekil 105. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

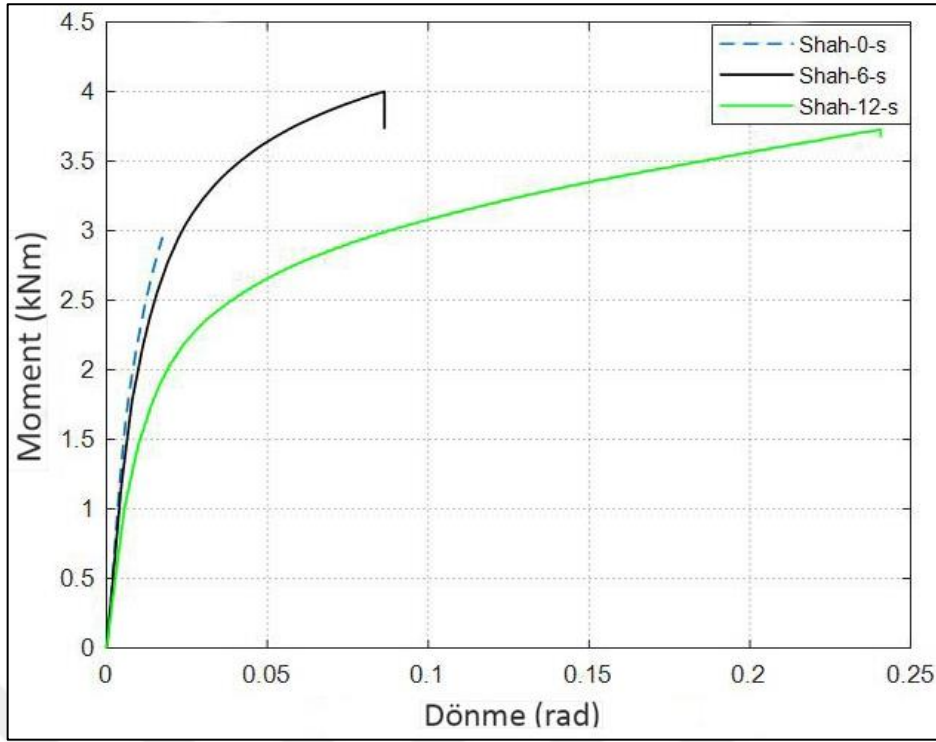


Şekil 106. Lyu vd. (2018) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Shah vd. (2016) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 107’de farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 108’de verilmiştir.

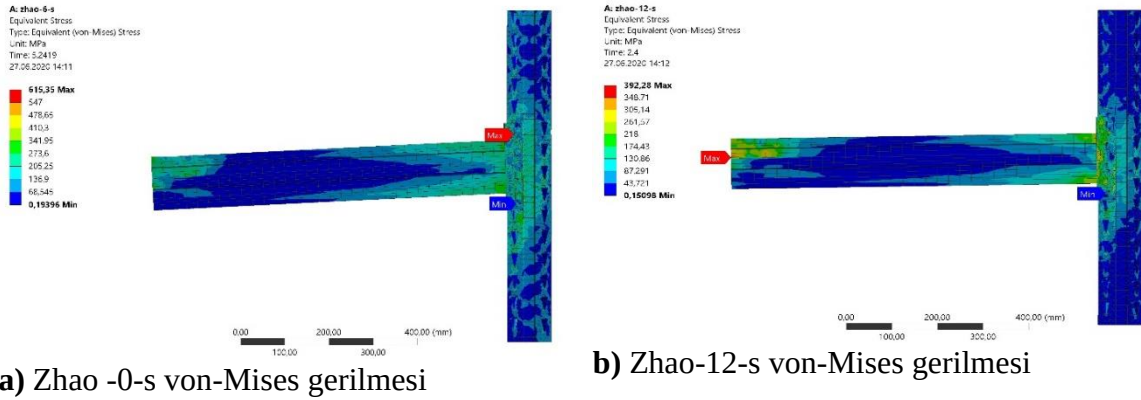


Şekil 107. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı

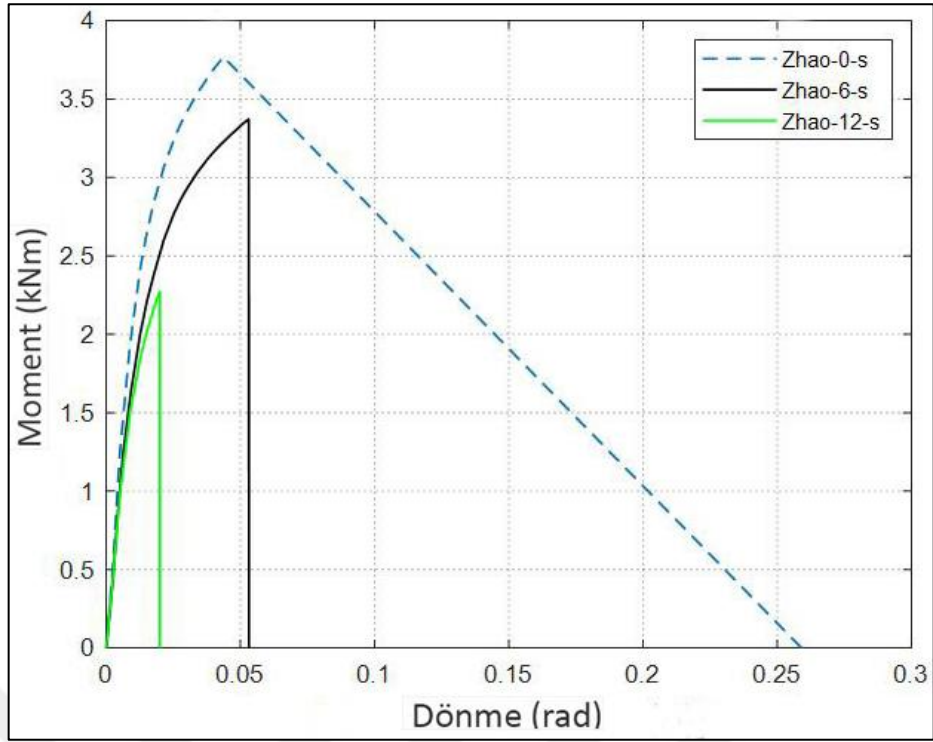


Şekil 108. Shah vd. (2016) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Zhao vd. (2014) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 109’da farklı kiriş konumları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 110’da verilmiştir.



Şekil 109. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 110. Zhao vd. (2014) modeli için kirişin farklı yatay konumlarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

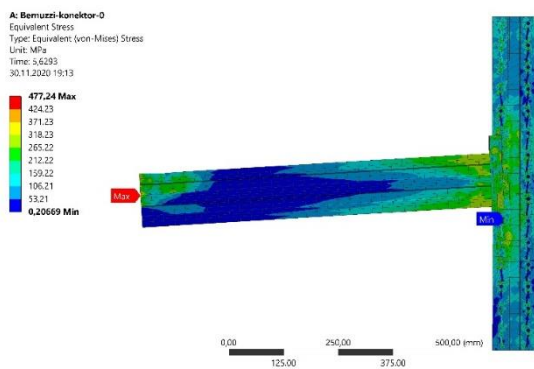
Sonlu elemanlar çözümlemesi sonucunda oluşturulan moment-dönme eğrilerinin yorumlamasını kolaylaştırmak için, bütün modellere ait moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerleri ayrıca Tablo 27’de sunulmuştur.

Tablo 27. Kiriş Konumunun Yatay Doğrultuda Değiştirildiği Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları

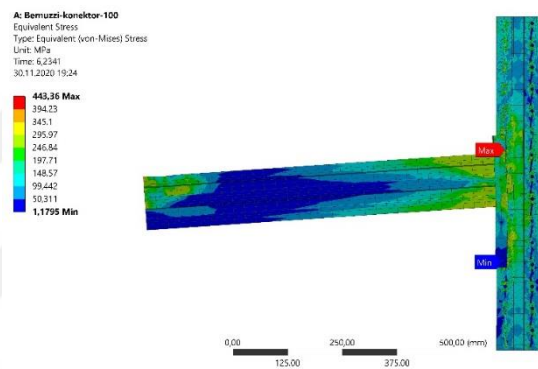
Deney no	Çalışmanın adı	Sonlu elemanlar modelinin Adı	Moment taşıma kapasitesi (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
1	Bernuzzi ve Simoncelli (2016)	Bernuzzi-0-s	4,40	120
2		Bernuzzi-6-s	4,42	120
3		Bernuzzi-12-s	3,34	115
4	Gusella vd. (2018)	Gusella-0-s	2,65	210
5		Gusella-6-s	2,71	205
6		Gusella-12-s	2,22	190
7	Lyu vd. (2018)	Lyu-0-s	4,05	172
8		Lyu-6-s	3,88	160
9		Lyu-12-s	3,73	140
10	Shah vd. (2016)	Shah-0-s	2,93	220
11		Shah-6-s	4,02	205
12		Shah-12-s	3,74	170
13	Zhao vd. (2014)	Zhao-0-s	3,75	170
14		Zhao-6-s	3,38	155
15		Zhao-12-s	2,32	150

Konnektör boyunun aşağı yönde uzatılması

Konnektör boyundaki değişimin incelenmesi kapsamında konnektör aşağı doğru 0, 20, 40, 60, 80 ve 100 mm uzatılarak sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. İsimlendirmede ise hangi çalışma modeli kullanılmış ise onun ilk yazarı, devamında konnektör boyunun uzatıldığını belirtmek için “konnektör”, en sonda ise konnektör boyu ne kadar uzatıldı ise bu değer yazılmıştır. Örnek ile açıklayacak olursak “Bernuzzi-konnektör-0” modelinde çalışmanın Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli olduğu ve konnektörün 0 mm değerinde uzatıldığını belirtmektedir. Sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 111’de farklı konnektör uzunlukları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 112’de verilmiştir.

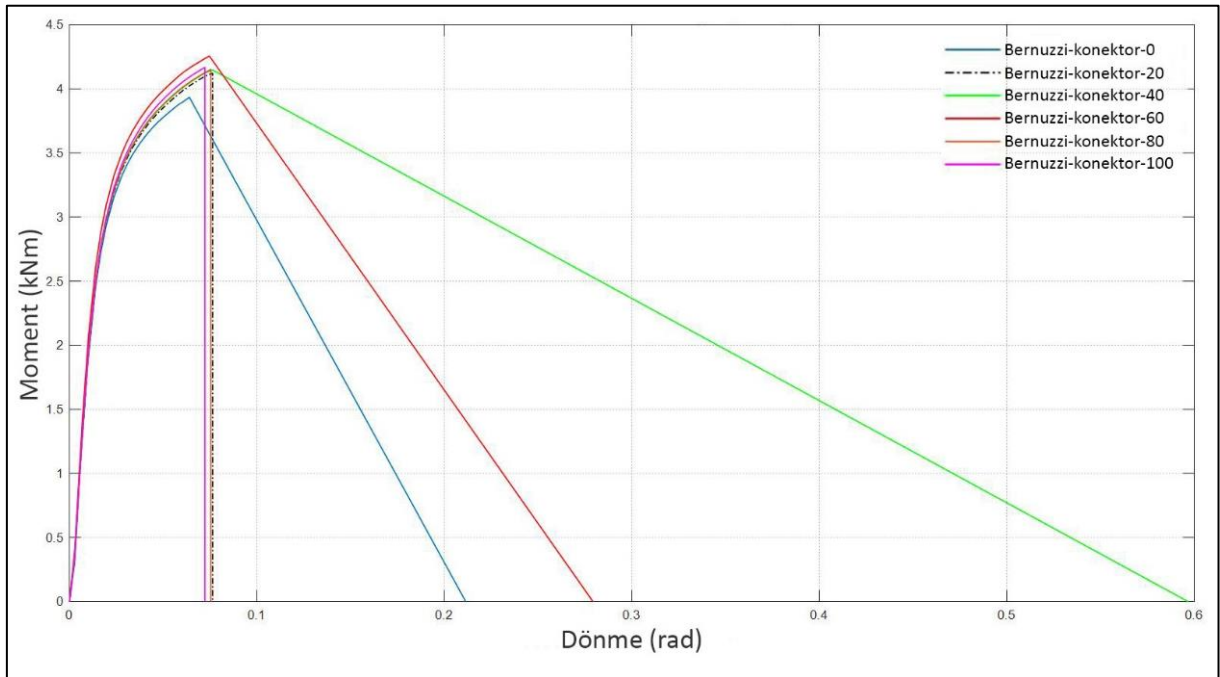


a) Bernuzzi-konnektör-0 von-Mises gerilmesi



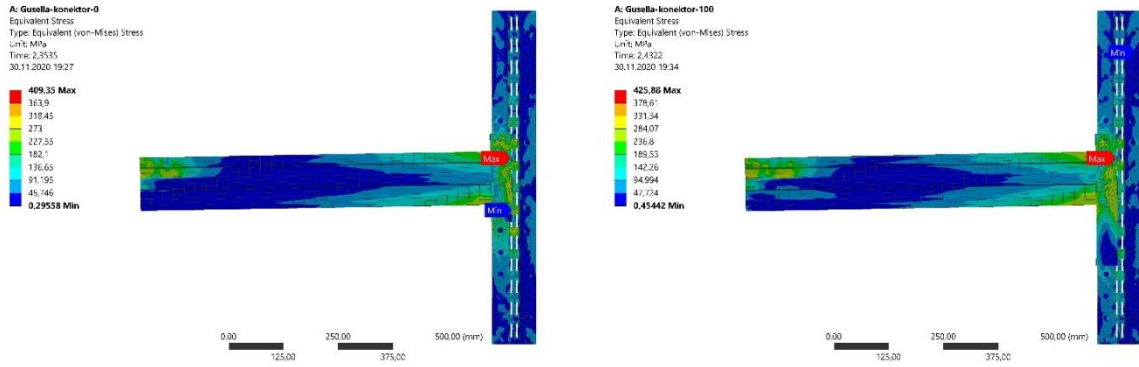
b) Bernuzzi-konnektör-100 von-Mises gerilmesi

Şekil 111. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı



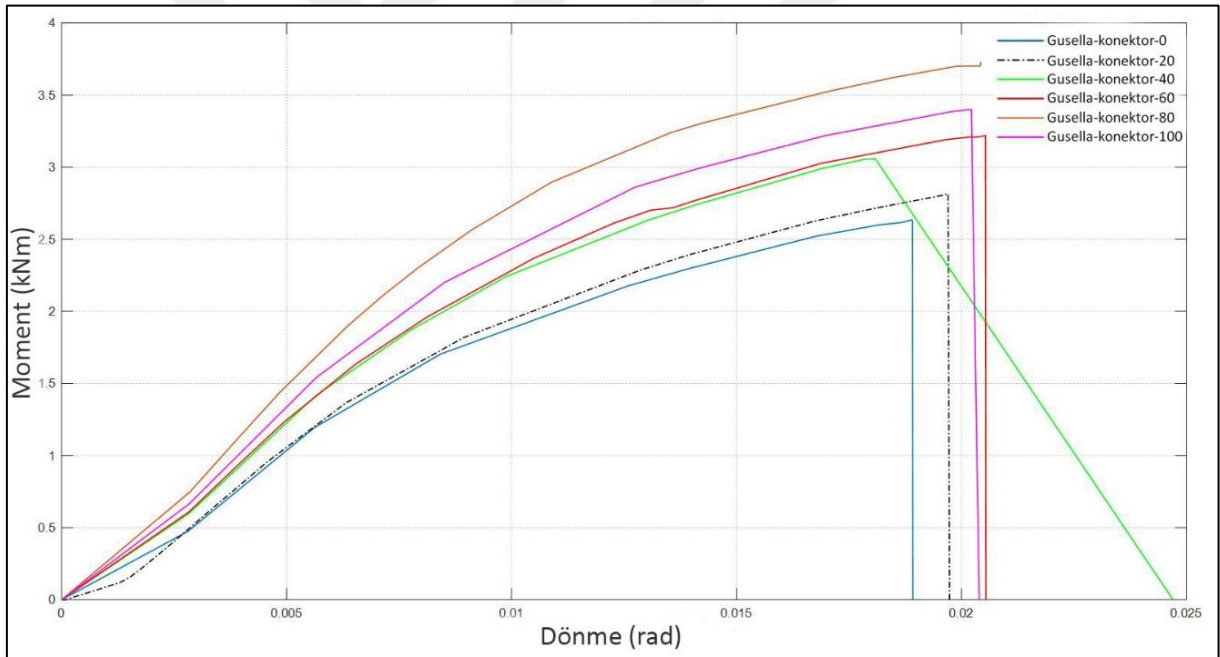
Şekil 112. Bernuzzi ve Simoncelli (2016) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Gusella vd. (2018) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 113'te farklı konnektör boyları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 114'te verilmiştir.



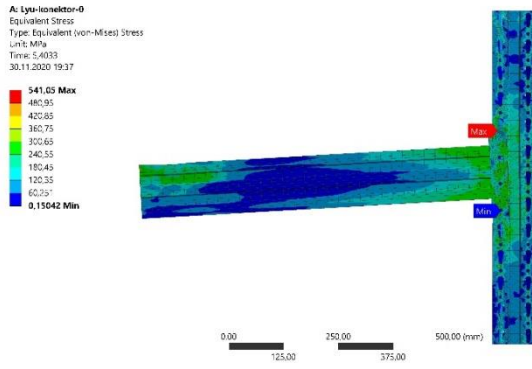
a) Gusella-konnektör-0 von-Mises gerilmesi b) Gusella-konnektör-100 von-Mises gerilmesi

Şekil 113. Gusella vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı

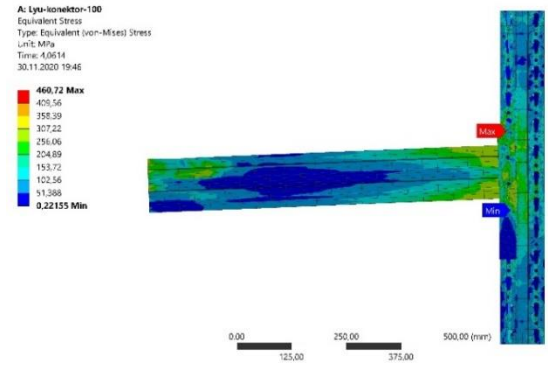


Şekil 114. Gusella vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Lyu vd. (2018) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 115'te farklı konnektör boyları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 116'da verilmiştir.

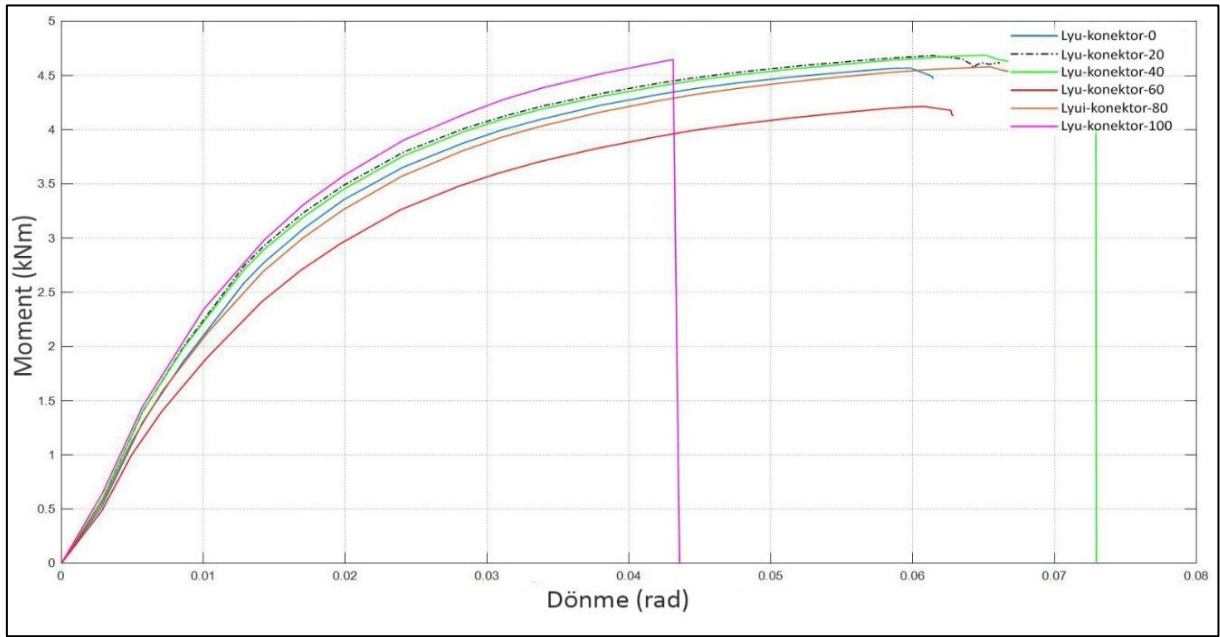


a). Lyu-konnektör-0 von-Mises gerilmesi



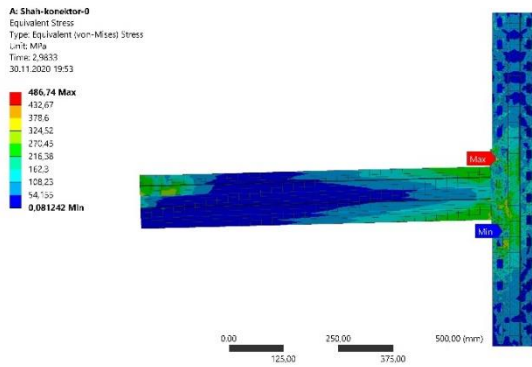
b) Lyu-konnektör-100 von-Mises gerilmesi

Şekil 115. Lyu vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı

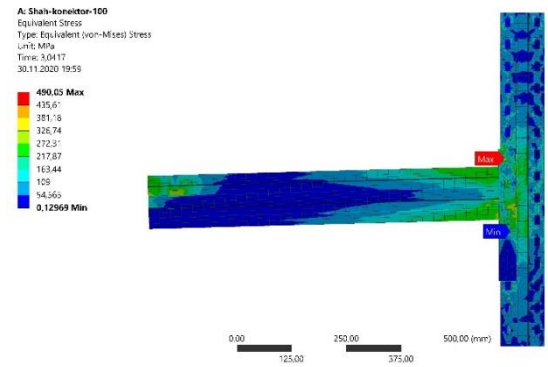


Şekil 116. Lyu vd. (2018) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Shah vd. (2016) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 117’de farklı konnektör boyları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 118’de verilmiştir.

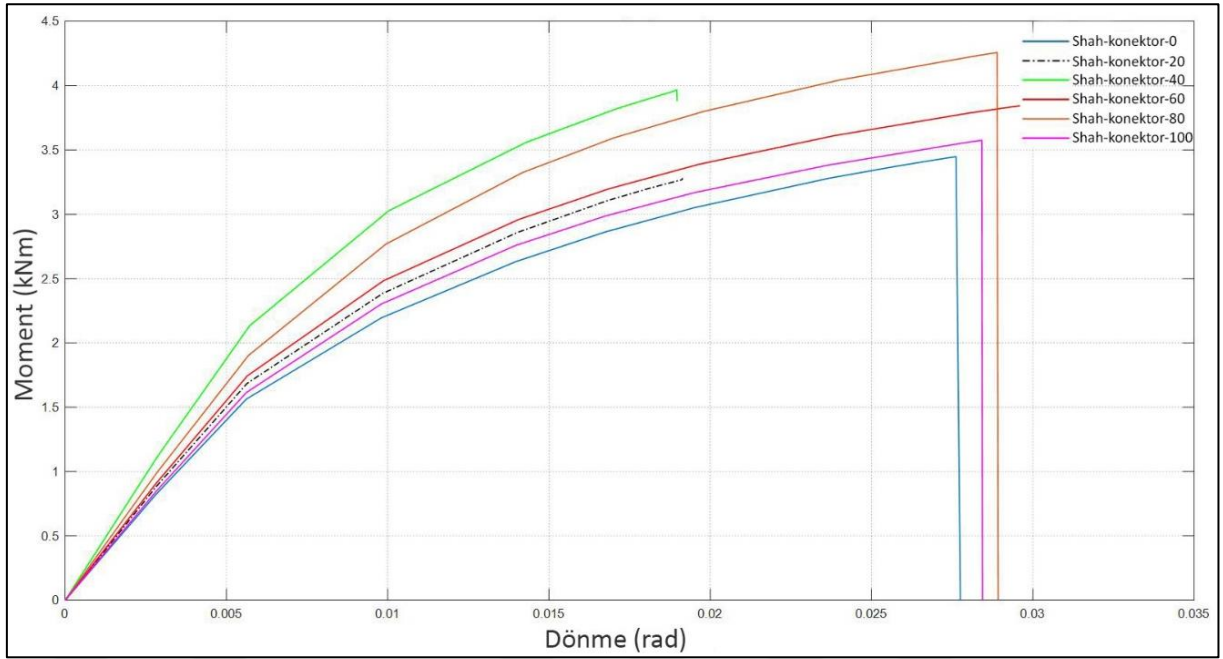


a) Shah-konnektör-0 von-Mises gerilmesi



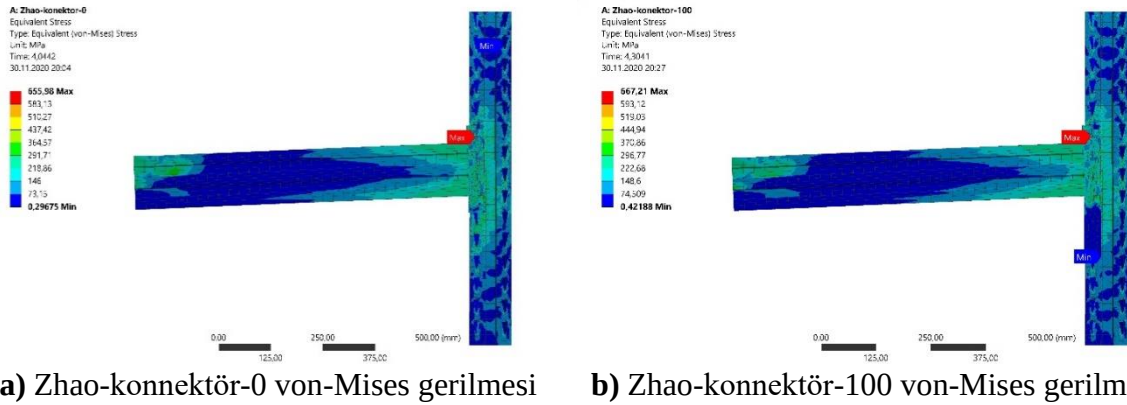
b) Shah-konnektör-100 von-Mises gerilmesi

Şekil 117. Shah vd. (2016) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 118. Shah vd. (2016) modeli için farklı konnektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

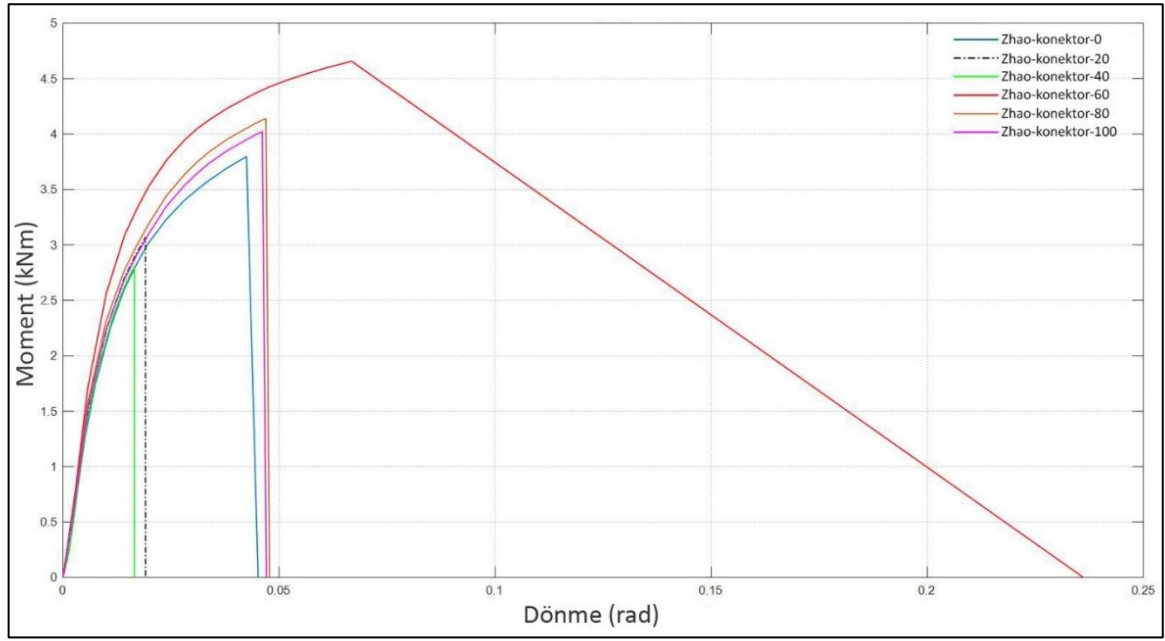
Zhao vd. (2014) tarafından deneye tabi tutulan model için sayısal çözümlemelerden alınan von-Mises gerilme dağılımı Şekil 119’da farklı konnektör boyları için karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri ise Şekil 120’de verilmiştir.



a) Zhao-konnektör-0 von-Mises gerilmesi

b) Zhao-konnektör-100 von-Mises gerilmesi

Şekil 119. Zhao vd. (2014) modeli için farklı konnektör boylarında von-Mises gerilme dağılımı



Şekil 120. Zhao vd. (2014) modeli için farklı konektör boylarında karşılaştırmalı moment-dönme eğrileri

Sonlu elemanlar çözümlemesi sonucunda oluşturulan moment-dönme eğrilerinin yorumlamasını kolaylaştırmak için, bütün modellere ait moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerleri ayrıca Tablo 28’de sunulmuştur.

Tablo 28. Konektör Boyunun Uzatıldığı Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları

Deney No	Çalışmanın Adı	Sonlu elemanlar modelinin Adı	Moment taşıma kapasitesi (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
1	Bernuzzi ve Simoncelli (2016)	Bernuzzi-konektör-0	3,90	125
2		Bernuzzi-konektör-20	4,20	125
3		Bernuzzi-konektör-40	4,23	125
4		Bernuzzi-konektör-60	4,30	125
5		Bernuzzi-konektör-80	4,23	125
6		Bernuzzi-konektör-100	4,15	125
7	Gusella vd. (2018)	Gusella-konektör-0	2,65	210
8		Gusella-konektör-20	2,80	210
9		Gusella-konektör-40	3,10	220
10		Gusella-konektör-60	3,22	220
11		Gusella-konektör-80	3,75	225
12		Gusella-konektör-100	3,35	230
13	Lyu vd. (2018)	Lyu-konektör-0	4,60	172
14		Lyu-konektör-20	4,75	175
15		Lyu-konektör-40	4,78	170
16		Lyu-konektör-60	4,20	162
17		Lyu-konektör-80	4,10	170
18		Lyu-konektör-100	4,70	177

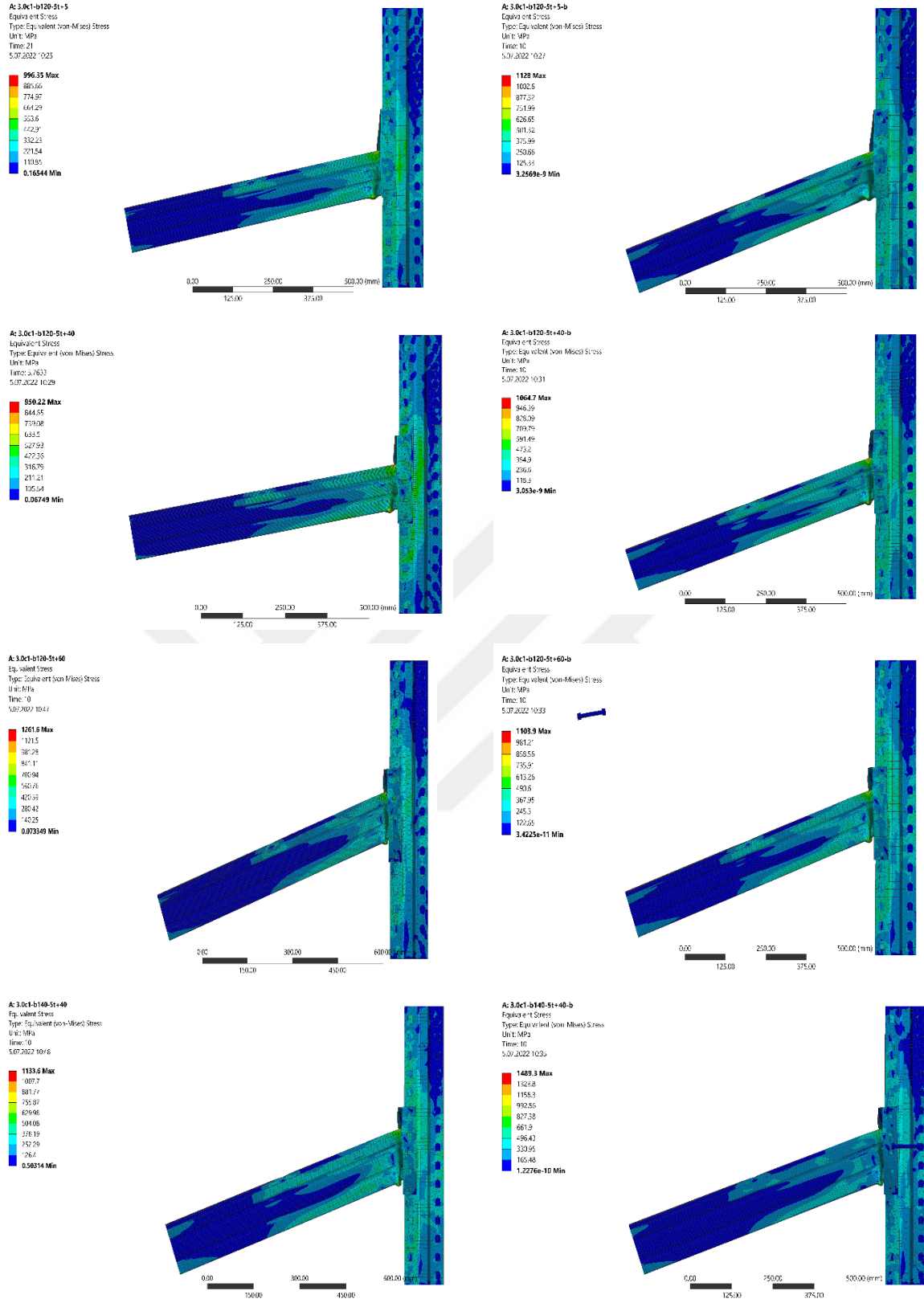
Tablo 28. (Devamı)

19		Shah-konnektör-0	3,40	220
20		Shah-konnektör-20	3,25	228
21	Shah vd. (2016)	Shah-konnektör-40	3,95	235
22		Shah-konnektör-60	3,80	235
23		Shah-konnektör-80	4,30	230
24		Shah-konnektör-100	3,60	225
25		Zhao-konnektör-0	3,80	180
26		Zhao-konnektör-20	3,10	185
27	Zhao vd. (2014)	Zhao-konnektör-40	2,75	182
28		Zhao-konnektör-60	4,70	200
29		Zhao-konnektör-80	4,20	195
30		Zhao-konnektör-100	4,05	190

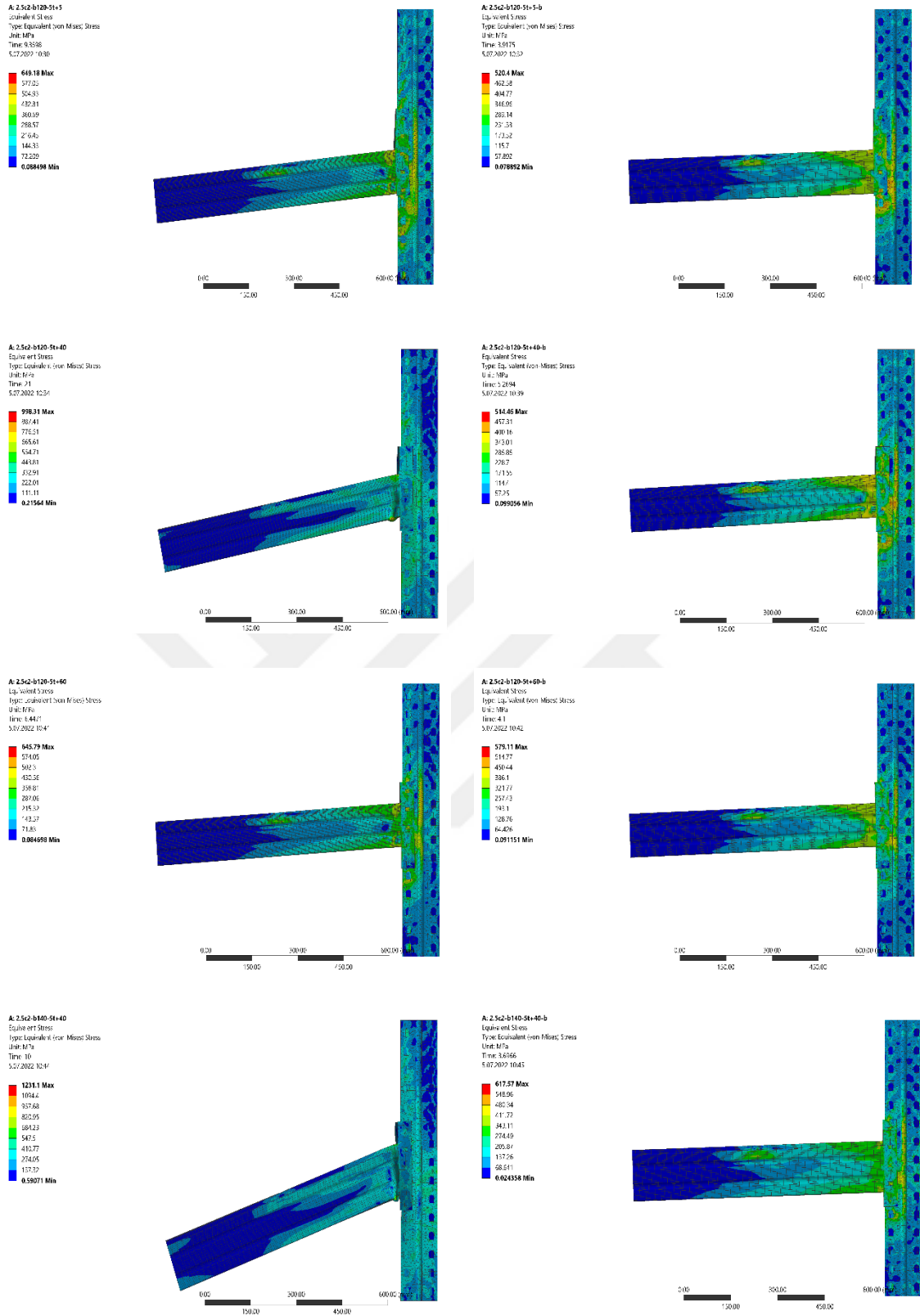
Deneysel sonuçlarla karşılaştırma

Tez çalışması kapsamında deneyleri gerçekleştirilmiş olan olan 30 adet kiriş-kolon birleşim numunesi, ANSYS 18.1 Workbench yazılımı ile sayısal çözümlemeye tabi tutulmuştur. Bu amaçla 3.0C1, 2.5C2, 2.0C3 ve 2.0C4 kolon kesitleri ile farklı konfigürasyonları oluşturulan kiriş ve bulonlu birleşimlerin sayısal modelleri oluşturulmuştur. Sayısal çözümleme modelinin doğrulaması, daha önceki çalışmalarda bulunan kiriş-kolon birleşimlerinin deney sonuçlarına dayanarak yapılmıştır. Yükleme noktasına deplasman uygulanarak gerçekleştirilen statik çözümlemelerde von-Mises gerilemelerinin akma dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla doğrusal olmayan çözümleme kapsamında büyük şekil değiştirmeler (large deflection) açılmış ve deneysel çalışmaya en yakın sonucun, sonlu eleman ağındaki eleman boyutunun 5 mm olduğunda elde edildiği görülmüştür.

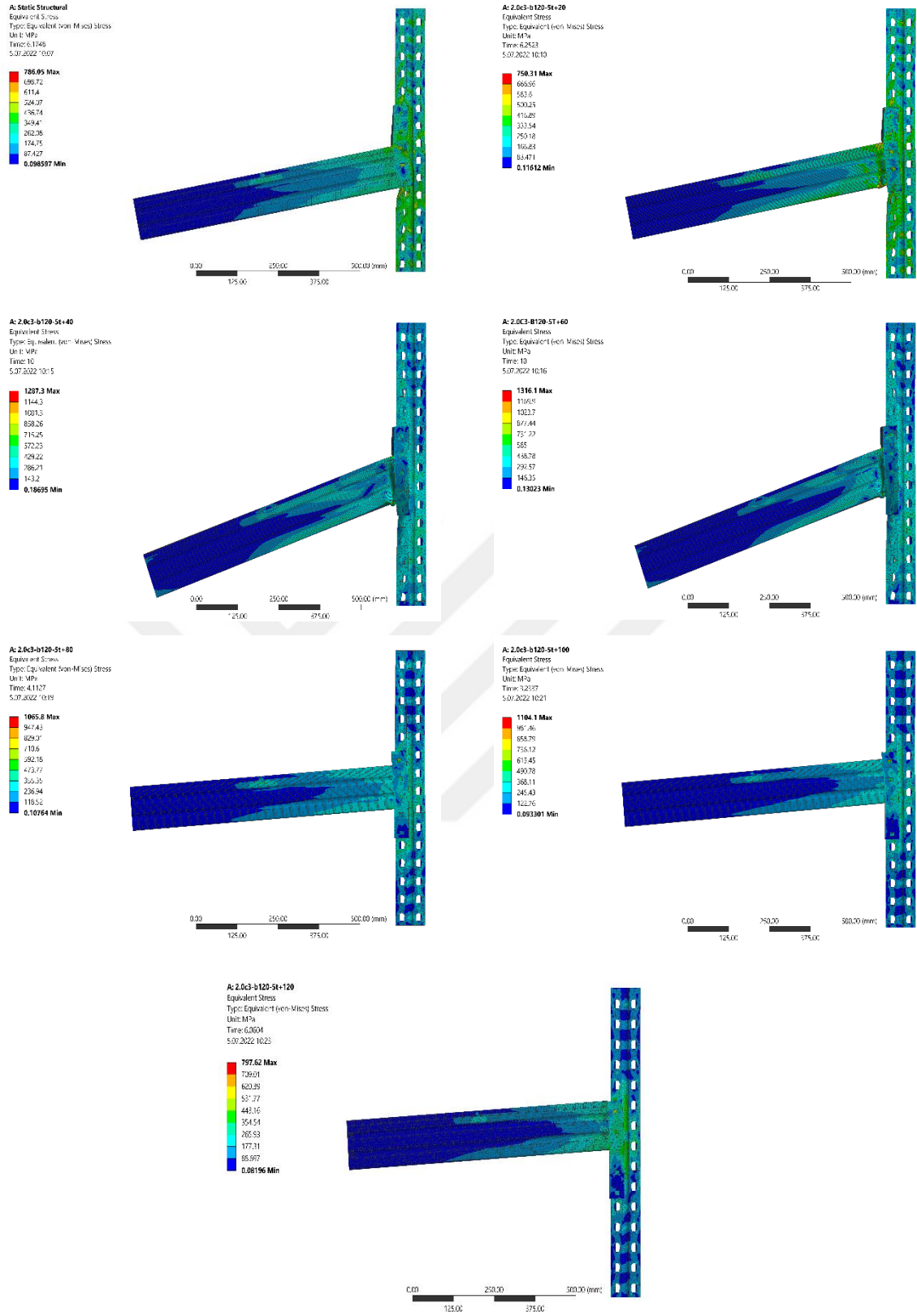
Şekil 121’de 3.0C1 kesitli kiriş-kolon birleşimlerinin, Şekil 122’de 2.5C2 kesitli kiriş-kolon birleşimlerinin, Şekil 123’te 2.0C3 kesitli kiriş-kolon birleşimlerinin ve Şekil 124’te ise 2.0C4 kesitli kiriş-kolon birleşimlerinin von-Mises gerilme dağılımları verilmiştir. Tablo 29’da analiz modellerinin maksimum dönme, maksimum moment, dönme rijitliği ve süneklik değerleri verilmiştir. Deneyi yapılan tüm kiriş -kolon deneylerinin analizleri yapılmış olup göçme modları deneylerdeki göçme moduna benzer davranış sergilemiştir.



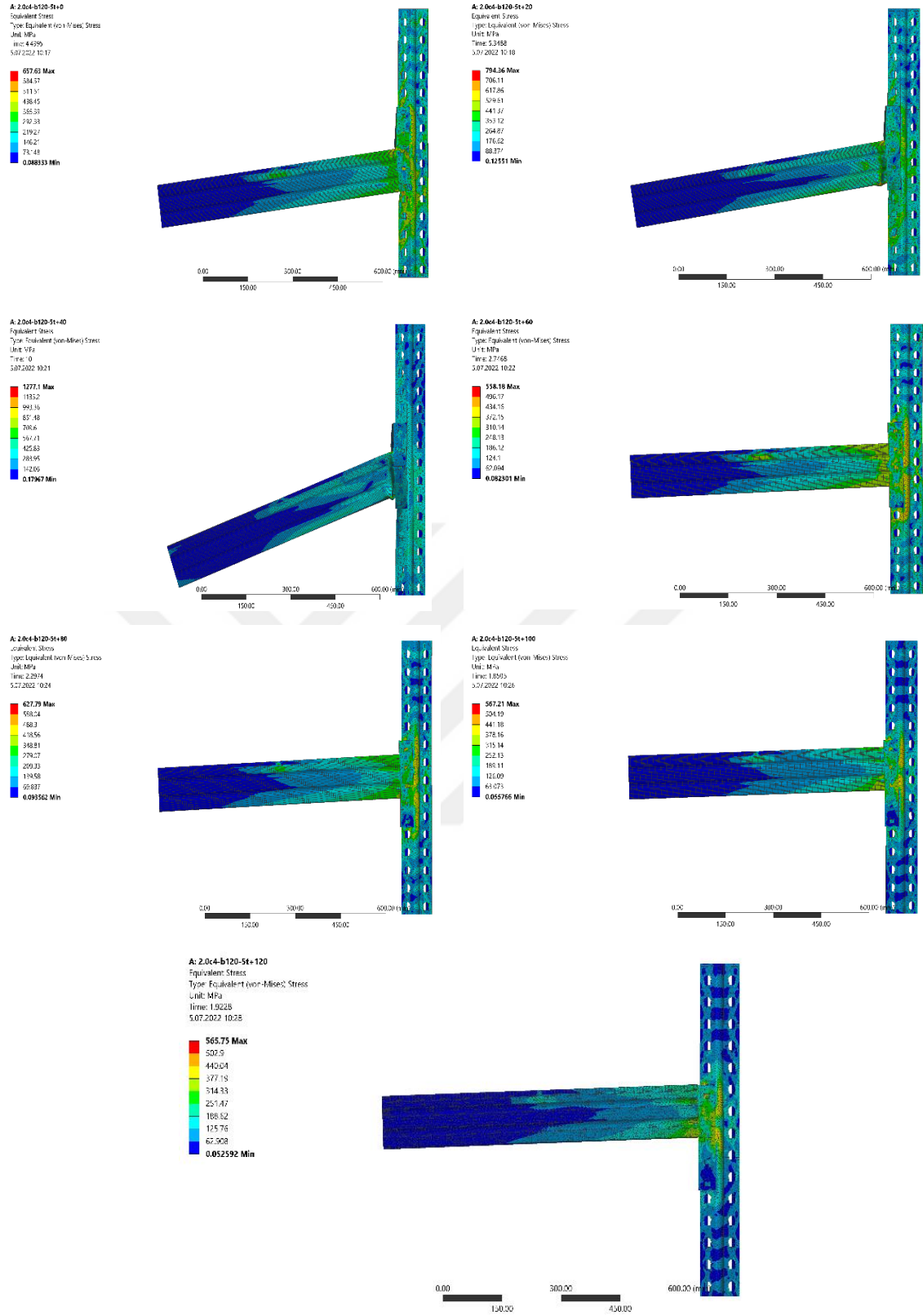
Şekil 121. 3.0C1 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları



Şekil 122. 2.5C2 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları



Şekil 123. 2.0C3 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları



Şekil 124. 2.0C4 kesitli kiriş-kolon birleşimleri için von-Mises gerilme dağılımları

Tablo 29. Tüm Kiriş-Kolon Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları

Deney No	Numune Adı	Azami Dönme (rad)	Moment Kapasitesi (kNm)	Rijitlik (kNm/rad)	Süneklik
1	3.0C1-B120-5t+5	0,044	6,56	625,8	4,89
2	3.0C1-B120-5t+40	0,036	6,00	614,9	4,28
3	3.0C1-B120-5t+60	0,066	6,12	374,2	4,73
4	3.0C1-B140-5t+40	0,072	7,53	525,8	5,90
5	3.0C1-B120-5t+5-B	0,068	6,58	604,9	7,36
6	3.0C1-B120-5t+40-B	0,054	6,80	170,3	1,59
7	3.0C1-B120-5t+60-B	0,067	6,71	134,1	1,57
8	3.0C1-B140-5t+40-B	0,077	7,28	527,1	6,53
9	2.5C2-B120-5t+5	0,026	5,62	610,3	3,28
10	2.5C2-B120-5t+40	0,048	5,75	624,7	6,10
11	2.5C2-B120-5t+60	0,027	5,34	434,7	2,56
12	2.5C2-B140-5t+40	0,097	6,58	536,4	9,34
13	2.5C2-B120-5t+5-B	0,010	5,02	701,2	1,59
14	2.5C2-B120-5t+40-B	0,015	5,66	615,0	1,91
15	2.5C2-B120-5t+60-B	0,017	5,34	474,7	1,80
16	2.5C2-B140-5t+40-B	0,018	6,31	560,4	1,84
17	2.0C3-B120-5t+0	0,068	4,65	284,2	4,88
18	2.0C3-B120-5t+20	0,068	4,98	401,9	6,48
19	2.0C3-B120-5t+40	0,097	4,85	395,3	9,26
20	2.0C3-B120-5t+60	0,102	4,84	295,7	7,36
21	2.0C3-B120-5t+80	0,043	4,71	200,3	2,17
22	2.0C3-B120-5t+100	0,044	4,02	178,7	2,30
23	2.0C3-B120-5t+120	0,029	3,03	197,6	2,19
24	2.0C4-B120-5t+0	0,040	4,82	362,5	3,51
25	2.0C4-B120-5t+20	0,047	4,98	487,0	5,42
26	2.0C4-B120-5t+40	0,093	4,95	448,1	9,88
27	2.0C4-B120-5t+60	0,022	4,67	351,4	1,93
28	2.0C4-B120-5t+80	0,026	4,25	296,9	2,16
29	2.0C4-B120-5t+100	0,017	3,17	281,6	1,73
30	2.0C4-B120-5t+120	0,016	2,65	259,2	1,83

Kolon eksenel basınç davranışı

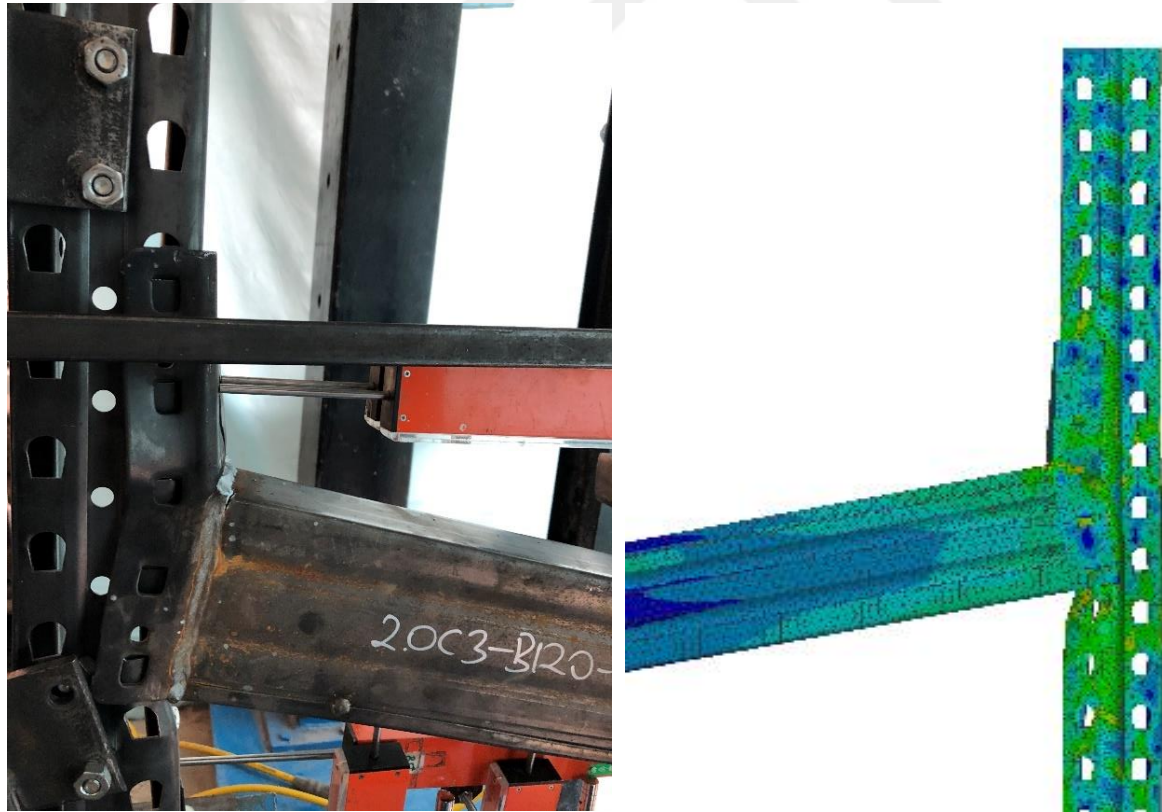
Eksenel basınç deneyleri yapılmış deney numuneleri için sonlu eleman çözümlmeleri ANSYS 18.1 Workbench yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. 3.0C1, 2.5C2, 1.5C3, 2.0C3 ve 2.0C4 kolon numunelerinin 400, 700 ve 1200 mm uzunluğunda bulonlu ve bulonsuz halleri için uygulanan sayısal çözümlmelerde ANSYS 18.1 Workbench ara yüzünde “Statik Structural”

modülü açıldıktan sonra “Eigenvalue Buckling” modülü ile çözüm beraber çalıştırılmıştır. Bu aşamada, çekme pulu deneylerinden alınan Akma Dayanımı, Poisson oranı ve Elastisite Modülü değeri “Structural Steel NL” (yapı çeliği nonlinear) için malzeme özellikleri olarak girilmiş olup eleman boyutu 5 mm olarak belirlenmiştir. Model ara yüzünde kolon kesitinin bir ucuna ankastre mesnet şartı tanımlandıktan sonra diğer ucundan kolon eksenini doğrultusunda 1 N değerinde basınç yüklemesi uygulanmıştır.

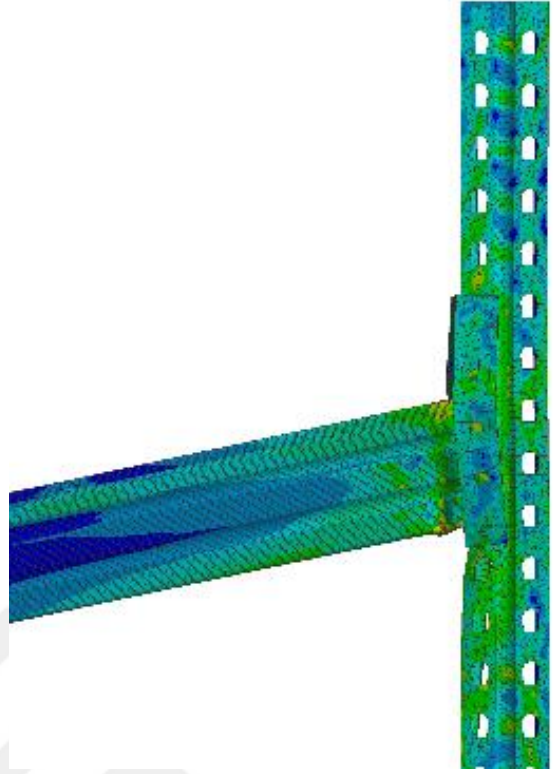
400, 700 ve 1200 mm uzunluğundaki kolonların bulonlu ve bulonsuz halleri için sayısal çözümleme sonuçları, 1.5C3 kesiti için Şekil 128’de, 2.0C3 kesiti için Şekil 129’da, 2.0C4 kesiti için Şekil 130’da, 2.5C2 kesiti için Şekil 131’de ve 3.0C1 kesiti için ise Şekil 132’de verilmiştir.

Tablo 30’da analiz modellerinin kritik burkulma yükü değerleri verilmiştir. Deneyi yapılan tüm kiriş-kolon deneylerinin analizleri yapılmış olup göçme modları deneylerdeki göçme moduna benzer davranış sergilemiştir.

Kiriş-kolon birleşimlerinin 2.0C3-B120-5T+0 deneysel ve sayısal çözümleme sonuçlarının karşılaştırması Şekil 125’te, 2.0C3-B120-5T+20 için Şekil 126’da ve 2.0C4-B120-5T+40 için Şekil 127’de verilmiştir.



Şekil 125. 2.0C3-B120-5T+0 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması



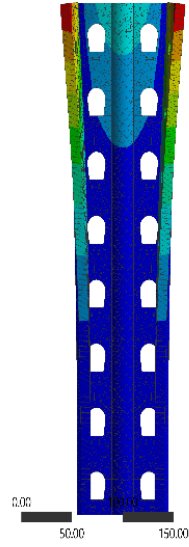
Şekil 126. 2.0C3-B120-5T+20 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması



Şekil 127. 2.0C4-B120-5T+40 deney ve sayısal çözümleme karşılaştırması

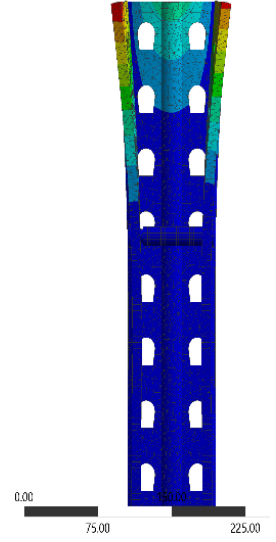
B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 54734
Unit: mm
5.07.2022 11:23

1.0214 Max
0.90794
0.79445
0.68096
0.56746
0.45397
0.34048
0.22699
0.11349
0 Min



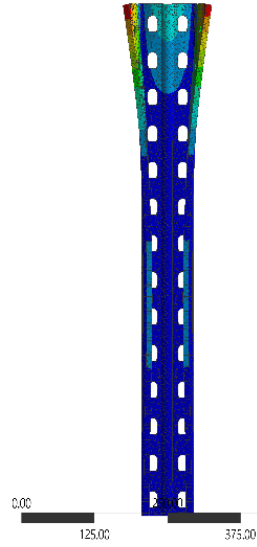
B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 71065
Unit: mm
5.07.2022 11:22

1.0227 Max
0.90909
0.79545
0.68182
0.56818
0.45454
0.34091
0.22727
0.11364
0 Min



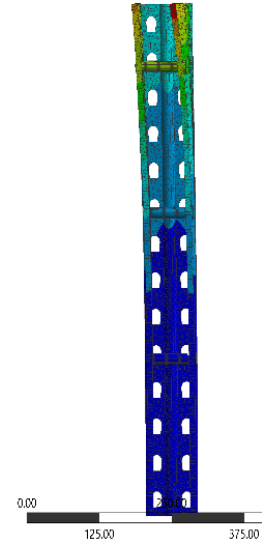
B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 50206
Unit: mm
5.07.2022 11:25

1.0275 Max
0.91335
0.79818
0.68501
0.57084
0.45667
0.34251
0.22834
0.11417
0 Min



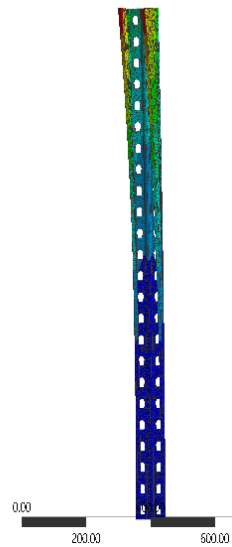
B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 3.7574e+006
Unit: mm
5.07.2022 11:24

1.009 Max
0.89691
0.7848
0.67268
0.56057
0.44846
0.33634
0.22423
0.11211
0 Min



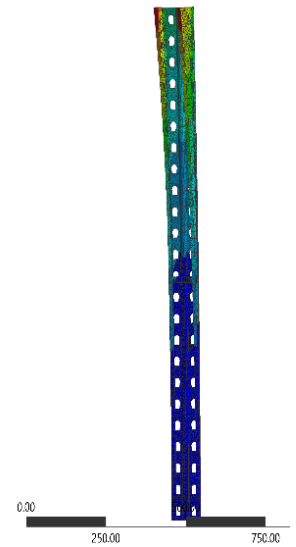
B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 27557
Unit: mm
5.07.2022 11:26

1.032 Max
0.91731
0.80265
0.68798
0.57332
0.45866
0.34399
0.22833
0.11466
0 Min



B: Eigenvalue Buckling
Total Deformation
Type: Total Deformation
Load Multiplier (Nonlinear): 29408
Unit: mm
5.07.2022 11:26

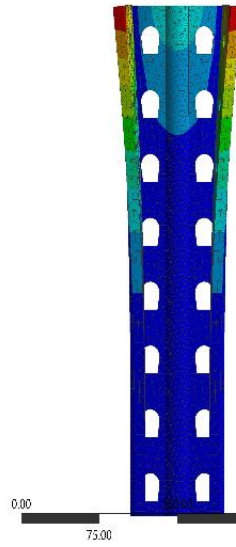
1.0294 Max
0.91503
0.80065
0.68627
0.57189
0.45751
0.34314
0.22876
0.11438
0 Min



Şekil 128. 1.5C3 kolon kesiti için aksel basınç çözümlemesi sonuçları

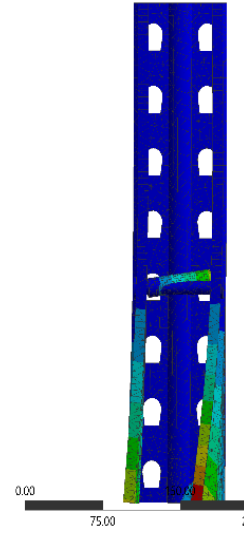
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.0217e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:28

1.0223 Max
 0.90873
 0.79513
 0.68154
 0.56795
 0.45436
 0.34077
 0.22718
 0.11359
0 Min



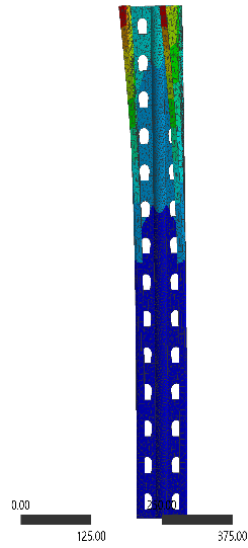
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.4293e-005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:29

1.0072 Max
 0.89453
 0.78338
 0.67147
 0.55956
 0.44765
 0.33574
 0.22382
 0.11191
0 Min



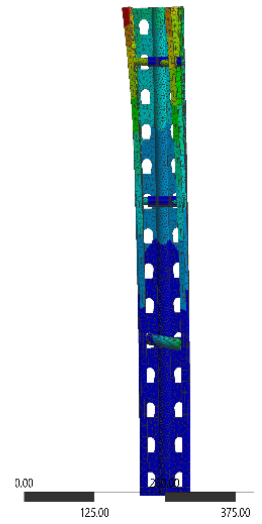
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 81906
 Unit: mm
 5.07.2022 11:31

1.0127 Max
 0.9002
 0.78767
 0.67515
 0.56262
 0.4501
 0.33757
 0.22505
 0.11252
0 Min



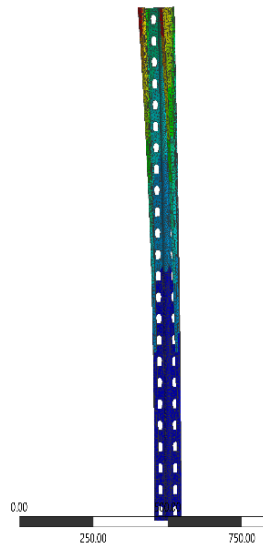
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.3407e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:32

1.0184 Max
 0.90522
 0.79207
 0.67891
 0.56576
 0.45261
 0.33946
 0.2263
 0.11315
0 Min



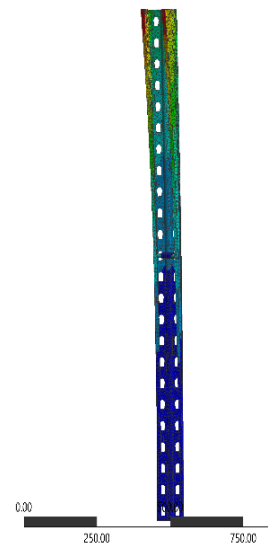
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 40288
 Unit: mm
 5.07.2022 11:35

1.0364 Max
 0.92125
 0.80609
 0.69094
 0.57578
 0.45062
 0.34547
 0.23031
 0.11516
0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 44823
 Unit: mm
 5.07.2022 11:36

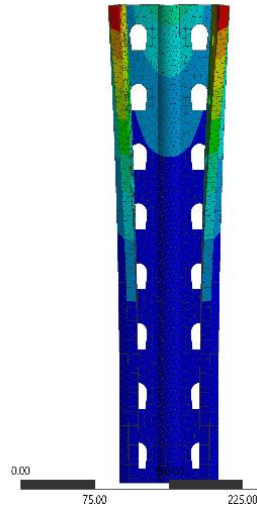
1.0328 Max
 0.91804
 0.80329
 0.68853
 0.57378
 0.45902
 0.34427
 0.22951
 0.11476
0 Min



Şekil 129. 2.0C3 kolon kesiti için aksel basınç çözümlemesi sonuçları

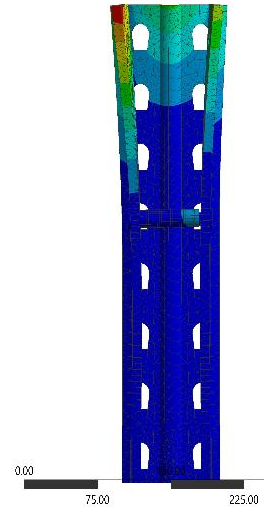
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.1453e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:37

1.0466 Max
 0.93032
 0.81403
 0.69774
 0.58145
 0.46516
 0.34887
 0.23258
 0.11629
 0 Min



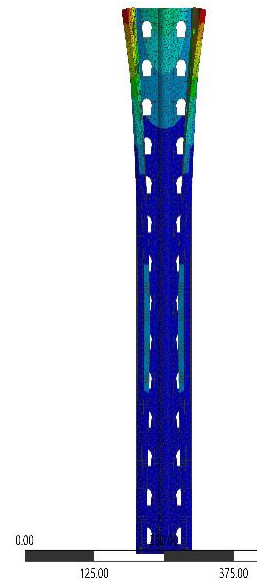
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.4913e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:39

1.0424 Max
 0.92658
 0.81076
 0.69494
 0.57911
 0.46329
 0.34747
 0.23166
 0.11582
 0 Min



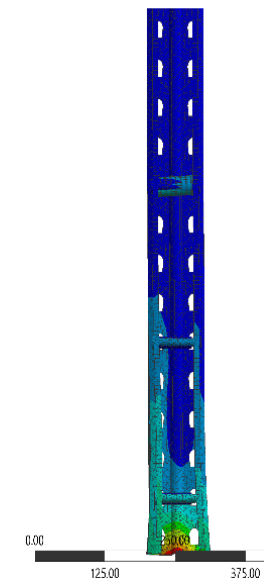
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.0407e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:41

1.0697 Max
 0.95086
 0.832
 0.71314
 0.59428
 0.47543
 0.35657
 0.23771
 0.11886
 0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 2.0682e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:42

1.0056 Max
 0.89387
 0.78214
 0.6704
 0.55867
 0.44693
 0.3352
 0.22347
 0.11173
 0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 54293
 Unit: mm
 5.07.2022 11:43

1.03 Max
 0.91553
 0.80108
 0.68664
 0.5722
 0.45776
 0.34332
 0.22888
 0.11444
 0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 58106
 Unit: mm
 5.07.2022 11:44

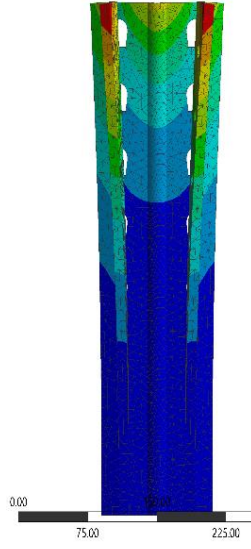
1.0276 Max
 0.91344
 0.79826
 0.68508
 0.5709
 0.45672
 0.34254
 0.22836
 0.11418
 0 Min



Şekil 130. 2.0C4 kolon kesiti için aksel basınç çözümlemesi sonuçları

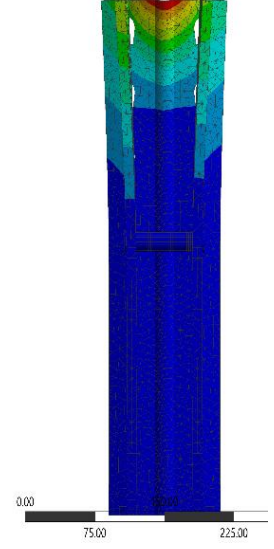
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 2.0461e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:46

1.1238 Max
 0.99889
 0.87403
 0.74917
 0.62431
 0.49945
 0.37459
 0.24972
 0.12486
 0 Min



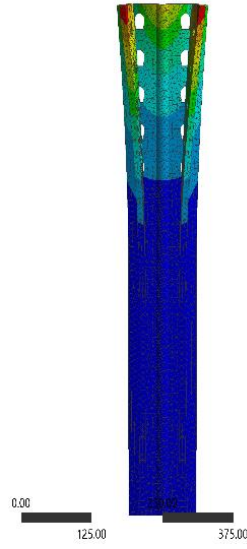
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 2.4728e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:47

1.0014 Max
 0.89009
 0.77883
 0.66757
 0.55631
 0.44505
 0.33379
 0.22252
 0.11126
 0 Min



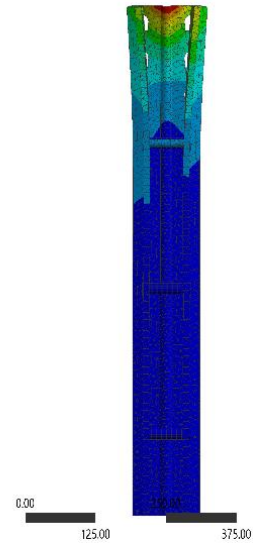
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.8163e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:48

1.2062 Max
 1.0722
 0.93816
 0.80413
 0.67011
 0.53609
 0.40207
 0.26804
 0.13402
 0 Min



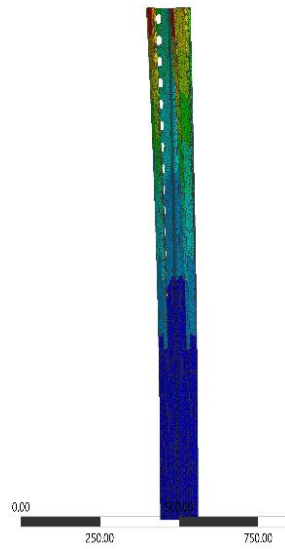
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 2.3412e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:49

1.0007 Max
 0.88948
 0.77829
 0.66711
 0.55592
 0.44474
 0.33355
 0.22237
 0.11118
 0 Min



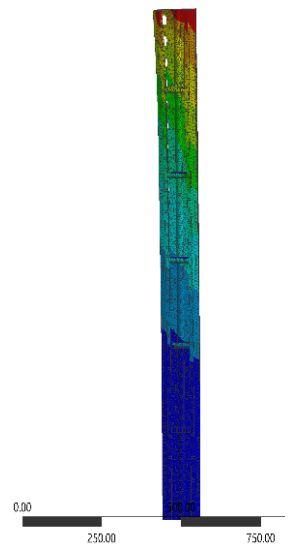
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.1677e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:50

1.0259 Max
 0.91188
 0.79789
 0.68391
 0.56992
 0.45594
 0.34195
 0.22797
 0.11398
 0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.6322e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:51

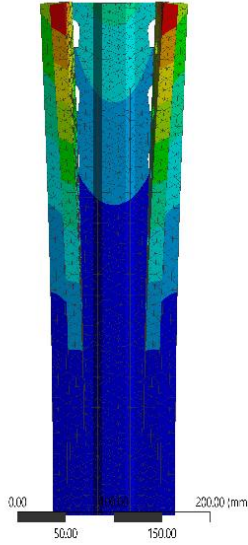
1.0283 Max
 0.91405
 0.79979
 0.68554
 0.57128
 0.45702
 0.34277
 0.22851
 0.11426
 0 Min



Şekil 131. 2.5C2 kolon kesiti için aksenal basınç çözümlemesi sonuçları

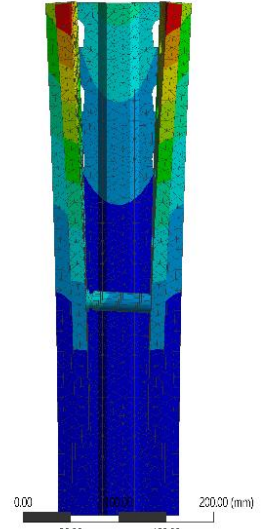
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 3.7248e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:29

1.0807 Max
 0.96064
 0.84056
 0.72048
 0.6004
 0.48032
 0.36024
 0.24016
 0.12008
 0 Min



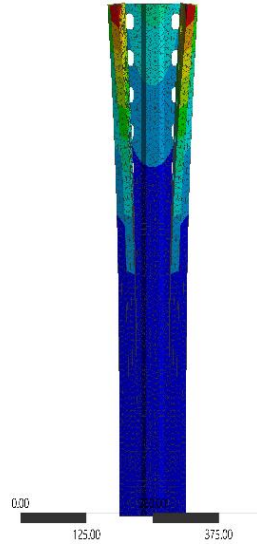
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 3.725e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:31

1.0807 Max
 0.96063
 0.84055
 0.72048
 0.6004
 0.48032
 0.36024
 0.24016
 0.12008
 0 Min



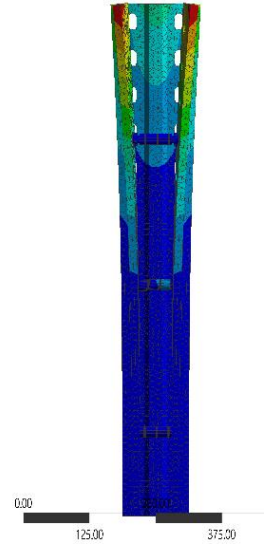
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 3.0954e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:32

1.1047 Max
 0.98197
 0.85922
 0.73648
 0.61373
 0.49098
 0.36824
 0.24549
 0.12275
 0 Min



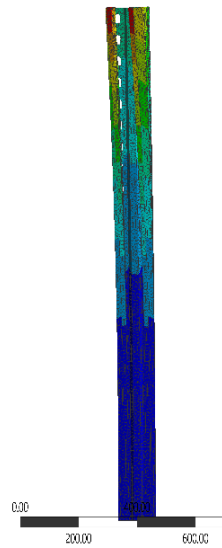
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 3.0955e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:35

1.1047 Max
 0.98198
 0.85923
 0.73649
 0.61374
 0.49099
 0.36824
 0.2455
 0.12275
 0 Min



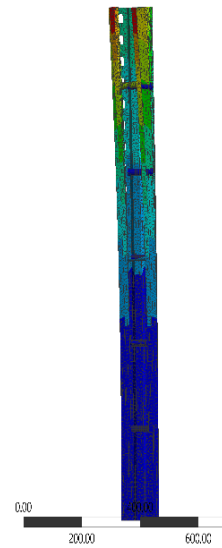
B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 1.9313e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:37

1.0107 Max
 0.89837
 0.78607
 0.67378
 0.56148
 0.44919
 0.33689
 0.22459
 0.1123
 0 Min



B: Eigenvalue Buckling
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Load Multiplier (Nonlinear): 4.6039e+005
 Unit: mm
 5.07.2022 11:38

1.0107 Max
 0.89837
 0.78607
 0.67378
 0.56148
 0.44919
 0.33689
 0.22459
 0.1123
 0 Min



Şekil 132. 3.0C1 kolon kesiti için aksel basınç çözümlemesi sonuçları

Tablo 30. Tüm Kiriş-Kolon Modeller İçin Sayısal Çözümleme Sonuçları

Deney No	Numune Adı	Kritik Burkulma Yüğü (kN)
1	3.0C1-H400	372,5
2	3.0C1-H700	309,5
3	3.0C1-H1200	193,1
4	3.0C1-H400-B	372,5
5	3.0C1-H700-B	309,5
6	3.0C1-H1200-B	193,2
7	2.5C2-H400	204,6
8	2.5C2-H700	181,6
9	2.5C2-H1200	116,8
10	2.5C2-H400-B	247,5
11	2.5C2-H700-B	234,1
12	2.5C2-H1200-B	163,2
13	1.5C3-H400	54,7
14	1.5C3-H700	50,2
15	1.5C3-H1200	27,5
16	1.5C3-H400-B	71,1
17	1.5C3-H700-B	50,3
18	1.5C3-H1200-B	29,4
19	2.0C3-H400	102,1
20	2.0C3-H700	81,9
21	2.0C3-H1200	40,3
22	2.0C3-H400-B	142,9
23	2.0C3-H700-B	134,1
24	2.0C3-H1200-B	44,8
25	2.0C4-H400	114,5
26	2.0C4-H700	104,1
27	2.0C4-H1200	54,2
28	2.0C4-H400-B	149,1
29	2.0C4-H700-B	108,9
30	2.0C4-H1200-B	58,1

Tasarım Değişkenlerinin Davranışa Etkisi**Kolon et kalınlığı**

Farklı kesit tipine sahip kolonların kullanıldığı kiriş-kolon birleşimleri karşılaştırıldığında, kolon et kalınlığındaki artış beklendiği gibi yapısal başarıma olumlu

katkıda bulunmaktadır. Bulon montajından bağımsız olarak kolon et kalınlığı arttıkça, moment taşıma kapasitesi, azami dönme değeri, başlangıç dönme rijitliği ve süneklik değerlerinde artış gözlenmiştir. Kolon eksenel basınç taşıma kapasitesinde de kolon et kalınlığının artışına bağlı olarak iyileşme söz konusu olup kritik burkulma yükleri için daha yüksek değerler elde edilmektedir. Bahsedilen yapısal davranış değişimleri hem deneysel hem de sayısal sonuçlarla doğrulanmaktadır.

Kiriş yüksekliği

Kiriş yüksekliğinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini görmek için kullanılan 120 ve 140 mm yüksekliğindeki kirişler, +40 mm kiriş konumu ile sadece 3.0C1 ve 2.5C2 kolonları kullanılarak deneye tabi tutulmuştur. Ayrıca bulon montajından kaynaklanan sıra dışı göçme mekanizmaları ortaya çıktığı için bu tasarım değişkeni karşılaştırmada hariç tutulmalıdır. B120 ve B140 kirişleri arasındaki ortalama yapısal başarımların artışı, moment taşıma kapasitesi için daha bariz bir seviyede olup azami dönme, başlangıç dönme rijitliği ve süneklik değerlerinde kayda değer bir değişim tespit edilmemiştir.

Kirişin düşey konumu

Kirişin konnektör üzerindeki konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesinin, moment taşıma kapasitesini ve dönme rijitlik değerini doğrudan etkilediği hem deneysel incelemelerde hem de sayısal çözümlemelerde tespit edilmiştir. İlk etapta, kirişin konnektördeki konumu +5, +40 ve +60 konumlarında kaynaklanarak C1 ve C2 tipi kolonlarla kiriş-kolon birleşim deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde kirişin +5 ve +40 konumlarında +60 konumuna göre daha yüksek moment ve dönme rijitliği değerleri sergilediği görülmüştür. Bir sonraki adımda ise kirişin konnektördeki konumu en alt seviyeden başlayıp 20 mm kaydırmak suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Bütün deneyler dikkate alındığında moment taşıma kapasitesi, azami dönme için ve süneklik değerleri için en yüksek değerler genelde +40 konumunda elde edilmiş olup başlangıç dönme rijitliği için +5 ve +20 değerlerinde daha yüksek değerler görülmüştür.

Kirişin yatay konumu

Deneysel çalışmalar kullanılarak sonlu elemanlar modeli doğrulandıktan sonra 5 farklı tip konnektör için kirişin konnektör üzerindeki konumu yatay doğrultuda 0, 6 ve 12 mm kaydırılarak sayısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonucunda bütün modellerde kiriş 0 konumundan 12 mm konumuna doğru kaydırıldığında moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerlerinde düşüş ortaya çıkmıştır.

Konnektörün aşağı yönde uzatılması

Sayısal çözümlerlerde yine 5 farklı tip konnektör için konnektör boyu aşağı yönde 20 mm artırımlı olarak 0, 20, 40, 60 ve 80 mm uzatılmak suretiyle incelemeler yapılmıştır. Konnektör boyu uzadıkça moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerlerinde nispeten düşük seviyede bir iyileşme görülmüştür. Sektörün önde gelen firma temsilcileri ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, yapısal başarımdaki artışa karşın konnektör boyunun uzatılması halinde ortaya çıkacak maliyetlerin yüksek olması sebebiyle tercih edilmeyeceği belirtilmiştir. Bu çıkarımdan hareketle konnektör uzunluğunu incelemeye dönük deneyler gerçekleştirilmemiştir.

Kolon ağız açıklığına bulon montajı

Bu çalışmanın önemli bileşenlerinden biri olarak, konnektörün alt ve üst seviyelerinde kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilerek kiriş-kolon birleşimleri ve kolonlar deneye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler, kiriş-kolon birleşimlerindeki beklenmedik göçme mekanizmaları sebebiyle sıra dışı moment-dönme davranışı ile sonuçlanmıştır. Bulon montajı bulunmayan birleşimler genellikle benzer davranış gösterme eğilimindedir. Ancak kiriş-konnektör birleşim yerinin kaynak bölgesinden ayrılması, kirişin burkulması ve konnektör seviyesinde kolona monte edilen bulonların etkisiyle kolon gövdesinin yırtılması gibi göçme mekanizmaları açıkça bulon montajının sonuçları olarak ortaya çıkmıştır. Bulon montajı ile daha yüksek bir yapısal başarımla elde edilmesi beklense de deney sonuçları kiriş-kolon birleşimlerinden tutarlı bir davranış elde etmek için bu yöntemden kaçınılması gerektiğini vurgulamaktadır.

Kiriş-kolon birleşimlerindeki sonuçlara karşın, kolon ağız açıklığına bulon yerleştirildiğinde kolonların aksenal basınç taşıma kapasitelerinde %3'e yakın artışlar gözlenmiştir. Sayısal çözümlerlerde de deneysel sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir.

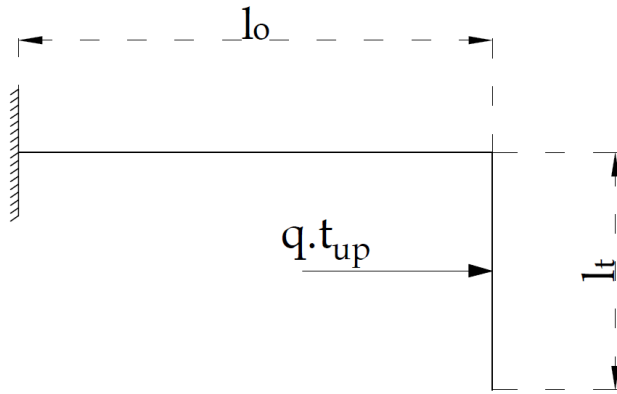
Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Dönme Rijitliği İçin Mekanik Model

Çelik depolama raf sistemlerinin birleşim davranışını araştırmak için öncelikle deneyler tercih edilse de deneysel süreçler pahalı ve zaman alıcıdır. Karmaşık geometrik detaylara sahip çeşitli kiriş-kolon birleşimleri, daha basit ve güvenilir tasarım yöntemlerini zorunlu kılmaktadır. Analitik temele sahip mekanik modeller de bu amaçla kullanılan yardımcı bir araç niteliği taşımaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, soğuk şekillendirilmiş depolama rafların kiriş-kolon birleşimlerinin başlangıçtaki dönme rijitliğini tahmin etmek için bileşen yöntemine dayalı mekanik bir model geliştirilmiştir. Modelde kiriş-kolon birleşimlerinin başlangıç dönme rijitliğine katkıda bulunan on temel deforme olabilen bileşen söz konusudur. Bu bileşenler,

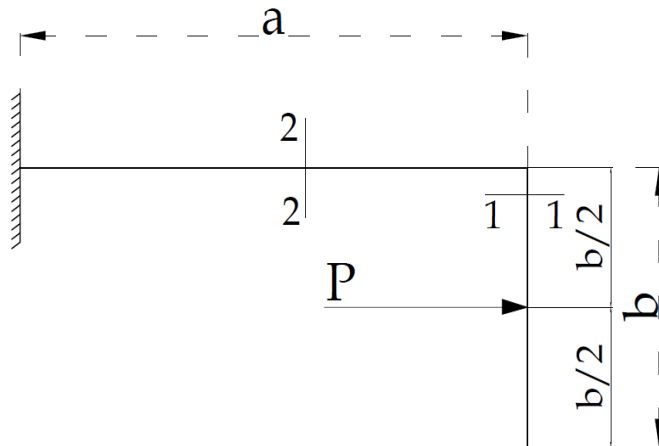
tırnakta eğilme, kolon gövdesinde tırnakların girdiği yuvalarda ezilme, kolon yuvalarında tırnak etkisi ile eğilme, kolon gövdesinde kesme, konnektörde kesme ve eğilme, tırnaklarda kesme, kolon gövdesinde çekme, kolon gövdesinde basınç, kaynak ve kiriş rijitlikleri olarak belirlenmiştir. Geliştirilen mekanik model, tez çalışması kapsamında ulaşılan deneysel sonuçlar ile de doğrulanmış olup çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Tırnaklarda eğilme ($k_{t,b}$)

Tırnak modeli hesaplamaları için Şekil 133'te gösterilen bir mukavemet modeli oluşturulmuştur. Tırnak modelinin mesnet koşulları ve yükleme koşulları şekil üzerinde verilmiş olup sistem dengede iken denge denklemleri yazılmıştır. Denklemlerde karışıklık olmasın diye denge denklemleri yazılmıştır ve detaylar Şekil 134'te verilmiştir. Şekil 135'te ise 1-1 ve 2-2 kesit detayları verilmiş olup kesit detaylarında A ve B noktaları moment alınan noktalar olduğu belirtilmiştir.



Şekil 133. Tırnaklarda eğilme için mukavemet modeli



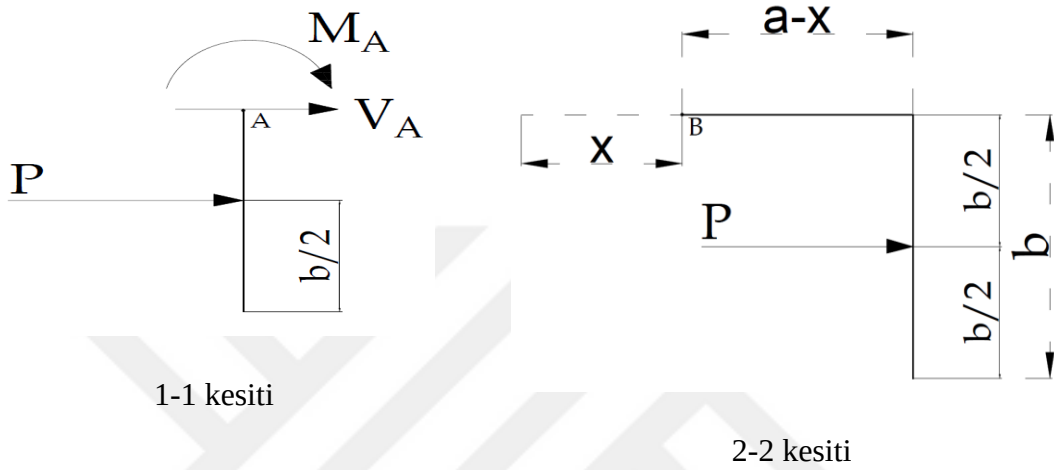
Şekil 134. Tırnaklarda eğilme için mukavemet modeli dönüşümleri

Mekanik model için tırnak modelinde aşağıdaki dönüşümler yapılmıştır. Bu dönüşümler yapıldıktan sonra model Şekil 133'den Şekil 134 haline gelmiştir. 1-1 ve 2-2 kesitleri için moment alınacak noktalar Şekil 135'te verilmiştir.

$$L_0 = a \quad (26)$$

$$q \cdot t_{up} = P \quad (27)$$

$$l_t = b \quad (28)$$



Şekil 135. Tırnak kesit detayları ve moment alınacak noktalar

1-1 kesiti için denge denklemlerini yazacak olursak;

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \quad (\text{Sağ taraf pozitif yön kabul edilmiştir}) \quad (29)$$

$$V_A = -P \quad (30)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (\text{Saat yönünün tersi yönü pozitif yön kabul edilmiştir}) \quad (31)$$

$$-M_A + P \cdot x = 0 \rightarrow M_A = P \cdot x \quad (32)$$

Mesnet noktasına göre denge denklemleri yazıldığında;

$$\rightarrow \sum F_x = 0; \quad (\text{Sağ taraf pozitif yön kabul edilmiştir}) \quad (33)$$

$$N = P; \quad (34)$$

$$\sum M_0 = 0; \quad (\text{Saat yönünün tersi yönü pozitif yön kabul edilmiştir}) \quad (35)$$

$$M_0 = \frac{P \cdot b}{2} \quad (36)$$

$$\frac{dM_A}{dP} = X \quad (37)$$

$$Y_{1-1} = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^{b/2} M \cdot \frac{dM}{dP} dx = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^{b/2} (P \cdot x) \cdot x dx = \frac{P \cdot x^3}{3EI} \Big|_0^{b/2} \quad (38)$$

$$Y_{1-1} = \frac{P \cdot (\frac{b}{2})^3}{EI} \rightarrow Y_{1-1} = \frac{P \cdot b^3}{24EI} \quad (39)$$

2-2 kesiti için denge denklemlerini yazacak olursak;

$$\sum M_B = 0; \quad (\text{Saat yönünün tersi yönü pozitif yön kabul edilmiştir}) \quad (40)$$

$$-M_A + P \cdot b = 0 \rightarrow M_{2-2} = \frac{P \cdot b}{2} \quad (41)$$

$$\frac{dM_A}{dP} = \frac{b}{2} \quad (42)$$

$$Y_{2-2} = \frac{1}{EI} \int_0^{b/2} \frac{P \cdot b}{2} \cdot \frac{b}{2} dx = \frac{P \cdot x \cdot b^2}{3EI \cdot 4} \Big|_0^a \quad (43)$$

$$Y_{2-2} = \frac{P \cdot a \cdot (b)^2}{4EI} \quad (44)$$

$$\delta = Y_{1-1} + Y_{2-2} = \frac{P \cdot b^3}{24EI} + \frac{P \cdot a \cdot (b)^2}{4EI} \quad (45)$$

$$\delta = \frac{P \cdot a \cdot b^2 (b + 6a)}{24E \cdot I} \quad (46)$$

Gerekli dönüşümler yapıldığında δ değeri aşağıdaki gibi bulunacaktır.

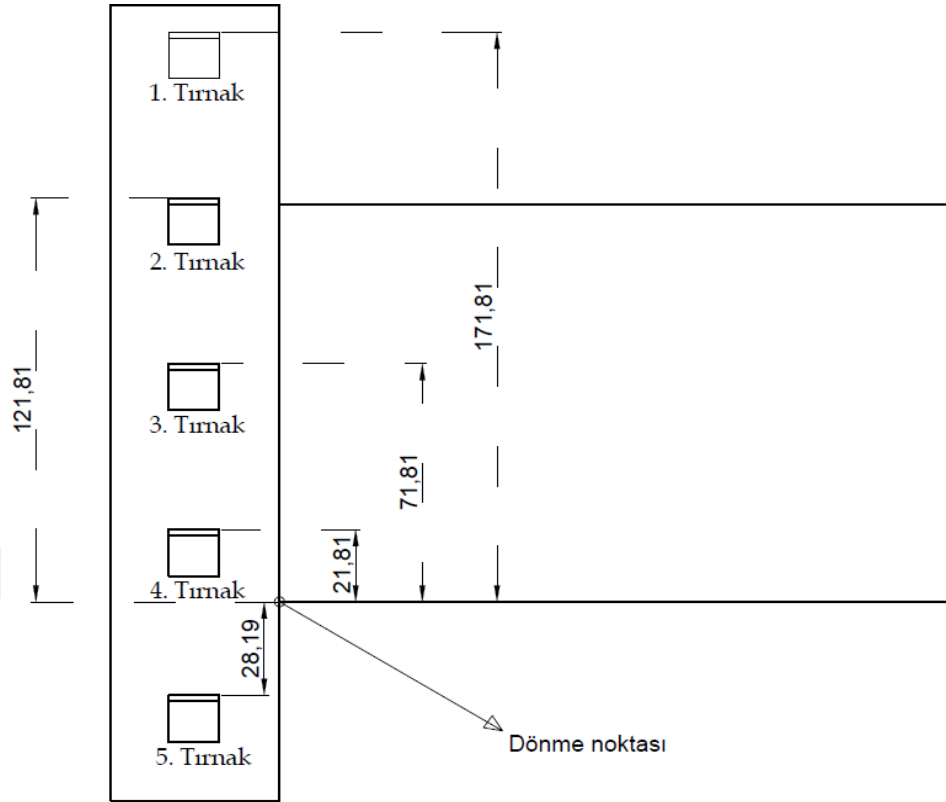
$$\delta_{t,b} = \frac{q \cdot t_{up} \cdot l_t^2 (l_t + 6 \cdot l_0)}{24EI} \quad (47)$$

$$k_{t,b} = \frac{q \cdot b_{eff,u}}{\delta_{t,b}} \quad (48)$$

$$k_{t,b} = \frac{24EI \cdot b_{eff,u}}{t_{up} \cdot l_t^2 (l_t + 6l_0)} \quad (49)$$

Mekanik model oluşturulmadan önce yapılmış olan deneyler ve sayısal çözümlerlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, tırnaklara gelen yüklerin eşit olmadığı ve dönme noktasının tarafsız ekseninde bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu aşamadaki temel sorun, kiriş-konnektör birleşiminde dönme noktası kirişin tarafsız ekseni değil kirişin alt noktasıdır. Bunun asıl nedeni, EN 15512'ye göre konnektör rijit bir malzeme olarak tanımlandığı için tarafsız eksen kiriş kesitinin tam orta noktasıdır (düşey doğrultuda). Yapılmış olan sayısal çözümleme ve deneylerde görüldüğü üzere, dönme noktası kiriş-konnektör birleşiminin alt noktasıdır. Daha önce oluşturulan mekanik modeller bu varsayıma göre yapılmadığı için hatalı sonuçlar sunmaktadır. Nihai olarak, dönme noktası kirişin alt noktasında olduğu için tırnaklara gelen yükler de uzaklıkları ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Konnektördeki tırnaklara gelen yüklerin oransal değerleri aşağıda verilmiştir.

Konnektör ve kiriş birleşim detayı ve tırnakların yerleşim detayları Şekil 136’da verilmiştir.



Şekil 136. Konnektör tırnak yapısı ve dönme noktası

Gerekli mukavemet hesaplamaları yapıldığında tırnaklara gelen yük katsayıları Tablo 31’de verilmiştir.

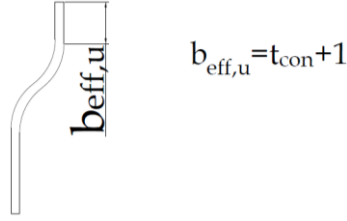
Tablo 31. Tırnaklara Gelen Yüklere Göre Kat Sayı Değerleri

Sıra No	Tırnak Adı	Katsayı
1	1. Tırnak	1.350
2	2. Tırnak	0.958
3	3. Tırnak	0.566
4	4. Tırnak	0.173
5	5. Tırnak	0.220

Kolon gövdesinde tırnakların girdiği yuvalarda ezilme (k_{uwb})

Yapılmış olan deneyler ve sayısal çözümleme modelleri incelendiğinde, d_w değeri basınç ve çekmeye çalışan bölgelerin etkili uzunluğunu temsil etmektedir. Tüm deneylerde üsteki 4 tırnak yuvasının dış kısmı ve en alttaki tırnağın iç kısmı efektif olarak çalışmaktadır. Tırnaklara gelen kesme kuvveti ve moment etkileri sonucu kolon gövdesindeki tırnak yuvaları ezilmeye maruz kalmaktadır. Dolayısı ile k değeri için iç ve dış olmak üzere $k_{uwb,o}$ ve $k_{uwb,i}$ hesaplanmıştır.

Bunun yanı sıra tırnaklara gelen yükler eşit olmadığı gibi tırnak yuvalarına gelen yükler de eşit değildir. Dolayısı ile tırnaklara çarpan olarak eklenen katsayılar tırnak yuvalarına da eklenecektir. Şekil 137’de $b_{eff,u}$ değerinin nasıl hesaplandığı verilmiştir.



Şekil 137. $b_{eff,u}$ değerinin hesaplanması

$$\delta_{uwb} = \frac{q \cdot d_{w,x}}{E \cdot t_{up} \cdot b_{eff,u}} \quad (50)$$

$d_{w,x}$ ifadesindeki x dış tarafı temsil ediyorsa $d_{w,o}$, iç tarafı temsil ediyorsa $d_{w,i}$ yazılacaktır.

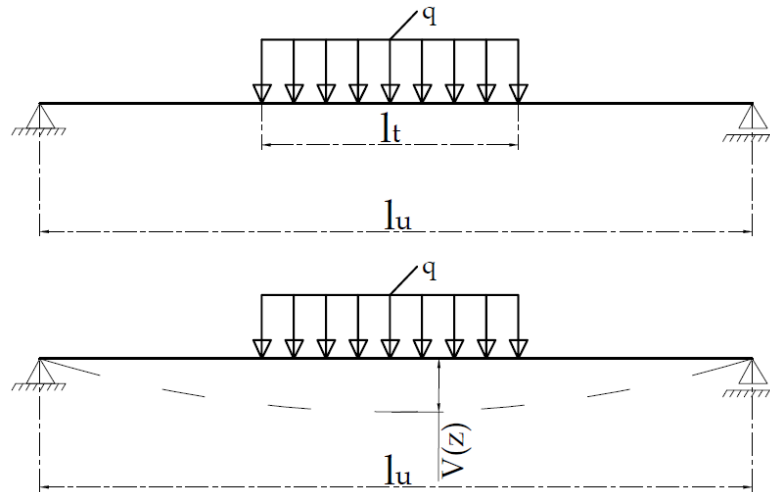
$$k_{uwb} = \frac{q \cdot b_{eff,u}}{\delta_{uwb}} \quad (51)$$

$$k_{uwb,o} = \frac{q \cdot b_{eff,u}}{d_{w,o}} \quad (52)$$

$$k_{uwb,i} = \frac{q \cdot b_{eff,u}}{d_{w,i}} \quad (53)$$

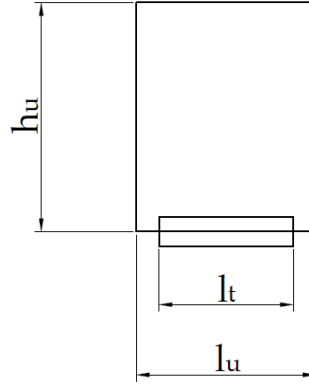
Kolon yuvalarında tırnak etkisiyle eğilme (k_{uf})

Tırnaklara gelen yükler altında kolon yuvasında eğilme etkisi deneylerde de gözlenmiştir. Söz konusu etki, mukavemet hesap yöntemlerine göre hesaplanmıştır. Hesaplamalarda l_t tırnak genişliği, l_u kolonda tırnak yuvası genişliği, h_u tırnak yuvası yüksekliği ve $V(z)$ çökme değeridir. Tırnak yapısının mukavemet modeli Şekil 138’de, tırnak yapısının kesiti ise Şekil 139’da verilmiştir.



Şekil 138. Tırnak ve yuvasının mukavemet modeli

Kolon yuvasındaki boşluk



Şekil 139. Tırnak yuvasının en kesit detayı

$$EI_x V^4(z) = q \quad \text{yayılı yük} \quad (54)$$

$$EI_x V^3(z) = q \cdot z + c_1 \quad \text{kesme kuvveti} \quad (55)$$

$$EI_x V^2(z) = \frac{q \cdot z^2}{2} + c_1 \cdot z + c_2 \quad \text{eğilme momenti} \quad (56)$$

$$EI_x V^1(z) = \frac{q \cdot z^3}{6} + \frac{c_1 \cdot z^2}{2} + c_2 \cdot z + c_3 \quad \text{dönme açısı} \quad (57)$$

$$EI_x V(z) = \frac{q \cdot z^4}{24} + \frac{c_1 \cdot z^3}{6} + \frac{c_2 \cdot z^2}{2} + c_3 \cdot z + c_4 \quad \text{çökme} \quad (58)$$

Sınır şartları;

$$V(0) = 0 \quad \rightarrow c_4 = 0; \quad (59)$$

$$V^2(0) = 0 \quad \rightarrow c_2 = 0; \quad (60)$$

$$V(l) = 0 \quad \rightarrow c_1 = \frac{-q \cdot l^2}{2} \quad (61)$$

$$V^2(l) = 0 \quad \rightarrow c_3 = \frac{q \cdot l^3}{24}; \quad (62)$$

$$I_x = \frac{l_u h_u^3}{12} \quad (63)$$

$$EI_x V(z) = \frac{q \cdot z^4}{24} - \frac{q l}{2} \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{q \cdot l^3 z}{24} \quad (64)$$

$$V(z) = \frac{1}{EI_x} \left(\frac{q \cdot z^4}{24} - \frac{q l}{2} \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{q \cdot l^3 z}{24} \right) \quad (65)$$

Kolonda tırnak yuvasının tam orta noktasındaki çökme değerini bulmak için çökme denkleminde $z=l_u/2$ yazılmıştır.

$$\delta_{uwf} = V(z) = \frac{1}{Elx} \left(\frac{q \cdot z^4}{24} - \frac{ql}{2} \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{q \cdot l^3 z}{24} \right) \quad (66)$$

$$z = \frac{l_u}{2} \quad (67)$$

$$V = \left(\frac{l_u}{2} \right) = \frac{1}{Elx} \left(\frac{q \cdot l_u^4}{384} - ql_t \frac{l_u^3}{96} + \frac{q \cdot l_t^3 l_u}{48} \right) \quad (68)$$

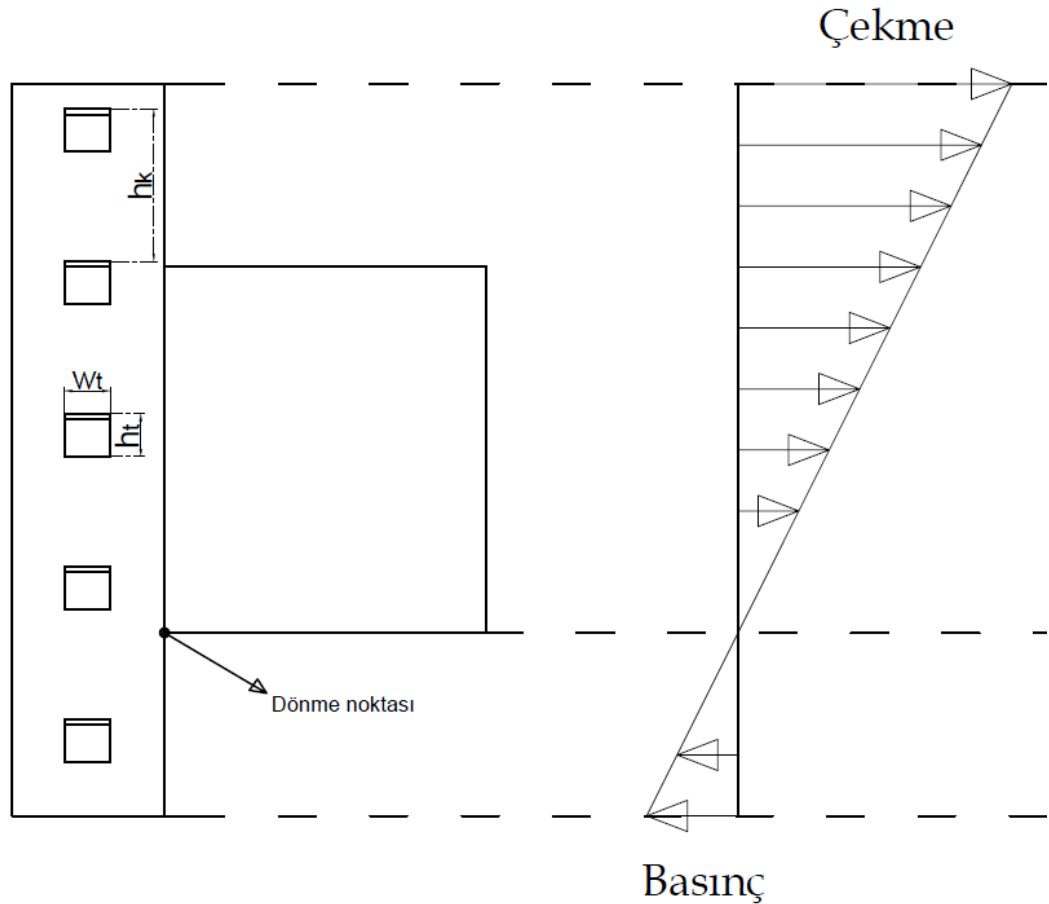
$$k_{uwf} = \frac{q \cdot b_{eff,u}}{\delta_{uwf}} \quad (69)$$

$$I_x = \frac{t_{up} h_u^3}{12} \quad (70)$$

$$k_{uwf} = \frac{Elb_{eff,u}}{\left(\frac{l_u^4}{384} - \frac{l_t \cdot t_u^3}{96} + \frac{l_u l_t^3}{48} \right)} \quad (71)$$

Kolon gövdesinde kesme (k_{uws})

Yapılmış olan deney ve sayısal çözümler incelendiğinde, kiriş-konnektör birleşiminde kirişin alt noktası dönme noktasıdır. Dolayısıyla dönme noktasının üstünde kalan tırnakların dış kısmı, dönme noktasının altında kalan tırnakların ise iç kısmı kesmeye çalışır. Kesit detayları ve tanımlamalar Şekil 140’da verilmiştir.



Şekil 140. Kolon gövdesinde gerilme dağılımı

Şekil 140’da görüleceği üzere, dönme noktasına uzak olan tırnaklara daha fazla kuvvet gelmekte olup gerilme seviyesi daha yüksektir. Dolayısı ile tüm tırnaklar için bulunan katsayılar kolon gövdesinde kesme rijitliği belirlenirken kullanılacaktır.

Eurocode-3’e göre;

$$k_{uws} = \frac{F}{\delta_{uwf}} \quad (72)$$

$$\beta = 1 - \frac{h_c}{h_u} \quad (73)$$

$$F_{uws} = \frac{V_{uws}}{\beta} \quad (74)$$

$$V_{uws} = F_{y,uw} \cdot A_{wu} \quad (V_{uws}: \text{Kolon gövdesindeki kesme direnci}) \quad (75)$$

$$A_{wu} = h_k \cdot w_t \quad (76)$$

$$A_{wu,net} = h_t \cdot w_t \quad (77)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \rightarrow G = 0.3846 \cdot E \quad (78)$$

$$F_{uws} \frac{F_{y,uw} \cdot A_{wu}}{\beta} \quad (79)$$

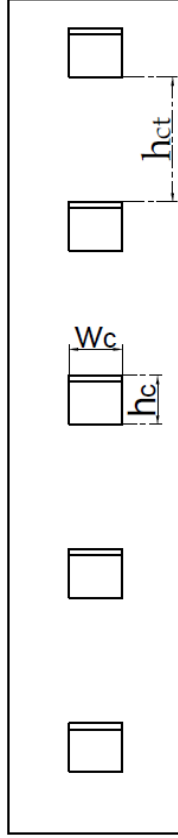
Kesme kuvveti sonucu deformasyon;

$$\delta = \frac{F \sum h_{t,i}}{G \cdot A_{wu,net}} + \frac{F \sum h_{k,i}}{G \cdot A_{wu}} \quad (80)$$

$$k_{uws} = \frac{0.3846E}{\beta \left(\frac{F \sum h_{t,i}}{A_{wu,net}} + \frac{F \sum h_{k,i}}{G \cdot A_{wu}} \right)} \quad (81)$$

Konnektörde kesme ve eğilme (k_{csb})

Kirişe uygulanan yük sonucu konnektör tırnaklarında hem kesme kuvveti hem de eğilme momenti oluşmakta olup birleşik mukavemet hali söz konusudur. Dolayısı ile toplam yer değiştirmeyi hesaplayabilmek için kesme ve eğilmeden meydana gelecek toplam şekil değiştirmenin bulunması gerekmektedir. Konnektör kesit detayları Şekil 141’de verilmiştir.



Şekil 141. Konnektör kesit detayları

Konnektördeki kesme ($k_{csb,s}$);

$$\delta_{csb} = \delta_{csb,s} + \delta_{csb,b} \quad (82)$$

$$\beta = 1 - \frac{h_c}{h_u} \quad (83)$$

$$G = \frac{E}{2(1+V)} \rightarrow G = 0.3846.E \quad (84)$$

$$F_{csb} = \frac{V_{csb}}{\beta} \quad (85)$$

$$V_{csb} = F_{y,c}.A_{wc} \quad (86)$$

$$F_{csb} = \frac{F_{y,c}.A_{wc}}{\beta} \quad (87)$$

Konnektördeki kesme kuvveti sonucu deformasyon ($\delta_{csb,s}$);

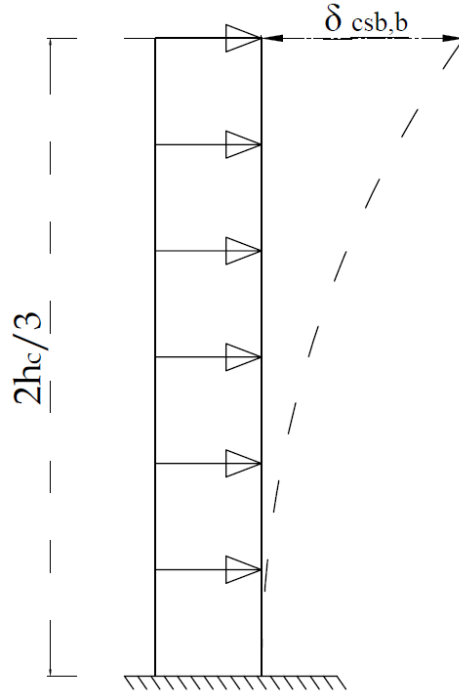
$$\delta_{csb,s} = \frac{F \sum h_{c,i}}{G * A_{wc,net}} + \frac{F \sum h_{ct,i}}{G * A_{wc}} \quad (i: \text{tırnak sayısı}) \quad (88)$$

$$k_{csb} = \frac{F}{\delta_{csb}} \quad (89)$$

$$k_{csb,s} = \frac{0.3846E}{\beta * \left(\frac{F \sum h_{c,i}}{A_{wc,net}} + \frac{F \sum h_{ct,i}}{G * A_{wc}} \right)} \quad (90)$$

Konnektörde eğilme ($\delta_{csb,b}$);

Konnektörün mukavemet modeli oluşturulmuş olup kesit detayları Şekil 142’de verilmiştir.



Şekil 142. Konnektör için mukavemet modeli

$$\delta_{csb,b} = \frac{q(\frac{2h_c}{3})^4}{8EI} \quad (91)$$

$$\delta_{csb,b} = \frac{16q.h_c^4}{648EI} \quad (92)$$

$$I = \frac{W_ch_u^3}{12} \quad (93)$$

$$k_{csb,b} = \frac{q\frac{2}{3}h_c}{\delta_{csb,b}} \quad (94)$$

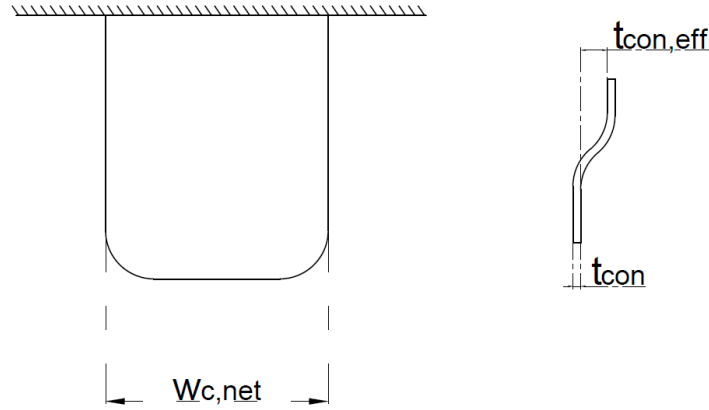
$$k_{csb,b} = \frac{27EI}{h_c^3} \quad (95)$$

$$k_{csb,b} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{27EI}{h_c}} + \frac{1}{\frac{0.3846E}{\beta * (\frac{F \sum h_{c,i}}{A_{wc,net}} + \frac{F \sum h_{ct,i}}{G * A_{wc}})}}} \quad (96)$$

$$k_{csb} = \frac{1}{\frac{1}{k_{csb,b}} + \frac{1}{k_{csb,s}}} \quad (97)$$

Tırnaklarda kesme ($k_{t,s}$)

Tırnaklara gelen yüklerden dolayı kesme kuvvetinin hesabını yapabilmek için tırnakların mukavemet modeli oluşturulmuş olup Şekil 143'te verilmiştir.



Şekil 143. Tırnaklarda kesme için mukavemet modeli

$$t_{con,eff} = t_{con} - 1 \quad (98)$$

$$A_v = w_{c,net} \cdot t_{con} \quad (99)$$

$$F_{t,s} = A_v \cdot (F_{u,co} / \sqrt{3}) \quad (100)$$

$$\delta_{t,s} = \left(\frac{w_{c,net}^3}{3EI} + \frac{1.2w_{c,net}}{G \cdot A_w} \right) \cdot F \quad (101)$$

$$k_{t,s} = \frac{F}{\delta_{t,s}} \quad (102)$$

$$k_{t,s} = \frac{1}{\frac{w_{c,net}^3}{3EI} + \frac{1.2w_{c,net}}{0.3846EA_w}} \quad (103)$$

Kolon gövdesinde çekme (k_{uwt})

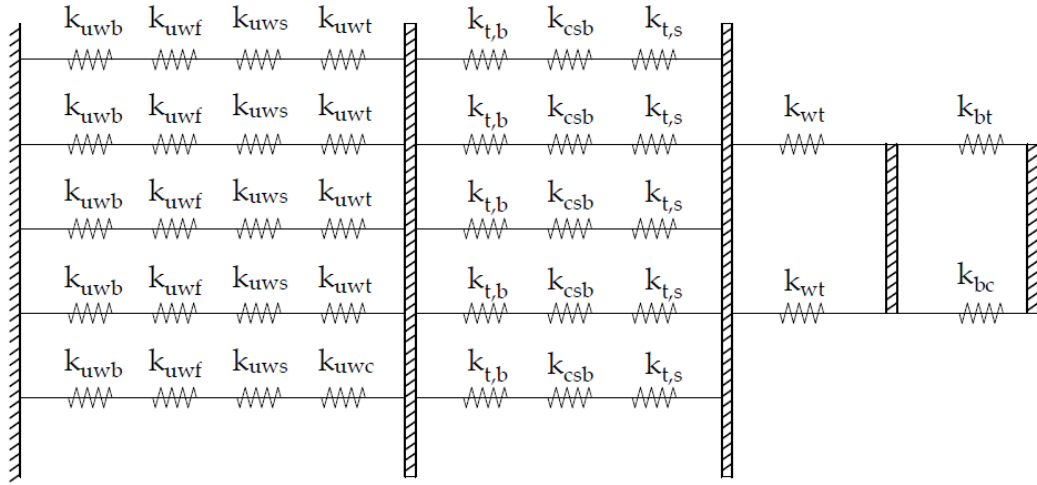
Eurocode-3'e göre kolon gövdesindeki çekme sonucu rijitlik değeri aşağıdaki gibi bulunmaktadır. Kolonda $b'_{eff,t}$ ve $b'_{eff,c}$ değerlerinin nasıl bulunacağı Şekil 144'te verilmiştir.

$$k_{uwt} = \frac{E \cdot b'_{eff,t} t_u}{d_{wc,t}} \quad (104)$$

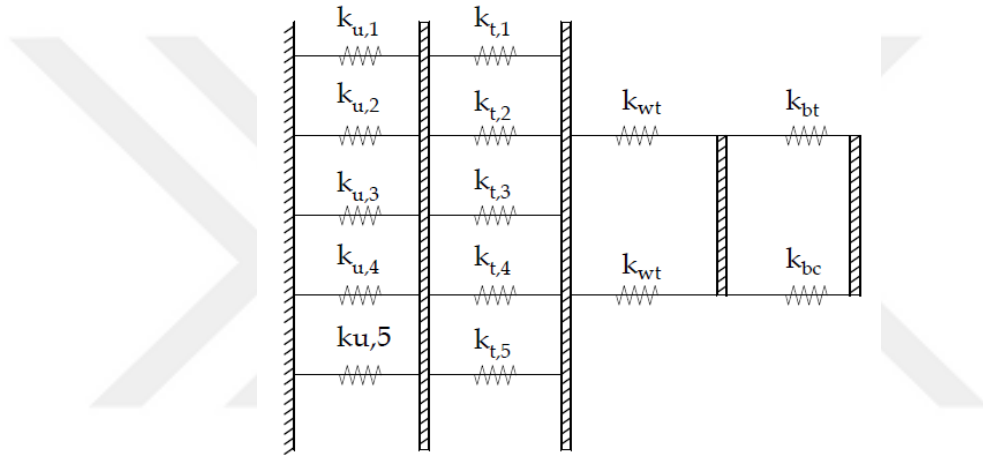
Kolon gövdesinde basınç (k_{uwc})

Eurocode-3'e göre kolon gövdesindeki basınç sonucu rijitlik değeri aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

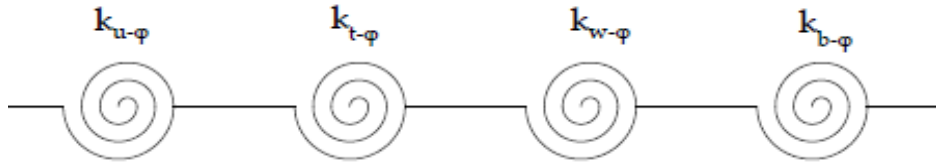
$$k_{uwc} = \frac{E \cdot b'_{eff,t} t_u}{d_{wc,c}} \quad (105)$$



Şekil 145. Mekanik model yay modeli

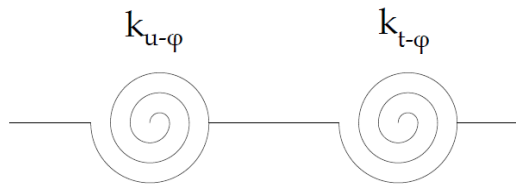


Şekil 146. Mekanik model bileşke yay modeli



Şekil 147. Mekanik model dönüşmüş yay modeli

Nihai olarak mekanik model yay modeli Şekil 148'de verilmiştir.



Şekil 148. Mekanik model nihai yay modeli

Her eşdeğer yayda $k_{u,i}$ ve $k_{t,i}$ için moment kolu, yayın bulunduğu düşey konumdan dönme noktasına olan net uzaklığı olarak belirtilmiştir. Kolona ait rijitlik değeri denklem 110'da konnektöre ait rijitlik değeri ise denklem 111'de verilmiştir.

$$k_{u-\varphi} = \sum_{i=1}^n k_{u,i} * d_i^2 \quad (110)$$

$$k_{t-\varphi} = \sum_{i=1}^n k_{t,i} * d_i^2 \quad (111)$$

Kiriş-kolon birleşiminde kolondan gelen dönme rijitliği değeri ($k_{u-\varphi}$) ve konnektörden gelen rijitlik değerinin ($k_{t-\varphi}$) bileşke hali ile giriş-kolon birleşiminin ilk dönme rijitliği değeri (k_0) ise aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

$$k_{int} = \frac{1}{\frac{1}{k_{u-\varphi}} + \frac{1}{k_{t-\varphi}}} \quad (112)$$

Son olarak, nihai dönme rijitliğinin belirlenebilmesi için mekanik modele şekil faktörü dâhil edildiğinde k_0 değeri bulunmaktadır.

a : kolon kesitinin gövde genişliği, s : şekil faktörü

$$s = a/105 \quad (113)$$

$$k_0 = s * k_{int} \quad (114)$$

Deneysel sonuçlarla mekanik modelin doğrulanması

Önerilen mekanik modeli doğrulamak için, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan bulon kullanılmayan ve girişin konnektördeki konumu tam ortada olan numuneler seçilmiştir. Seçilen deney numunelerine ait tasarım değişkenleri mekanik modele girilmiş olup her bir değişkenin rijitlik değeri hesaplanmıştır. Son aşamada mekanik model dönme rijitlik değeri (k_0) hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen dönme rijitliği değerleri ise k_e olarak isimlendirilmiştir. Deneysel ve mekanik model rijitlik değerleri ve oransal rijitlik değerleri Tablo 32'de verilmiştir. Konnektörün orta noktası girişin orta noktasına denk gelen giriş-konnektör modelleri için mekanik model hesaplamaları yapılmıştır.

Önerilen mekanik model, literatürde bulunan 3 farklı giriş-kolon birleşimlerinin deneysel olarak incelendiği numuneler için dönme rijitliği değerleri hesaplanmıştır. Mekanik model dönme ile elde edilen rijitlik değeri (k_0) hesaplanmıştır. Deneysel olarak elde edilen dönme rijitliği değerleri ise k_e olarak isimlendirilmiş olup ilgili çalışmadaki dönme rijitliği değeri alınmıştır. Deneysel ve mekanik model rijitlik değerleri ve oransal rijitlik değerleri Tablo 33'te verilmiştir.

Tablo 32. Mekanik Model Rijitlik Değerlerinin Doğrulanması

Deney No	Deney Adı	k_0 (kNm/rad)	k_e (kNm/rad)	Hata oranı (%)
1	3.0C1-B120-5T+60	233,7	220,3	+6,1
2	2.5C2-B120-5T+60	205,1	209,9	-2,3
3	2.0C3-B120-5T+60	139,7	145,7	-4,1
4	2.0C4-B120-5T+60	155,2	150,3	3,3
Ortalama hata				3,9
Standart sapma				4,8

Tablo 33. Mekanik Model Rijitlik Değerlerinin Literatürdeki Çalışmalar ile Doğrulanması

Deney No	Deney Adı	k_0 (kNm/rad)	k_e (kNm/rad)	Hata oranı (%)
1	2.0UT-5T-125BD (Mohan ve Vishnu 2013)	155,2	180,0	-13,8
2	2.6UT-125BD-5L (Shariati vd. 2018)	165,0	124,9	+32,1
3	C5-B120-5T (Zhao vd. 2014)	170,9	198,5	-13,9
4	C4-B105-5T (Zhao vd. 2014)	153,8	173,0	-11,1
5	C3-B105-5T (Zhao vd. 2014)	153,8	169,8	-9,4
6	A 1.6UT-5L-125BD (Mohan vd. 2015)	124,7	151,1	-17,5
7	A 1.8UT-5L-125BD (Mohan vd. 2015)	131,8	157,7	-16,4
8	B 2.0UT-5L-125BD (Mohan vd. 2015)	139,3	192,6	-27,7
9	2.0UT-5L-125BD (Prabha vd. 2010)	139,3	114,6	+21,5
10	2.0UT-125BD-5T (Shah vd. 2015)	126,7	97,9	+29,4
11	2.6UT-125BD-5T (Shah vd. 2015)	144,3	131,1	+10
Ortalama hata				18,4
Standart sapma				20,9

SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, soğuk şekillendirilmiş çelik depolama raflarının kiriş-kolon birleşimlerinin moment-dönme ilişkileri ve göçme mekanizmaları EN 15512 deney yönergelerine göre ele alınmış, deney sonuçları kullanılarak oluşturulan analitik bir modelin yanı sıra kiriş-kolon birleşimlerinin dönme rijitliğini tahmin edecek nitelikte mekanik bir model de geliştirilmiştir. Ayrıca tasarım değişkenlerine bağlı olarak kiriş-kolon birleşim davranışı ve kolon davranışı da incelenmiştir. Kolon et kalınlığı, kiriş yüksekliği, kirişin konnektör üzerindeki konumu ve kolon ağız açıklığına bulon montajı gibi durumlar deneysel olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı sayısal çözümler, analitik model ve mekanik model çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Farklı kesit tipi ve et kalınlığına sahip kolonların kullanıldığı kiriş-kolon birleşimleri karşılaştırıldığında, kolon et kalınlığındaki artış beklendiği gibi yapısal başarıma olumlu katkıda bulunmaktadır. Bulon montajından bağımsız olarak kolon et kalınlığı arttıkça, moment taşıma kapasitesi, azami dönme değeri, başlangıç dönme rijitliği ve süneklik değerlerinde artış gözlenmiştir. Kolon eksenel basınç taşıma kapasitesinde de kolon et kalınlığının artışına bağlı olarak iyileşme söz konusu olup kritik burkulma yükleri için daha yüksek değerler elde edilmektedir. Bahsedilen yapısal davranış değişimleri hem deneysel hem de sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır.
- Kiriş yüksekliğinin yapısal davranış üzerindeki etkilerini görmek için kullanılan farklı yüksekliklere sahip iki kiriş tipi kıyaslandığında görülen ortalama yapısal başarımların artışı, moment taşıma kapasitesi için daha bariz bir seviyede olup azami dönme, başlangıç dönme rijitliği ve süneklik değerlerinde kayda değer bir değişim tespit edilmemiştir.
- Kirişin konnektör üzerindeki konumunun düşey doğrultuda değiştirilmesinin, moment taşıma kapasitesini ve dönme rijitlik değerini doğrudan etkilediği hem deneysel incelemelerde hem de sayısal çözümlerle tespit edilmiştir. Dört ayrı kolon tipi kullanılarak gerçekleştirilen incelemeler sonucunda moment taşıma kapasitesi, azami dönme değeri ve süneklik değerleri için en yüksek değerler genelde orta seviyeye yakın konumda elde edilmiş olup başlangıç dönme rijitliği için ise konnektörün alt seviyesine yakın konumlarda daha yüksek değerler görülmüştür.

- Deneysel çalışmalar kullanılarak sonlu elemanlar modeli doğrulandıktan sonra kirişin konnektör üzerindeki konumu yatay doğrultuda kaydırılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. İncelemeler sonucunda, kiriş içeri doğru kaydırıldığında moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerlerinde düşüş ortaya çıkmış olup tasarımı bu nitelikte değiştirmenin yapısal başarımlar açısından tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.
- Konnektör boyu aşağı yönde uzatılmak suretiyle sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Konnektör boyu uzadıkça moment taşıma kapasitesi ve başlangıç dönme rijitliği değerlerinde nispeten düşük seviyede bir iyileşme görülmüştür. Sektörün önde gelen firma temsilcileri ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, yapısal başarımdaki artışa karşın konnektör boyunun uzatılması halinde ortaya çıkacak maliyetlerin yüksek olması sebebiyle tercih edilmeyeceği belirtilmiştir. Bu çıkarımdan hareketle konnektör uzunluğunu incelemeye dönük deneyler gerçekleştirilmemiştir.
- Bu çalışmanın önemli bileşenlerinden biri olarak, konnektörün alt ve üst seviyelerinde kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilerek kiriş-kolon birleşimleri ve kolonlar deneye tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler, kiriş-kolon birleşimlerindeki beklenmedik göçme mekanizmaları sebebiyle sıra dışı moment-dönme davranışı ile sonuçlanmıştır. Kiriş-konnektör birleşim yerinin kaynak bölgesinden ayrılması, kirişin burkulması ve konnektör seviyesinde kolona monte edilen bulonların etkisiyle kolon gövdesinin yırtılması gibi göçme mekanizmaları ortaya çıkmıştır. Bulon montajı ile daha yüksek bir yapısal başarımlar elde edilmesi beklense de deney sonuçları kiriş-kolon birleşimlerinden tutarlı bir davranış elde etmek için bu yöntemden kaçınılması gerektiğini vurgulamaktadır.
- Kiriş-kolon birleşim deneyleri esnasında kolonların birleşim bölgelerinde hasarlar meydana gelmiştir. Literatür araştırması yapıldığında, hasarlı kolon numunelerinin taşıma kapasitelerdeki kayıpların ne kadar olduğuna dair herhangi bir çalışmanın yapılmadığı tespit edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında kiriş-kolon birleşim deneylerinden alınan hasarlı kolonlarla birlikte eş özellikteki hasarsız kolonlar aksel basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kiriş-kolon birleşim deneylerinde görülen farklı göçme modlarına bağlı olarak kolon aksel basınç deneylerinde de farklı göçme modları ortaya çıkmıştır. Kolon gövdesinde yırtılma ve ezilme meydana gelen kesitlerde önemli seviyede kapasite kayıpları gözlenmiştir.
- Kolon ağız açıklığına bulon yerleştirilen ve yerleştirilmeyen farklı boylardaki kolon kesitleri aksel basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda beklendiği

üzere kolon uzunluğu artıkça kritik burkulma yükü değerin azaldığı görülmüştür. Bunun yanı sıra bulonlu numunelerin taşıma kapasitelerinde bulonsuz numunelere kıyasla artış ortaya çıkmıştır.

- Kiriş-kolon birleşim deneylerinin sonuçları ışığında oluşturulan analitik model ile moment taşıma kapasitesi ve dönme rijitliği değerleri elde edilmiştir. Analitik olarak ulaşılan değerler, deneysel çıktılarına yakın sonuçlar vermiştir.
- Literatürde depolama raf sistemlerinin dönme rijitliği değerini hesaplamak için iki adet mekanik model bulunmaktadır. Bu modeller kendi içerisinde farklılıklar göstermektedir. Literatürde bulunan mekanik modellerde, mukavemet hesaplama yöntemlerine göre iki temel sorun mevcuttur. İlk olarak, bahsedilen model yaklaşımlarında dönme noktası olarak kirişin tarafsız eksenini dönme noktası olarak belirlenmiştir. Diğer sorun ise tırnaklara gelen yükün eşit değerde kabul edilmesidir. Ancak bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler ve sayısal çözümlerler göstermektedir ki dönme noktası kirişin alt noktasında oluşmaktadır. Ayrıca dönme noktasına uzak olan tırnaklar, moment etkisi sebebiyle daha fazla yüke maruz kalmaktadır. Tez kapsamında geliştirilen mekanik modelde ise dönme noktası olarak kirişin alt noktası kabul edilmiş ve tırnaklara gelen yükler mukavemet esaslarına göre hesaplanmıştır. Mekanik model oluşturulurken temel kaynak olarak EN 15512 ve Eurocode-3 esas alınmıştır. Mekanik model kullanılarak ulaşılan sonuçlar deneysel çıktılarına yakın değerlerde sonuç vermiştir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Jaber, M., Beale, R. G., ve Godley, M. H. R. (2005). Numerical study on semi-rigid racking frames under sway. *Computers and Structures*, 83(28-30 SPEC. ISS.), ss. 2463–2475.
- Abdel-Jaber, M., Beale, R. G., ve Godley, M. H. R. (2006). A theoretical and experimental investigation of pallet rack structures under sway. *Journal of Constructional Steel Research* içinde (C. 62, ss. 68–80).
- Aguirre, C. (2005). Seismic behavior of rack structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(5), ss. 607–624.
- American Iron and Steel Institute (2016). AISI S100: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (with commentaries) (s. 505).
- Ata Raf. (2019). Depo Rafı ve Sistemleri | En Uygun Fiyat, Kaliteli İyi Çözüm | ATA RAF. 26 Kasım 2019 tarihinde <https://ataraf.com/> adresinden erişildi.
- Baldassino, N., Bernuzzi, C., di Gioia, A., ve Simoncelli, M. (2019). An experimental investigation on solid and perforated steel storage racks uprights. *Journal of Constructional Steel Research*, 155, ss. 409–425.
- Bernuzzi, C., ve Castiglioni, C. A. (2001). Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, 39(10), ss. 841–859.
- Bernuzzi, C., Gabbianelli, G., Gobetti, A., ve Rosti, A. (2016). Beam design for steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 116, ss. 156–172.
- Bernuzzi, C., ve Maxenti, F. (2015). European alternatives to design perforated thin-walled cold-formed beam-columns for steel storage systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 110, ss. 121–136.
- Bernuzzi, C., Persico, D., ve Simoncelli, M. (2016). Influence of floor deflections on the performance of steel storage pallet racks. *Engineering Structures*, 123, ss. 434–450.
- Bernuzzi, C., ve Simoncelli, M. (2016). An advanced design procedure for the safe use of steel storage pallet racks in seismic zones. *Thin-Walled Structures*, 109, ss. 73–87.
- Bonada, J., Pastor, M. M., Roure, F., ve Casafont, M. (2016). Distortional Influence of Pallet Rack Uprights Subject to Combined Compression and Bending. *Structures*, 8, ss. 275–285.
- Crisan, A., Ungureanu, V., ve Dubina, D. (2012). Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1—Experimental investigations. *Thin-Walled Structures*, 61, ss. 86–96.
- Dai, L., Zhao, X., ve Rasmussen, K. J. R. (2018). Flexural behaviour of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Thin-Walled Structures*, 124, ss. 202–217.
- EN 15512. (2009). Steel static storage systems—Adjustable pallet racking systems—Principles for structural design. *Bs En, 15512*, s. 15512.
- Freitas, A. M. S., Freitas, M. S. R., ve Souza, F. T. (2005). Analysis of steel storage rack columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(8), ss. 1135–1146.

- Frye, M. J., ve Morris, G. A. (1975). Analysis of Flexibly Connected Steel Frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2(3), ss. 280–291.
- Gilbert, B. P., ve Rasmussen, K. J. R. (2010). Bolted moment connections in drive-in and drive-through steel storage racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(6), ss. 755–766.
- Gusella, F., Arwade, S. R., Orlando, M., ve Peterman, K. D. (2019). Influence of mechanical and geometric uncertainty on rack connection structural response. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, ss. 343–355.
- Gusella, F., Lavacchini, G., ve Orlando, M. (2018). Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 140, ss. 92–107.
- Gusella, F., Orlando, M., Vignoli, A., ve Thiele, K. (2018). Flexural Capacity of Steel Rack Connections Via The Component Method. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12(1), ss. 90–100.
- Koen, D. (2008). Structural capacity of light gauge steel storage rack uprights. The University of Sydney. Structural capacity of light gauge steel storage rack uprights, The University of Sydney, Sydney.
- Kumar, J. V., ve Jayachandran, S. A. (2016). Experimental investigation and evaluation of Direct Strength Method on beam-column behavior of uprights. *Thin-Walled Structures*, 102, ss. 165–179.
- Lyu, Z.-J., Wu, M., Huang, Y., Song, Y., ve Cui, X. (2018). Assessment of the Dynamic Behavior of Beam-to-Column Connections in Steel Pallet Racks under Cyclic Load: Numerical Investigation. *Advances in Civil Engineering*, 2018, ss. 1–12.
- Lyu, Z. J., Zhao, P. C., Lu, Q., Xiang, Q., ve Li, H. L. (2020). Prediction of the Bending Strength of Boltless Steel Connections in Storage Pallet Racks: An Integrated Experimental-FEM-SVM Methodology. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- Madosan. (2019). Konsol Kollu Raf Sistemi Madosan. <https://madosan.com.tr/icerik/icine-girilebilir-raf-sistemi-drive-in>.
- Madosan Raf Sistemleri. (2019). Madosan Raf Sistemleri. <https://madosan.com.tr/icerik/icine-girilebilir-raf-sistemi-drive-in>.
- Mangir, A. (2014). Strength And Stability Of Thin Walled Steel Columns In Storage Rack Structures. *Ulusal Tez Merkezi*.
- Markazi, F. D., Beale, R. G., ve Godley, M. H. R. (1997). Experimental analysis of semi-rigid boltless connectors. *Thin-Walled Structures*, 28(1), ss. 57–87.
- Mohan, V., Prabha, P., Rajasankar, J., Iyer, N. R., Raviswaran, N., Nagendiran, V., ve Kamalakannan, S. S. (2015). Cold-formed steel pallet rack connection: an experimental study. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 7(1), ss. 55–68.
- Mohan, V., ve Vishnu, C. R. (2013). Joint stiffness of cold-formed steel pallet rack connections: A comparison of the methodology. *Journal of Structural Engineering (India)*, 40(5), ss. 457–465.
- Neiva, L. H. de A., Sarmanho, A. M. C., Faria, V. O., Souza, F. T. de, ve Starlino, J. A. B. (2018). Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. *Thin-Walled Structures*, 130, ss. 176–193.

- Pala, Y., ve Şenaysoy, S. (2017). Doğrudan Dayanım Yöntemiyle Çelik Depo Raf Sistemlerinde Kullanılan Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Dikmelerin Burkulma Yüklerinin Bulunması. 7. Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu içinde (s. 11).
- Prabha, P., Marimuthu, V., Saravanan, M., ve Arul Jayachandran, S. (2010). Evaluation of connection flexibility in cold formed steel racks. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(7), ss. 863–872.
- Rafex. (1994). Paletli Kayar Raf Sistemi Rafex. [Http://Www.Rafex.Com.Tr/Depo-Ve-Raf-Sistemleri-Aksesuarlari](http://www.Rafex.Com.Tr/Depo-Ve-Raf-Sistemleri-Aksesuarlari).
- Rafex. (2019). Paletli Raf Sistemleri. 26 Kasım 2019 tarihinde <http://www.rafex.com.tr/paletli-raf-sistemleri> adresinden erişildi.
- RMI. (2019). *Specification for the Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks. ANSI Standart* (C. 2012).
- Roure, F., Pastor, M. M., Casafont, M., ve Somalo, M. R. (2011). Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin-Walled Structures*, 49(1), ss. 167–184.
- Schafer, B. ., ve Peköz, T. (1998a). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 47(3), ss. 193–210.
- Schafer, B. W., ve Peköz, T. (1998b). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions, October 15-16, 1998. *Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
- Shah, S. N. R., Ramli Sulong, N. H., Khan, R., Jumaat, M. Z., ve Shariati, M. (2016). Behavior of Industrial Steel Rack Connections. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 70–71, ss. 725–740.
- Shah, S. N. R., Sulong, N. H. R., Shariati, M., ve Jumaat, M. Z. (2015). Steel Rack Connections: Identification of Most Influential Factors and a Comparison of Stiffness Design Methods. (C.-H. Tang, Ed.) *PLOS ONE*, 10(10), s. e0139422.
- Shariati, M., Tahir, M. M., Wee, T. C., Shah, S. N. R., Jalali, A., Abdullahi, M. M., ve Khorami, M. (2018). Experimental investigations on monotonic and cyclic behavior of steel pallet rack connections. *Engineering Failure Analysis*, 85, ss. 149–166.
- Ślęczka, L., ve Kozłowski, A. (2007). Experimental and theoretical investigations of pallet racks connections. *Advanced Steel Construction*, 3(2), ss. 607–627.
- Somçelik. (2019). Sırt Sırta Çift Detay Raf Sistemleri. [Https://Www.Somcelik.Com/Depo_Raf_Sistemleri-K-70.Html](https://www.somcelik.com/Depo_Raf_Sistemleri-K-70.Html).
- Standardizaion, E. C. for. (1993). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. Thin-Walled Structures* (C. 16, ss. 344–346).
- Temesist. (2019). TEMESİST |Endüstriyel Depo Ve Raf Sistemleri. 26 Kasım 2019 tarihinde <https://temesist.com/> adresinden erişildi.
- Trouncer, A. N., ve Rasmussen, K. J. R. (2014). Flexural-torsional buckling of ultra light-gauge steel storage rack uprights. *Thin-Walled Structures*, 81, ss. 159–174.
- Trouncer, A. N., ve Rasmussen, K. J. R. (2016a). Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 1: Experimental investigations. *Journal of Constructional Steel Research*, 124, ss. 57–76.

- Trouncer, A. N., ve Rasmussen, K. J. R. (2016b). Ultra-light gauge steel storage rack frames. Part 2 – Analysis and design considerations of second order effects. *Journal of Constructional Steel Research*, 124, ss. 37–46.
- Yazıcı, C. (2018). *Hafif çelik yapılarda vidalı kiriş-kolon birleşim (berkitmeli) davranışının deneysel olarak incelenmesi*. Ulusal Tez Merkezi. Hafif çelik yapılarda vidalı kiriş-kolon birleşim (berkitmeli) davranışının deneysel olarak incelenmesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum.
- Yazıcı, C., ve Özkal, F. M. (2019). Depolama raf sistemlerinde kiriş - kolon birleşimlerinin oransal dönme rijitlik değerlerinin mekanik modeller ile belirlenmesi. 8. *Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu* içinde (ss. 1–10). Konya.
- Yin, L., Tang, G., Zhang, M., Wang, B., ve Feng, B. (2016). Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. *Engineering Structures*, 116, ss. 40–55.
- Zeynalian, M., Bolkhari, S., ve Rafeei, P. (2018). Structural performance of cold-formed steel trusses used in electric power substations. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, ss. 53–61.
- Zhang, P., ve Alam, M. S. (2017). Experimental investigation and numerical simulation of pallet-rack stub columns under compression load. *Journal of Constructional Steel Research*, 133(3), ss. 282–299.
- Zhang, P., ve Alam, M. S. (2020). Elastic buckling behaviour of Σ -shaped rack columns under uniaxial compression. *Engineering Structures*, 212(January 2019), s. 110469.
- Zhao, X., Dai, L., ve Rasmussen, K. J. R. (2018). Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, ss. 81–105.
- Zhao, X., Dai, L., Wang, T., Sivakumaran, K. S., ve Chen, Y. (2017). A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, ss. 269–281.
- Zhao, X., Wang, T., Chen, Y., ve Sivakumaran, K. S. (2014). Flexural behavior of steel storage rack beam-to-upright connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, ss. 161–175.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Casim YAZICI
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	3 Temmuz Lisesi
Lisans:	Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Yüksek lisans:	Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2018)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
	İnşaat Mühendisleri Odası
Tezden Üretilmiş Yayınlar	