



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ANSYS WORKBENCH KULLANILARAK
FARKLI ÇELİK BAĞLANTILARIN
DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU
ELEMENLAR ANALİZİ

Ertuğrul KURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ertuğrul KURT tarafından hazırlanan “ANSYS WORKBENCH KULLANILARAK FARKLI ÇELİK BAĞLANTILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ” adlı tez çalışması 18/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDENER

Danışman

Doç. Dr. Ali KÖKEN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Alptuğ ÜNAL

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ertuğrul KURT

Tarih: 18.01.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANSYS WORKBENCH KULLANILARAK FARKLI ÇELİK BAĞLANTILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Ertuğrul KURT

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali KÖKEN

2022, 127 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Ali KÖKEN
Dr. Öğr. Üyesi Nebi ÖZDENER
Dr. Öğr. Üyesi Alptuğ ÜNAL

Yüksek süneklik kapasiteleri ve tekrarlı yükler altında enerji yutma özelliklerinden dolayı, moment aktaran sünek çelik çerçeve sistemler deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıların hasar görmeyen istenen performansı göstermesi için modellenmesinde en uygun ve doğru kesitlerin seçilmesi, birleşim bölgelerinin seçilen kesitlerden daha rijit olması ve en uygun sistemin seçilerek yapıdan beklenen enerji yutma ve maruz kalacağı yükler altında istenen dayanımı göstermesi istenmektedir. 1994 Northridge depreminden sonra yapılan incelemeler sonucunda önerilen çelik birleşim türleri FEMA-350 adlı raporda sunulmuştur. Bu raporda sunulan birleşimlerden bazıları TBDY – Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde de yer almaktadır.

Bu tez kapsamında moment aktaran ve yarı – rijit çelik kolon – kiriş birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altında doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi yapılacak olan birleşimlerin analizlerini yapmadan önce, sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması amacıyla literatürden deneysel analizi yapılmış alın levhalı bulonlu kolon – kiriş birleşimin sonlu elemanlar analizi yapılmış ve bu çalışmanın sonuçları deneysel analiz çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile literatürdeki deneysel analiz çalışmasında elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Moment aktaran birleşimlerden EMHF ve EMTF birleşimlerinin, EMF birleşim örneğine göre daha fazla moment taşıma kapasitesine sahip olduğu ve plastik mafsallı oluşumunun kolon başlık yüzeyinden oldukça uzakta hasar durumunun meydana geldiği görülmüştür. Yarı – rijit birleşimlerde EPW birleşim örneğinin EP, DS ve DSD birleşimlerine göre moment taşıma kapasitesinin fazla olduğu ve diğer birleşimlere göre daha rijit olduğu görülmüştür. Plastik mafsallı ve hasar durumunun kirişte meydana geldiği görülmüştür. REMF birleşim örneğinde kolon başlığından belirli bir mesafede yapılan, kirişin başlığında belirli bir oranda yapılan azaltmalar ile plastik şekil değiştirmelerin bu bölgede oluştuğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ANSYS Workbench, çelik birleşimler, doğrusal olmayan analiz, moment aktaran birleşimler, yarı – rijit birleşimler, sonlu elemanlar analizi.

ABSTRACT

MS THESIS

NONLINEAR FINITE ELEMENTS ANALYSIS OF DIFFERENT STEEL CONNECTIONS USING ANSYS WORKBENCH

Ertuğrul KURT

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ali KÖKEN

2022, 127 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Ali KÖKEN
Asst. Prof. Dr. Nebi ÖZDENER
Asst. Prof. Dr. Alptuğ ÜNAL**

Moment - transmitting ductile steel frame systems are widely used in earthquake zones due to their high ductile capacity and energy absorption properties under cyclic load. In the modeling of structures to show the desired performance without being damaged, it is desired to choose the most suitable and correct sections, the junction areas to be more rigid than the selected sections and the most suitable system. As a result of the investigations made after the 1994 Northridge earthquake, the recommended steel joint types are presented in the FEMA -350 report. Some of the combinations presented in this report are also included in the TBDY-Turkey Building Earthquake Code.

This thesis, is aimed to evaluate the performance of moment-transmitting and semi-rigid steel column-beam connections under monotonic and cyclic loading by non-linear finite element analysis. Before analyzing the connections to be made with finite element analysis, an experimental analysis was made from the literature in order to verify the finite element models, and the left element analysis of the butt plate bolted column - beam connection was made and the results of this study were compared with the results of the experimental analysis study. It has been observed that the results obtained in this study and the results obtained in the experimental analysis study in the literature are compatible with each other.

It has been observed that EMHF and EMTF joints, which are moment-transferring joints, have more moment carrying capacity than the EMF junction example, and the damage situation occurs quite far from the column head surface of the plastic hinge formation. It has been observed that the EPW joint pattern in semi-rigid connections is more rigid and moment carrying capacity of the EPW connection sample is higher than the EP, DS and DSD joints. It was also observed that the plastic hinge and damage occurred in the beam. In the REMF connection example, it has been observed that plastic deformations occur in this region with reductions made at a certain distance from the column head and at a certain rate in the beam head.

Keywords: ANSYS Workbench, steel connections, nonlinear analysis, moment-transmitting connections, semi-rigid connections, finite elements analysis.

ÖNSÖZ

“Ansys Workbench Kullanılarak Farklı Çelik Bağlantıların Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi” konulu bu çalışma Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Tez çalışmamın her aşamasında sabır ve hoşgörü ile yardımlarını esirgemeyen, bilgi, eleştiri ve tavsiyelerini paylaşarak daima destek olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali KÖKEN’ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın süresi boyunca her zaman yanımda olup manevi desteğini eksik etmeyen gösterdiği anlayış için sevgili eşim Beyza KURT’a ve bugüne kadar verdikleri bütün desteklerden dolayı annem Düriye KURT’a, babam Adnan KURT’a, kardeşlerim Serkan KURT’a ve Ceren KURT’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ertuğrul KURT
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tezin Önemi	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ VE MODELLEME	11
3.1. Uygulanacak Analiz Türünün Belirlenmesi	14
3.2. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	14
3.3. Modelin/Geometrinin Oluşturulması	15
3.4. Parçalar Arasındaki Temas Durumları	17
3.5. Meshleme/Düğüm Noktaları ve Elemanlar Olarak Alt Bölümlere Ayırma	20
3.6. Sınır Şartların, Başlangıç Şartların ve Yüklerin Uygulanması	24
3.7. Çözümün Yapılması ve Sonuçların Değerlendirilmesi	25
4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMELERİNİN DOĞRULANMASI	30
4.1. Birleşimin Sonlu Elemanlar Analiz Modelinin Oluşturulması.....	30
4.1.1. Birleşimin Geometrik Detayı.....	30
4.1.2. Birleşimin Sonlu Elemanlar Modeli	33
4.1.3. Birleşimdeki Temas Durumları	36
4.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	37
4.1.5. Sınır Şartlarının ve Yüklerin Uygulanması	37
4.1.6. Sonlu Elemanlar Analiz Ayarları.....	39
4.2. Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	39
5. FARKLI TÜRDEKİ ÇELİK BAĞLANTILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	48
5.1. Birleşimin Sonlu Elemanlar Analiz Modelinin Oluşturulması.....	48
5.1.1. Birleşimlerin Geometrik Detayı.....	48
5.1.2. Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Modelleri	56
5.1.3. Birleşimlerdeki Temas Durumları	65
5.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	66
5.1.5. Sınır Şartlarının ve Yüklerin Uygulanması	68
5.1.6. Sonlu Elemanlar Analiz Ayarları.....	70

5.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
5.2.1. Çözümlenmelerin Elde Edilmesi	71
5.2.1.1. Yük Geçmiş Grafiklerinin Oluşturulması.....	71
5.2.1.2. Birleşimlerin Moment – Dönme ve Yük - Deplasman Grafiklerinin Oluşturulması.....	71
5.2.1.3. Birleşimlerin Dayanım Zarfı Grafiklerinin Oluşturulması	72
5.2.1.4. Birleşimlerin Rijitlik Azalım Grafiklerinin Oluşturulması.....	72
5.2.2. Moment Aktaran Birleşimler	73
5.2.2.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri.....	73
5.2.2.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler	80
5.2.2.3. Moment Aktaran Birleşimlerin Değerlendirilmesi	88
5.2.3. Yarı – Rijit Birleşimler	90
5.2.3.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri.....	90
5.2.3.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler	99
5.2.3.3. Yarı – Rijit Birleşimlerin Değerlendirilmesi	109
5.2.4. Kiriş Başlığı Zayıflatılmış Moment Aktaran Birleşim	111
5.2.4.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri.....	111
5.2.4.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler	114
5.2.4.3. Kiriş Başlığı Zayıflatılmış Moment Aktaran Birleşiminin Değerlendirilmesi.....	119
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	124

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- A : Alan.
- b : En kesit genişliği.
- d : Gövde net uzunluk.
- E : Yapısal çelik elastisite modülü (200000 MPa).
- F : Dış kuvvet.
- F_{kr} : Kritik burkulma kuvveti.
- F_u : Yapısal çelik karakteristik kopma dayanımı.
- F_y : Yapısal çelik karakteristik akma dayanımı.
- G : Yapısal çelik kayma modülü (77200 MPa).
- G : Ağırlık.
- h : En kesit yüksekliği.
- I : Atalet momenti.
- I_y : y – y eksenindeki atalet momenti.
- I_x : x – x eksenindeki atalet momenti.
- K : Burkulma boyu katsayısı.
- K_x : x-ekseni etrafında eğilmeli burkulma durumunda burkulma boyu katsayısı.
- K_y : y-ekseni etrafında eğilmeli burkulma durumunda burkulma boyu katsayısı.
- L : Uzunluk, boy.
- L_k : İtibari burkulma boyu.
- M : Moment.
- M_p : Plastik eğilme momenti.
- M_y : Elastik eğilme momenti.
- P : Eksenel kuvvet, Tekil kuvvet.
- r_1 : İç yuvarlatma çapı.
- s : Güvenlik katsayısı.
- t : Et kalınlığı.
- t_f : Başlık kalınlığı.
- t_w : Gövde kalınlığı.
- W_{px} : Plastik mukavemet momenti (x-ekseni etrafındaki).
- W_{py} : Plastik mukavemet momenti (y-ekseni etrafındaki).

- ε : Birim uzama.
 ε_u : Karakteristik çekme dayanımı, F_u ya karşı gelen birim şekil değiştirme.
 ε_y : Karakteristik çekme dayanımı, F_y ya karşı gelen birim şekil değiştirme.
 ΔL : Boy değişimi.
 μ : Sürtünme etkili birleşimlerde ortalama sürtünme katsayısı.
 σ : Ortalama gerilme.
 σ_ζ : Çekme gerilme.
 σ_{kr} : Kritik gerilme.
 σ_u : Kopma gerilmesi.
 σ_y : Akma gerilmesi.
 ν : Poisson oranı.

Kısaltmalar

AISC	American Institute Of Steel Construction
DS	Bulonlu Bağlantı Levhalı (Kiriş – Kiriş)
DSD	Bulonlu Bağlantı Levhalı (Kolon – Kiriş)
EMF	Bulonlu Alın Levhalı Başlık Berkitmeli
EMHF	Bulonlu Guseli Alın Levhalı Başlık Berkitmeli
EMTF	Bulonlu Üstten Guseli Alın Levhalı Başlık Berkitmeli
EP	Bulonlu Alın Levhalı
EPW	Bulonlu Alın Levhalı H Şekilli Gövde Berkitmeli
FEMA	Federal Emergency Management Agency
REMF	Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti Bulonlu Alın Levhalı Başlık Berkitmeli
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

1. GİRİŞ

Yüksek süneklik kapasiteleri ve tekrarlı yükler altında enerji yutma özelliklerinden dolayı, moment aktaran sünek çelik çerçeve sistemler deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıların hasar görmeden istenen performansı göstermesi için modellemede en uygun ve doğru kesitlerin seçilmesi, birleşim bölgelerinin seçilen kesitlerden daha rijit olması ve en uygun sistemin seçilerek yapıdan beklenen enerji yutma ve maruz kalacağı yükler altında istenen dayanımı göstermesi istenmektedir.

İyi bir tasarım için, yapı elemanlarının ve birleşim bölgelerinde kullanılan bağlantıların iyi bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. İncelenecek olan her bir yapı elemanının ve yapı elemanlarının birleşimlerinde kullanılan bağlantıların, analizi ve gerilme deformasyon değerlerinin hesaplanıp yorumlanması gerekmektedir. Bu bilgilere sahip olan yapısal tasarımcı uygun kesiti, uygun birleşim bağlantılarını, güvenli ve ekonomik bir tasarım olacak şekilde mühendislik yorumu doğrultusunda değerlendirmeli ve uygun seçimi yapmalıdır.

1994 Northridge depreminde sonra birleşim detaylarında yapılan incelemeler sonucunda önerilen ve geliştirilmiş olan çelik birleşim türleri “ANSI/AISC 358-16 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications” isimli standartta ve “FEMA-350 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment – Frame Building” adlı raporda sunulmuştur. Bu raporda sunulan birleşimlerden bazıları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY – 2018)’de de yer almaktadır.

TBDY – 2018’de bulonlu birleşimler; tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşimler, bulonlu başlık levhali moment aktaran birleşimler olarak, kaynaklı birleşimler ise; tam penetrasyonlu küt kaynaklı birleşimler, kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli kiriş – kolon birleşimi olarak adlandırılmaktadır. Çaprazlı birleşimler ise; çapraz – kiriş – kolon birleşim detayları başlı altında mafsallı ve rijit birleşim olarak adlandırılmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Çelik yapılar günümüzde çok geniş alanlarda yaygın olarak kullanılan yapı sistemlerindedir. Bunun nedeni yüksek mukavemete, geniş açıklıkları geçebilme, sünek olması ve bazı durumlar için ekonomik olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir.

Yapı mühendisleri, güvenli ve ekonomik bir tasarım üretmek için genel yapısal sistemde kullanılacak, yapısal eleman kesitini ve birleşim türünü seçmeden önce analiz sonuçlarını değerlendirmeli ve uygun seçimi yapmalıdır. İyi bir tasarım, yapı elemanlarını ve birleşim bölgelerini iyi bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir. Bu bilgiye sahip olan yapısal tasarımcı, daha sonra uygun eleman kesitini ve uygun birleşim türünü seçebilir.

Bu çalışmada sonlu elemanlar analiz (SEA) modellerini doğrulamak amacıyla literatürde deneysel olarak yapılmış kolon – kiriş birleşim analiz sonuçlarını, ANSYS Workbench (SEA) paket programı kullanılarak analiz sonuçları karşılaştırılıp uygunluğu araştırılacaktır. Tez çalışmasında uygulamalarda sıklıkla tercih edilen moment aktaran ve yarı – rijit farklı çelik kolon – kiriş birleşimlerinin çevrimsel (tekrarlı) ve monotonik yüklemeler altındaki davranışlarını sonlu elemanlar analizi ile birleşimlerin performanslarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması amaçlanmaktadır.

Sonlu elemanlar analiz çalışmasının, deneysel çalışmalarla benzer sonuçların elde edilebileceğini, birçok avantajının olduğunu, maddi, zaman ve cihaz ölçümlene problemleri olmadan yapılan etkili ve ekonomik bir yöntem olabileceğine dikkat çekmek amaçlanmaktadır.

1.2. Tezin Önemi

Sonlu eleman analizleri paket programlar yardımıyla, deneysel çalışmalar ile kıyaslanıp doğruluğu saptanarak, parametrik çalışmalar yapmaya ve yeni tasarım metotları geliştirmeye imkân tanımaktadır. Farklı fikir ve geliştirilebilir düşüncelerin de rahatlıkla analizlerinin yapılabilirliğine olanak tanımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar ile sistemlerin analizleri yapılarak, gerçek dünyadaki davranışlarının simülasyonları ile gerçeğe uygun sonuçlar elde edilip gözlemlenebilir.

Deneysel çalışmada tespit edilmesi zor olan bölgelerde sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar ile sistemlerin sonuçlarının incelenmesine / yorumlanmasına olanak sağlayabilir. Bu tez kapsamında uygulamalarda sıklıkla kullanılan moment

aktaran ve yarı – rijit sekiz adet kolon – kiriş birleşimlerin sonlu elemanlar metodu ile doğrusal olmayan analizleri yapılacaktır. Analiz sonucunda birleşimler birbirleri arasında kıyaslanıp karşılaştırılacaktır. Birleşim örneklerinden elde edilen analiz sonuçlarının değerlendirilip yorumlanmasında, eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları, hasar durumları, eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları, yük geçmişi, yük – deplasman grafikleri, moment – toplam dönme grafikleri, dayanım zarfı grafikleri, rijitlik azalım grafikleri gibi etkenler dikkate alınmıştır. Moment aktaran birleşim örneklerinde, EMHF ve EMTF birleşimlerinin moment taşıma kapasitesi, plastik mafsal oluşma yeri, rijitlik gibi parametreler dikkate alındığında diğer moment aktaran birleşim tipine göre daha üstün ve güvenilir olduğu görülmüştür. Yarı – rijit birleşim örneklerinde, EPW birleşiminin moment taşıma kapasitesi, plastik mafsal oluşma yeri, rijitlik gibi parametreler dikkate alındığında diğer yarı – rijit birleşim tiplerine göre daha üstün ve güvenilir olduğu görülmüştür. Zayıflatılmış kesitli moment aktaran kolon – kiriş (REMF) örneğinde ise kolon başlığından belirli bir mesafede yapılan, kirişin başlığında belirli bir oranda yapılan azaltmalar ile plastik şekil değiştirmelerin bu bölgede oluştuğu ve moment taşıma kapasitesinde çok düşüşler olmadığı görülmüştür.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çelik yapılarda kolon – kiriş birleşimleri için çok sayıda deneysel ve analitik analiz çalışmalar yapılmıştır. Kolon – kiriş birleşimleri için yapılan bu çalışmalarda bazı araştırmacılar deneysel veya sonlu elemanlar analizi (SEA) çalışma yöntemini tercih ederken, bazı araştırmacılar da her iki çalışma yöntemini tercih etmişlerdir. Kolon – kiriş birleşimlerine uygulanan dış yüklerde bazı araştırmacılar monotonik veya çevrimsel yükleme yöntemlerinden birini tercih ederken, bazı araştırmacılar her ikisini de tercih etmişlerdir. Bazı araştırmacılar da birleşimde kullanılan plaka elemanları üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu konular üzerine yakın zamanda yapılan bazı çalışmalar özetlenecektir.

Hatipoğlu (2011), tipik kolon-kiriş birleşiminde, kolon-kiriş birleşim bölgesinde karşılaşılan olumsuzlukların önüne geçmek için 3 adet deney numunesi üretmiş ve tersinir tekrarlanır yük altında test etmiştir. Deney numunelerinin biri güçlendirilmiş kiriş kesiti şeklinde, diğer numuneler ise sıra ile %40 ve %45 oranında zayıflatma yapılmış numuneler kullanmış. Ayrıca sonuçları karşılaştırmak için 1 adet referans numunesi üretmiştir. Ürettiği toplam dört adet deney numunesini laboratuvar ortamında rijit yükleme duvarı kullanarak, deprem yükünü benzeştiren düşey tersinir-tekrarlanır yük altında test etmiştir. Deney sonunda, deney numunelerinin davranış özellikleri elde etmiş ve deney numuneleri için yük geçmişi, yük-deplasman ilişkisi, moment-toplam dönme ilişkisi, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve enerji tüketme kapasitesi ilişkileri elde etmiştir. Elde edilen deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırmasını yaparak kolon-kiriş birleşim noktasında kiriş kesitinin rijitlik (guse) levhası kullanarak güçlendirilmesi kiriş kesme kuvveti ve dolayısıyla moment kapasitesini artırdığını görmüştür.

Yılmaz (2015), DBYBHY-2007’de belirtilen moment aktaran çelik kolon – kiriş birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizi ile birleşimlerin performanslarını değerlendirmiş. Yaptığı çalışma sonunda bulunan sonuçlar ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğunu tespit etmiş. Sonlu elemanlar modellemesinin doğrulamasını yaptıktan sonra, DBYBHY-2007’de belirtilen birleşimlerin analizlerini yapmış ve elde ettiği sonuçları açıklamıştır. Analizlerini yaptığı birleşimlerden bulonlu ve kaynaklı birleşimleri ilk önce kendi aralarında karşılaştırmış, daha sonra bu karşılaştırmalardan öne çıkan birleşimleri birbirleriyle karşılaştırmıştır. Yapılan analizler sonucunda, bulonlu birleşimlerden alın levhasız birleşim örneğinin istenmeyen bir kırılma biçimi gösterdiğini görmüştür.

Bulonlu birleşimlerden takviyeli alın levhalı birleşimin, kaynaklı birleşimlerden ek başlık levhalı kaynaklı birleşimin plastik mafsala oluşma noktası, moment taşıma kapasitesi ve rijitlik bakımından diğer birleşimlere göre daha güvenilir olduğu görülmüştür.

Ghassemieh ve ark. (2015), moment aktaran çerçevelerde bağlantıların çoğunluğunun tamamen rijit olduğunu fakat bir miktar esneklik seviyesine sahip olduğunu, bağlantının gerçek davranışı göz ardı edildiğini bu durum yapısal modelin yanlış tahminlerle sonuçlandığını savunmuşlardır. Bu sebepten çelik moment çerçevelerindeki alın levhalı birleşim bağlantılarının esnekliğinin etkisini araştırmışlardır. İlk olarak, alın levhalı moment bağlantılarının gerçek davranışı, birleşim yeri esnekliği araştırılmıştır. Daha sonra, alın levhalı moment aktaran bağlantılarına sahip çerçevelerin davranışları modal, doğrusal olmayan statik itme ve artan dinamik analizler kullanılarak incelenmiştir. Analizler sonucunda yapısal çerçevenin davranışı, tamamen rijit olarak modellenen bağlantılar ile esneklik dâhil edilmiş bağlantılar arasında doğal periyotlar, dayanıklılık ve maksimum katlar arası kayma açısı gibi sonuçlarda önemli farklar olduğu ortaya çıkarmışlardır.

Yılmaz ve ark. (2019), Avrupa standardı sıcak haddelenmiş profil ile yapım profilleri kullanılarak, Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim (BSEP) ve Alın levhasız bulonlu birleşim (BFP) bağlantıların deneysel performansı araştırmışlardır. Araştırılan dört bağlantı FEMA 350'ye göre tasarlanarak yapılmış ve çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilmiştir. BSEP ve BFP bağlantıları hazır profil ve yapım profilleri kullanılmasının etkileri incelemişler. Başarısızlık modları, histeretik eğriler, nihai moment ve dönme değerleri ve panel bölgesi ekleri dâhil elde edilen test sonuçları ve farklı bağlantıların performansı karşılaştırmışlar. Elde edilen test sonuçlarına göre, bağlantıda hazır profil veya yapım profillerin kullanılmasının genel davranışı etkilemediği tespit etmişlerdir.

Saberi ve ark. (2010), 1994 Northridge depremi sırasında, başlık bulonlu gövde kaynaklı bağlantılarının (BWWF) nispeten düşük performans gösterdiği gözlemlendi. Daha sonra, alın levhalı ve T-parça bulonlu bağlantılar gibi çeşitli bağlantı tiplerinin, endüstriyel ve yüksek binalarda sıklıkla kullanılan moment dayanımlı çerçevelerde kullanılması önerildi. Sonlu elemanlar analizi, bulonların yatay ve dikey düzenini değiştirerek, bahsedilen bağlantı tipindeki on dört örneğin çevrimsel davranışlarını incelemişler ve karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, T-parça bulonlu bağlantıların moment kapasitesinin ve başlangıç dönme sertliğinin, her iki grubun toplam enerji dağılımının yaklaşık olarak eşit olduğu düşünülerek AISC'ye göre tasarlanan alın levhalı bulonlu

bağlantılarınınkinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca T-parçalı bağlantılarında hata modu değişim olasılığının, bulonların düzenleme varyasyonu nedeniyle çevrimsel yüklemeye altındaki alın levhalı bağlantılarınınkinden daha yüksek olduğu da görülmüştür. Sonuçlara dayanarak, yapıdaki kusurun muhtemel olduğu durumlar için alın levhalı bağlantıları önermişlerdir.

Yılmaz ve ark. (2016), monotonik yüklemeye altında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilen alın levhalı bulonlu birleşimlerde, alın levhası kalınlığı değişimi ile panel bölgesi güçlendirmesinin etkisini incelemişlerdir. İlk aşamada, literatürden alınan iki adet alın levhalı bulonlu birleşimin sonlu elemanlar analizi yapılmış ve literatürdeki sonuçları ile bu çalışmadaki sonuçları karşılaştırmışlar. İkinci aşamada ise, literatürden alınan bu birleşimlerdeki alın levhası kalınlığının artırılmasının ve panel bölgelerinin güçlendirilmesinin etkileri incelemişlerdir. Panel bölgesini güçlendirmek için diyagonal levha koyulmuş veya kolon gövdesi takviye levhası kullanmışlardır. Birleşimlerdeki bulonlar önerilmeli olup, analiz için konsol giriş ucuna monotonik olarak yer değiştirme uygulanmıştır. Birleşimler, kuvvet taşıma kapasitesi, moment – dönme eğrisi, panel bölgesindeki şekil değiştirmeler ve bulon çekme kuvvetleri bakımından birbirleriyle karşılaştırmışlar. Yapılan incelemelere göre, panel bölgesinin güçlendirilmesi kolondaki panel bölgesinin şekil değiştirmesinin azalmasına fakat giriş başlıklarının ve gövdesinin daha erken burkulmasına ve dönme kapasitelerinin azalmasına neden olduğunu görmüştür.

Ghassemieh ve ark. (2014), alın levhalı moment aktaran bağlantısını sismik davranışını sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak analiz etmişler. İlk olarak, mevcut bir test kurulumu ANSYS bilgisayar programı kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Model, sonlu elemanlardan elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmış. Daha sonra, bağlantının üyelerinin boyutlarını değiştirerek, bağlantının genel sismik performansı üzerindeki etkileri araştırılmış. Sonuç olarak, kolon kesit derinliğini büyütür ve bağlantıyı rijitleştirerek sismik performansın arttığını ve alın plakasının kalınlığının, moment kapasitesinin plastik giriş momentinden daha büyük olacak şekilde seçilmesi gerektiğini önermişlerdir.

Yılmaz ve ark. (2014), tüm bulonların ön germe ile gerdirildiği alın plakalarla farklı tipte çelik girişli bağlantıların sayısal olarak modellenmişlerdir. Sayısal modeller sonlu elemanlar simülasyon yazılımı olan ANSYS tarafından yapılmış. Çalışmalarının temel amacı, literatürdeki deneysel çalışma ve simülasyon ile gerçekleştirilen alın plakalarla kolon-giriş bağlantısını benzeştirmek ve literatürdeki sonuçları bu çalışmada

elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak. Sonlu elemanlar modelleri test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. İkinci amaçları, bu iki örnekten yeni bir örnek elde etmektir. Bu üç numune aynı zamanda üç doğrusal gerilme-gerinim ilişkisine sahip farklı malzeme özellikleri ile değerlendirmişler ve daha sonra değişen malzeme özelliklerinin etkileri araştırmışlardır. Sonuçta, söz konusu numuneler, moment-dönme ilişkisi ve gerilmelerin dağılımı açısından literatürden alınan numunelerle karşılaştırmışlardır.

Han ve ark. (2007), Northridge depremi sonrası yaptıkları çalışmada hazırladıkları kaynaklı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizi yapmışlardır. Üç farklı panel bölge dayanımları için analizler yapmışlar, bu değişimleri incelemişlerdir. Sonuç olarak, farklı panel bölgesindeki dayanımlar için analitik bir denklem geliştirmişlerdir.

Hedayat ve Celikag (2009), gövdeden bulonlu kaynaklı birleşimler için yeni tasarımlar önerip geliştirmişlerdir. Plastik mafsallı oluşumunu kolon yüzeyinden uzaklaştırabilmek için kirişlerin gövdesine iki adet delik açmışlar ve bu deliklerin farklı geometrileri hakkında sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Bu deliklerin geometrileri ile ilgili parametrik bir çalışma yapmışlar ve sonrasında tasarım adımları için denklemler geliştirmişler. Sonuçlar plastik mafsallı kolon yüzeyinden uzağa hareket ettirmede etkili olduğunu göstermişlerdir.

Karasu ve Vatansever (2017), sadece kesme kuvvetine göre tasarımı yapılan örnek bir kısa alın levhalı bulonlu kiriş-kolon birleşiminin üç boyutlu sonlu eleman modeli hazırlayarak birleşimi oluşturan elemanların ve bulonların davranışı incelenmiştir. Deneysel (Aggarwal, 1990) ve analitik çalışmalar sonunda elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu olarak birleşimin eğilme momenti kapasitesine alın levhasında meydana gelen büyük eğilme şekil değiştirmeleri ile ulaşıldığını görmüşlerdir. Tek doğrultuda artan yük altında gerçekleştirilen analizler sonucunda bulonların gövdelerinde kayma gerilmelerine ilave olarak eğilme momentinin çekme kuvveti bileşeninin etkisi nedeniyle çekme gerilmelerinin de oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumda, bulonların tasarımının çekme ile kayma gerilmelerinin ortak etkisi altında gerçekleştirilmesinin daha uygun bir yaklaşım olacağı sunmuşlardır.

Yang ve Zhou (2019), bulonlu kiriş-kolon bağlantılarının mekanik davranışını incelemek için, sonlu eleman modelinin doğruluğu ve uygulanabilirliğini ABAQUS kullanarak, uç plaka bağlantıları üzerine yayınlanan deneylere göre doğrulamışlardır. Bağlantıların mekanik davranışını tartışmak için, kiriş gövde plakalı üst ve alt başlıkta açılı bağlantılar, uzatılmış uç plaka bağlantısı ve T-stub bağlantısı dahil olmak üzere üç

yarı rijit bağlantı sayısal olarak incelemişler. Kapasite, histerik davranış, süneklik ve şekil değiştirme özelliklerini ayrıntılı olarak incelemiş ve karşılaştırmışlar. Sonuçlar, oluşturulan sonlu eleman modellerinin hem monotonik yükleme hem de çevrimsel yükleme altında cıvatalı bağlantıların yük taşıma davranışını etkili bir şekilde benzerlik göstermiş. Genişletilmiş uç plaka bağlantısının, hem mekanik davranışta hem de imalatta ve montajda en iyi performansı göstereceğine, bu nedenle tercih edilen bileşim tipi olduğu savunmuşlardır.

Akgönen ve Güneş (2017), bu çalışmada ön-germe uygulanmış alın levhalı kolon-kiriş birleşimleri için sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlar. Sayısal modelin oluşturulmasında ANSYS yazılımı kullanmışlardır. Model çalışması; elemanlar arasında sürtünme, kayma, bulon ön-germe, malzemede ve geometri de lineer olmayan davranış durumunu kapsamaktadır. Model çalışması ile elde edilen moment-dönme grafiği, literatürde bulunan deneysel çalışmalardan elde edilen moment-dönme grafikleri ile kıyaslanarak sonlu elemanlar çalışması doğrulamışlardır.

El-Hewity ve ark. (2011), Deneysel olarak, uç plaka bağlantısının, esas olarak uç plakanın kalınlığına ve cıvataların çapına bağlı olarak, tamamen rijit veya yarı rijit bir bağlantı olarak hareket edebileceği bulunmuştur. Son yıllarda, iyi süneklikleri ve iyi enerji dağıtma kabiliyetleri nedeniyle, genişletilmiş uç plaka bağlantılarının, yanal yüklere maruz kalan özel moment dirençli çerçevelerde yaygın olarak kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada, dört cıvatalı uzatılmış uç plaka bağlantılarının hem malzeme hem de geometrik özelliklerinin, yanal yüklemeye maruz kaldıklarında davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. ANSYS kullanılarak sonlu eleman modeli üzerinde parametrik bir çalışma yapmışlardır. Parametrik çalışma, incelenen bağlantının davranışı üzerinde etkili olması beklenen 12 parametre dikkate almışlardır. Sonuç olarak, bağlantının dönüşünü temsil eden kat kayması ile bağlantıdaki momenti uygulanan yanal yük arasında ilişki araştırılmıştır. Seçilen parametrelerin bağlantının enerji dağılımına bağlı olarak etkili olduğunu sunmuşlardır.

Bahaz ve ark. (2018), yarı rijit çelik kirişin kolon uç plakası bağlantılarına davranışı üzerindeki farklı parametrelerin etkisini tanımlamak için ABAQUS yazılımını kullanarak üç boyutlu bir sonlu eleman modeli incelemişlerdir. İki uç plaka konfigürasyonundan oluşan bir model kullanılarak parametrik bir çalışma yürütülmüş: gömme ve uzatılmış uç plakalar. İncelenen parametreler şu şekildedir: cıvata tipi, uç plaka kalınlığı ve kolon gövde takviyesi. Daha sonra model, literatürden alınan deneysel sonuçlar ve Eurocode3'ün önerdiği model ile kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Sonlu

eleman analizini kullanarak moment-dönüş eğrisini belirleme işlemini, bağlantı tasarım moment direncinin ve ilk dönme rijitliğinin nasıl elde edildiğini açıklamışlardır.

Azap (2013), yarı-rijit bağlantıların üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalar özellikle bulonlu kolon-kiriş bağlantıların yarı-rijit karakteristiğine odaklanmıştır. Yapılan araştırmalar sonucu bulunmuş, son 30 yılda bu bağlantı tipi ile ilgili gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar bu çalışma kapsamı altında dikkate alınmıştır. Sayısal simülasyonların sonuçları, deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve gelişmiş lineer olmayan sonlu elemanlar programı ile modellenmiş üç boyutlu bağlantı modellerinin güvenilirliği bulunmaya çalışılmıştır.

Uslu (2009), yarı rijit bağlantılarda moment ve dönme değerlerinin bulunabilmesi ve moment-dönme eğrilerinin çizilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Mevcut test sonuçları ile sonlu elemanlar analizlerinin kontrolü incelenmiş. 3-boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ile köşebentlerle oluşturulmuş yarı rijit bağlantıların incelenmesini yapıp bunların test sonuçları ve farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiş matematiksel modellerle karşılaştırılması sunulmuştur.

Sharaf ve ark. (2019), sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak hem monotonik hem de çevrimsel yüklemelerin etkisi altında uç plakalı bulonlu bağlantıların davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Parametrik çalışma, parametre sayısının etkisini incelemek için hem monotonik hem de çevrimsel yüklemeye tabi tutulan uzatılmış uç plakalı cıvatalı kiriş kolon bağlantıları üzerinde yapılmış; kesme kuvveti, cıvata çapı, alın plakası kalınlığı ve alın takviye plakası kullanımının etkisi araştırmışlardır. Birleşime etki eden kesme kuvvetinin değerinin bağlantı rijitliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Yorgun (2001), üç farklı alın levhalı birleşimi çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmıştır. İlk birleşim standart alın levhalı birleşim iken, ikinci ve üçüncü birleşimlerde alın levhası ile kolon başlığı arasında kiriş profilinden kesilmiş bir I profili bulunmaktadır. Bu yaklaşıma göre hazırlanan birleşimlerin daha fazla moment taşıdığı ve dönme kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Eldemerdash ve ark. (2012), üç adet birleşimin sonlu eleman modelini oluşturmak ve analiz etmek için ANSYS kullanmışlar. Sonlu eleman modellerinin doğruluğunu teyit etmek için sonlu eleman modellerinden ikisi daha önce yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar. Karşılaştırma, sonlu eleman modellerinin ve ilgili test edilen numunelerin moment-kiriş dönüşü ve moment uç plakası şekil değişikliğine

dayanmaktadır. Sonlu eleman modellerinin sonuçları, kiriş alt flanşına bitişik gerilim bölgesindeki bulonların davranışını incelemişlerdir.

Yeh ve ark. (2018), deprem sonrası yapılan incelemelerde, plastik deformasyon kapasitelerinin yeterli olmaması nedeniyle bağlantıların başarısız olduğunu görmüşler. Bu çalışmada, çelik moment bağlantılarının plastik deformasyon kapasitelerini artırmanın yollarını keşfetmek için sonlu eleman analizi (FEA) yapmışlardır. Bulonlu kiriş gövde bağlantılarının detaylarına ve moment kapasitelerine özellikle dikkat etmişlerdir. Bulonlu gövde bağlantılarının moment kapasitesini artırmanın, gerilme yığılmalarını azaltmaya yardımcı olabileceği ve kiriş başlıklarındaki kaynaklarda veya birleşim deliklerinin yakınında meydana gelen erken evre kırılma hatalarını önlemeye yardımcı olabileceğini sunmuşlardır.



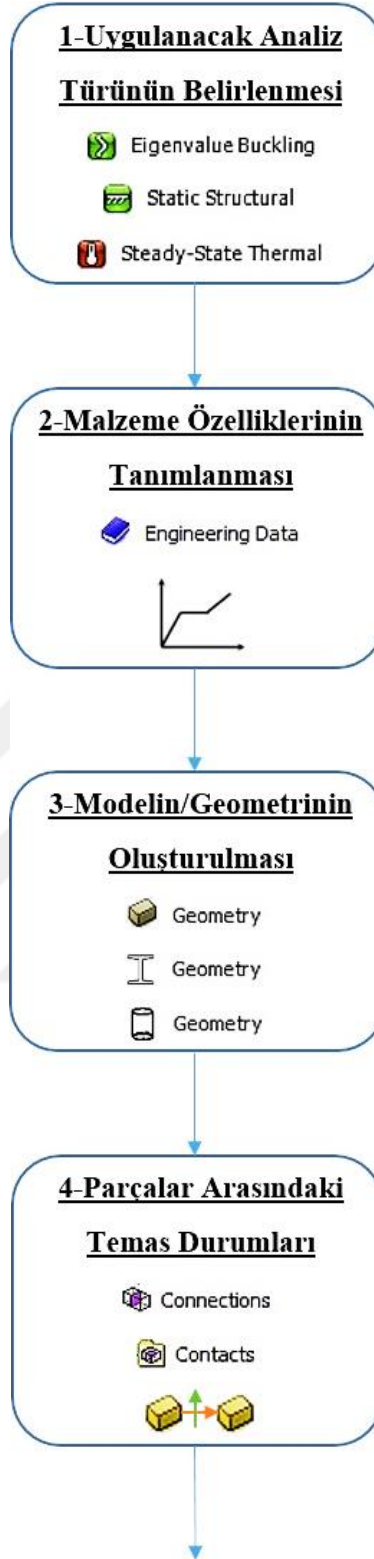
3. SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZ VE MODELLEME

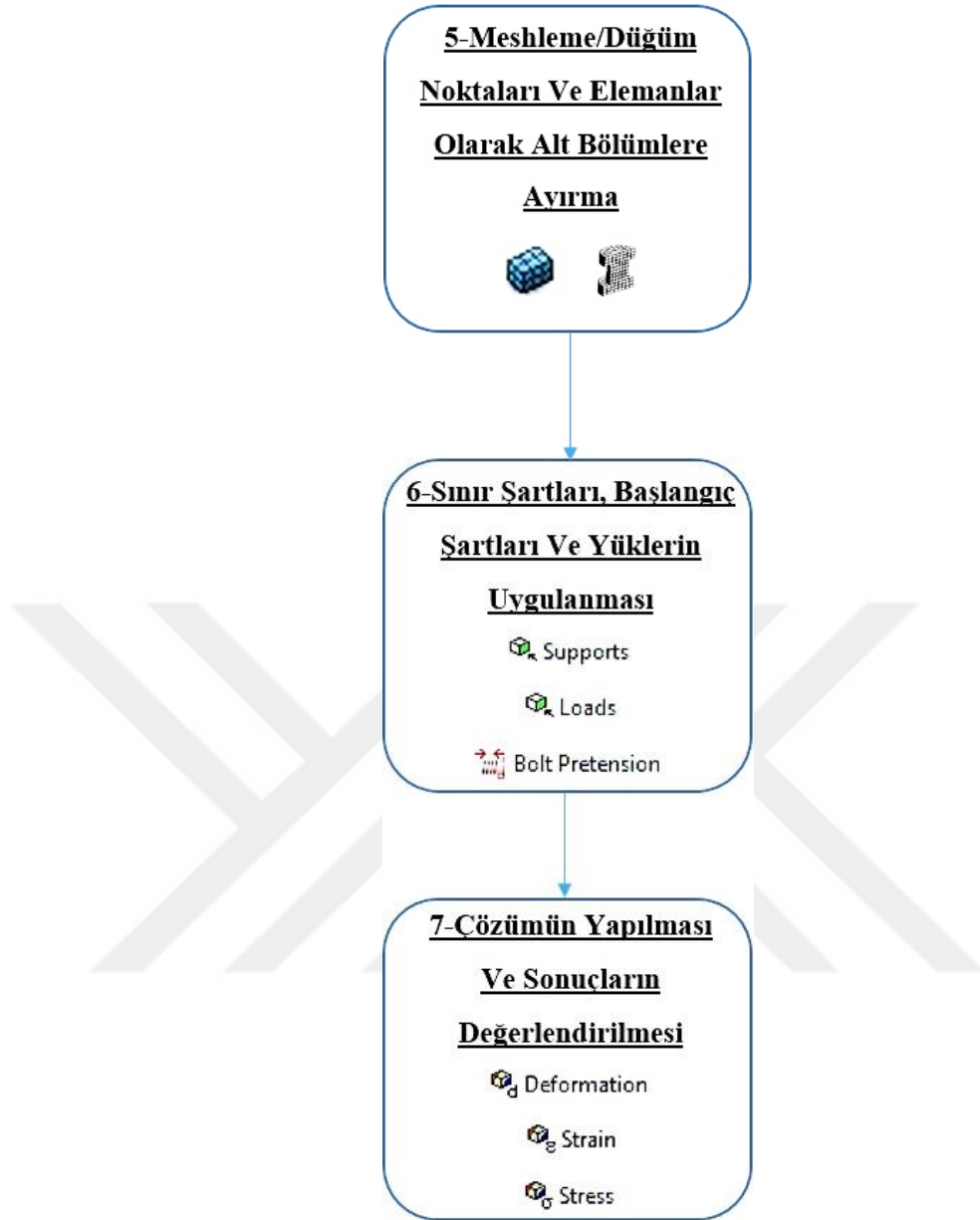
Sonlu elemanlar metodunun (SEM), esası sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip olan sistemi, düğüm noktalarında birbirleri ile bağlantılı olan sonlu sayıda basit sonlu elemanlara bölünmesi yöntemidir. Düğüm noktalarındaki kuvvetler ile düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler arasındaki ilişkinin (rijitlik veya esneklik matrisinin) kurulması, sistemlerin analizine sonlu elemanlar metodunun uygulanması analizin esas bölümlerinden biridir (Kasımzade, 2018).

Sonlu elemanlar metodu (SEM), mühendislik analizlerinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, analizi yapılacak sistemi sonlu sayıda düğümlerle, farklı gerilme ve deformasyonlara sahip olan elemanlara parçalayarak, sistemi oluşturan küçük alt bölümlere ayrılmış elemanların rijitlik matrislerinin toplamı sonucu sistemin rijitlik matrisinin elde edilmesi esasına dayanır.

Deneyel analiz yöntemleri gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesinde en iyi yollardan biri olmakla beraber, bu deneyler maddi, zaman ve cihaz ölçümleme gibi problemlerle karşılaşılacak durumlar meydana getirmektedir. Dolayısıyla günümüzde deneyel analiz çalışma sonuçlarına yakın sonuçlar veren sonlu elemanlar analiz programları kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analiz (SEA) programlarından biri olan ANSYS Workbench programı, bu tez kapsamında kullanılarak birleşim analizleri yapılacaktır.

Sonlu elemanlar analizi (SEA) yapılacak olan sistemin modelleme ve çözümler için izlenilecek temel işlem adımları sırası vardır. Bu işlem adımları genel hatları ile kısaca Şekil 3.1.'de verilmiştir. Şekil 3.1.'de anlatılan aşamaların her bir adımı kendi içinde ayrıntılı bir süreç olup, aşamalar başlıklar halinde ele alınıp gerekli detaylar açıklanacaktır.





Şekil 3.1. Sonlu elemanlar analiz metodunda genel olarak çözüm için izlenecek temel işlem adımları.

3.1. Uygulanacak Analiz Türünün Belirlenmesi

Günümüzde birçok fizik ve mühendislik dalındaki hemen hemen her problem türünün modellerinin tasarımında ve analizinde en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden olan sonlu elemanlar analiz (SEA) yöntemi uygulanabilmektedir. ANSYS Workbench ara yüzünde, herhangi bir analize başlanmadan önce analiz türünün belirlenmesi gerekmektedir ve gereksinime göre yapılabilen başlıca analizler şunlardır;

- Gerilme analizleri,
- Statik ve dinamik elastisite ve plastisite problemleri,
- Doğrusal ve doğrusal olmayan (Non-linear) analizler,
- Darbe analizleri,
- Sismik deprem analizleri,
- Akışkanlar mekaniği,
- Isı iletimi, ısı genleşme, yalıtım,
- Dalga yayılımı,
- Aerodinamik,
- Gürültü ve titreşim analizleri,
- Yorulma analizleri,
- Biyomekanik,
- Elektrik ve manyetik alanlar analizi,
- Medikal uygulama analizleri...

3.2. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

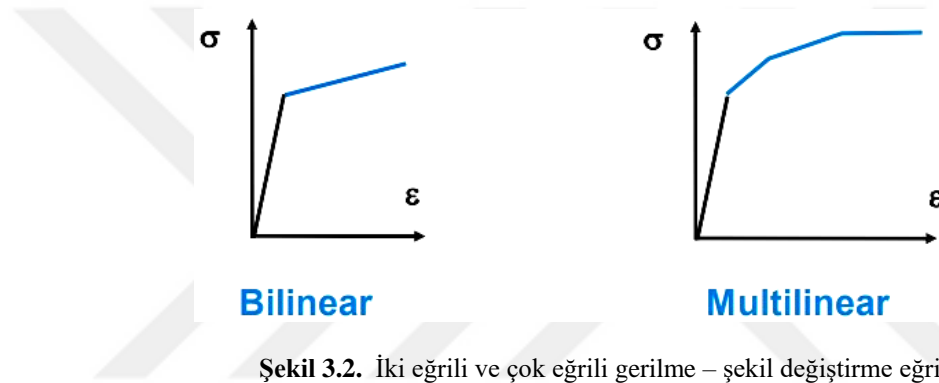
Sonlu elemanlar analizinin en önemli adımlarından olan ve ilk girdi yapılarak malzeme özelliklerinin tanımlandığı bölümdür. Malzeme kütüphanesinde çok sayıda mühendislik malzemesi bulunmakta ve bunlara ilaveten istenilen özelliklerde malzeme modeli oluşturulabilir. ANSYS Workbench programının malzeme kütüphanesinde en çok kullanılan malzemeler tanımlanmış haldedir. Tasarlanan modelde gerek duyulan malzeme özelliklerinin seçimi yapıldıktan sonra kullanılacak olan malzemenin tüm özelliklerinin programa tanınması gerekmektedir. Analizi yapılacak olan modele

tanımlanan malzeme özellikleri analizin tüm sonuçlarını değiştireceği için, malzeme özellikleri tanımlama adımı ilk ve en önemli adımdır.

ANSYS Workbench (SEA) programında doğrusal olmayan analizlerde kullanılacak olan metal malzemesi iki farklı şekilde dikkate alınabilir;

- İki eğrili (Bilinear)
- Çok eğrili (Multilinear)

İki eğrili ve çok eğrili iki farklı tipteki gerilim – gerinim eğrilerine sahip metal malzemelerin örnek grafiklerinin gösterimi aşağıdaki Şekil 3.2.’de gösterilmiştir.

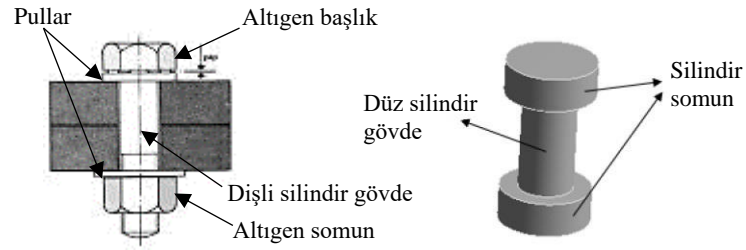


3.3. Modelin/Geometrinin Oluşturulması

Analizi yapılacak olan modelin oluşturulduğu işlem adımdır. Tasarlanacak model ANSYS Workbench programının “DesignModeler” ya da “SpaceClaim” bölümlerinde tasarlanabilir. Tasarlanacak model ANSYS Workbench ile uyumlu çalışan diğer paket programlarında tasarlanıp model ANSYS Workbench programına aktarılabilir.

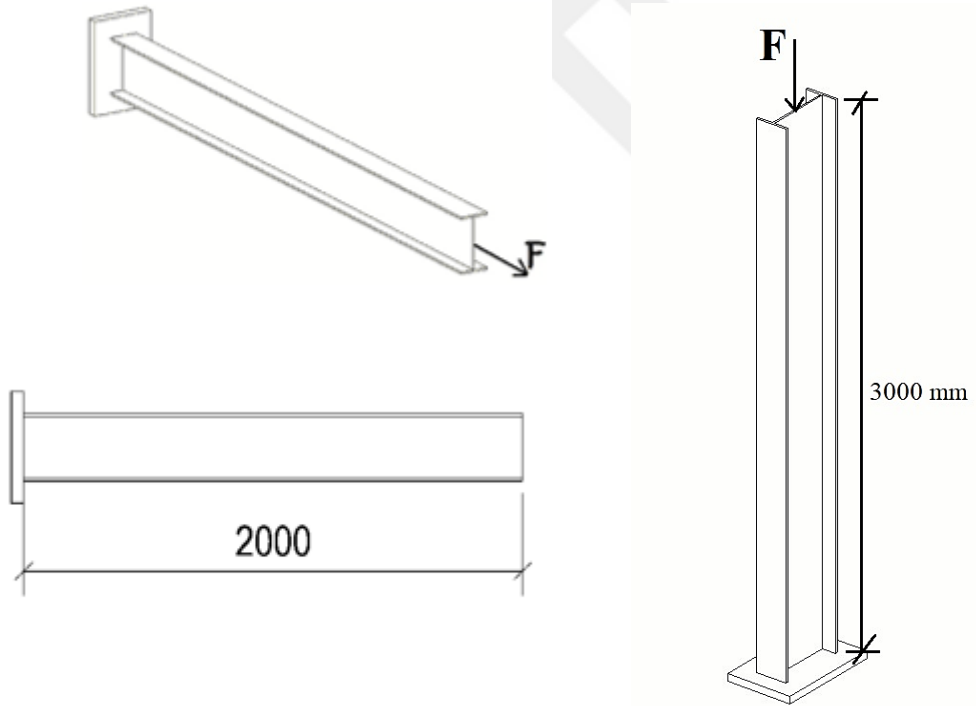
Analiz için tasarlanacak modellerin geometrileri oluşturulurken mümkün olduğunca analiz sonuçlarında çok fazla değişikliğe sebep olmayacak şekilde basitleştirmeler yaparak çözüm süresinin kısılmasında katkı sağlanabilir. Modeli mümkün olduğunca sade, basitleştirilmiş ve sınırlı olarak modellemek analiz süresinin kısılmasında önemli ölçüde etkileyecek hususlardır. Örneğin gerçek birleşimlerde kullanılan bulonların somunları altıgen, bulon gövdesi dişli, bulon başlığı altında ve somun altlarında pullar mevcuttur. ANSYS’de modeller oluşturulurken basitleştirme amacıyla bulon gövdesi dişleri, altıgen geometriye sahip başlıklar ve pullar dikkate

alınmadan bulon silindirik şekilde modellenebilir. Şekil 3.3.'de gerçekte kullanılan bulon modeli ile ANSYS Workbench'de kullanılabilecek bulon modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gerçekte kullanılan bulonların basitleştirilmiş modeli (Karabörk, 2019).

Örnek olarak Şekil 3.4.'de bir konsol kiriş ve ankastre kolon yapı elemanlarının modeli verilmektedir. Bu yapı elemanlarına, kirişe aksel çekme kuvveti kolona aksel basınç kuvveti uygulanacak ve deformasyon gerilme sonuçları incelenecektir. Yapı elemanları analitik olarak hesaplanıp analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

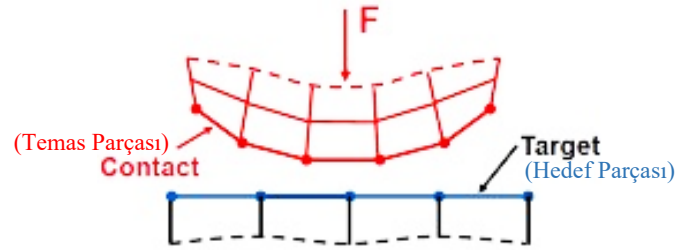


Şekil 3.4. Örnek kolon ve kiriş yapı elemanları

3.4. Parçalar Arasındaki Temas Durumları

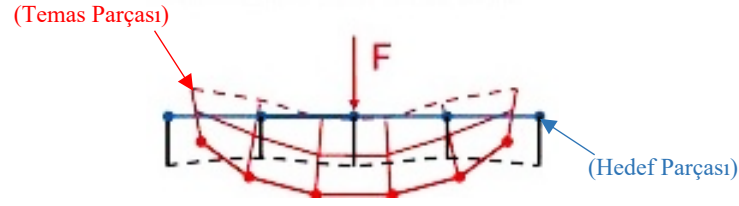
Tasarlanan modeli, meydana getiren parçalar arasında birleşimlerin doğru şekilde çalışması için temas durumları belirlenmektedir. Kısaca parçalar arasına ek olarak temas elemanları tanımlanmaktadır. Parçalar arasına temas durumlarının tanımlanmasındaki amaç, birbiri ile etkileşim içinde olan parçalar arasında ve sonlu elemanlar düğüm noktaları arasında bir ilişki tanımlanmaktadır. Birbiri ile etkileşim içinde olan parçalardan biri “Temas (Contact)” parçası diğeri ise “Hedef (Target)” parçası olarak adlandırılmaktadır. Parça temas durumunu anlatan şematik gösterimi Şekil 3.5.’de gösterilmektedir.

Modellemelerde temaslar genelde iki türlü olmaktadır. “Nokta – Yüzey” ve “Yüzey – Yüzey” olarak değerlendirilmektedir. Nokta – Yüzey temas durumlarında Nokta, temas (Contact) seçilir. Yüzey, hedef (Target) seçilir. Yüzey – Yüzey temas durumlarında her iki yüzey de temas ya da hedef olabilir ama analiz için temas ve hedef yüzeylerinin seçilmesi gerekmektedir. Bunun için Yüzey – Yüzey temas durumlarında Contact ve Target seçilirken boyutsal özellik dikkate alınır. Küçük olan parça, temas (Contact) seçilir. Büyük olan parça ise hedef (Target) seçilir (Gök ve Gök, 2018).

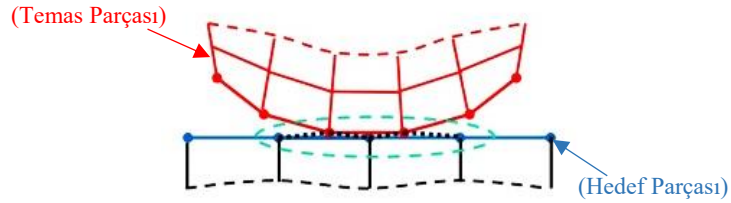


Şekil 3.5. Temas parçası ve hedef parçasının şematik gösterimi (Gök ve Gök, 2018).

Tasarlanan modeli, meydana getiren parçalar arasında eğer temas durumları belirlenmezse parçalar birbirleri içine girerler ve analiz sonuçları hatalı elde edilmiş olur. Bu sebepten dolayı parçalar arası temas durumları dikkate alınmalıdır. Şekil 3.6.’da ve Şekil 3.7’de temas durumlarının dikkate alınmadığı ve alındığı zamanki durumları şematik olarak gösterilmiştir.



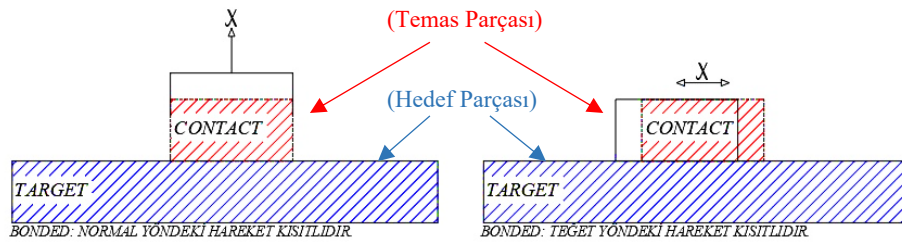
Şekil 3.6. Parçalar arasında temas belirlenmemesi durumu (Gök ve Gök, 2018).



Şekil 3.7. Parçalar arasında temas belirlenmesi durumu (Gök ve Gök, 2018).

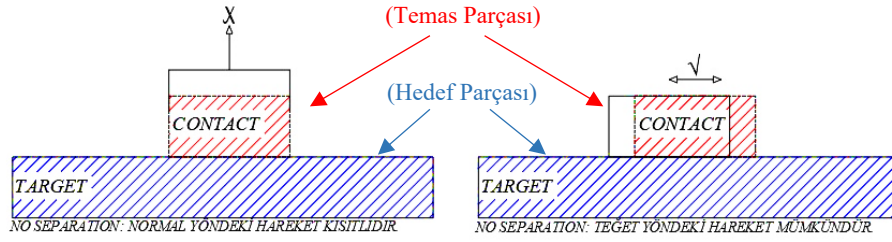
ANSYS Workbench sonlu elemanlar analiz programında 5 farklı temas türü yer almaktadır. Bu temas türlerinin isimleri ve davranış biçimleri açıklanıp şekil üzerinde daha net anlaşılması sağlanmıştır.

- 1) Yapıştırılmış temas (Bonded Contact): Bu temas türünde parçalar birbirlerinin normalleri ve teğetleri doğrultularında hareketleri engellenmiştir. Yani birbirine yapıştırılması (kaynaklanması) ile oluşturulan temas türüdür. Şematik gösterimi Şekil 3.8.'de verilmiştir.



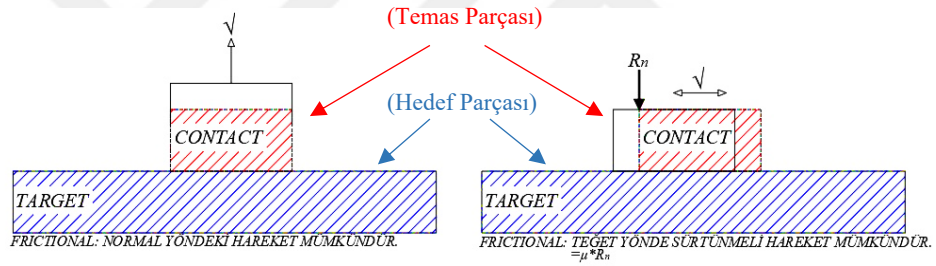
Şekil 3.8. Bonded temas davranışının şematik gösterimi.

- 2) Ayrılmaz temas (No Separation Contact): Bu temas türünde hedef ve temas yüzeyleri birbirlerine bağlıdır. Parçalar birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareketi mümkündür. Fakat temastaki düğümler normal yönde teğet olduğu yüzeye yapıştırılmışlardır. Normali doğrultusunda hareket kısıtlanmıştır. Şematik gösterimi Şekil 3.9.'da verilmiştir.



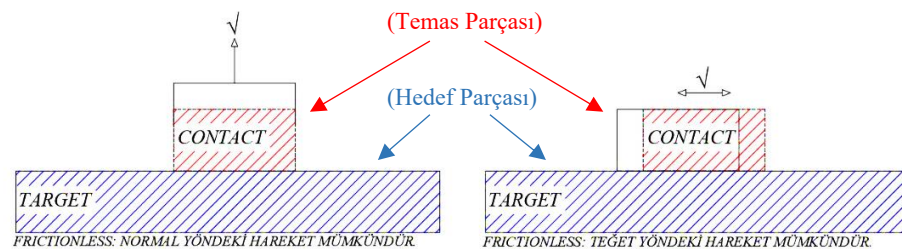
Şekil 3.9. No Separation temas davranışının şematik gösterimi.

- 3) Sürtünlü temas (Frictional Contact): Bu temas türünde parçalar birbirlerinin normalleri ve teğetleri doğrultularında hareketleri mümkündür. Fakat teğetsel yöndeki hareketi belirlenen bir sürtünme katsayısına bağlı olarak hareketi gerçekleştirecektir. Bu davranış temas açıklığını ya da kapalılığını yanıtabilir. Sürtünme katsayısı "0" olarak girilirse sürtünlü temas, sürtünmesiz temas olarak işlem yapar. Şematik gösterimi Şekil 3.10.'da verilmiştir.



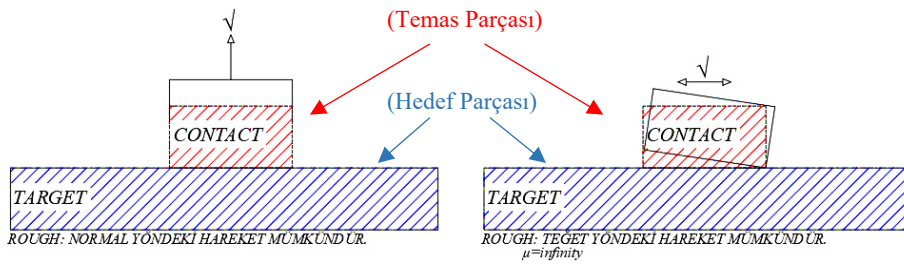
Şekil 3.10. Frictional temas davranışının şematik gösterimi.

- 4) Sürtünmesiz temas (Frictionless Contact): Bu temas türünde parçalar birbirlerinin normalleri ve teğetleri doğrultularında sürtünmesiz hareketleri mümkündür. Genellikle temas etmeyen yüzeyler arasında sürtünmesiz temas türü seçilir ve herhangi bir tepki kuvveti yoktur. Şematik gösterimi Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Frictionless temas davranışının şematik gösterimi.

- 5) Kaba temas (Rough Contact): Bu temas türünde parçalar birbirlerinin normalleri doğrultularında hareketleri mümkündür. Fakat teğetleri doğrultusunda hareketleri sonsuz sürtünme katsayısı ile kısıtlanmıştır. Temastaki düğümler teğetsel yönde hedef yüzeyine yapıştırılmıştır. Şematik gösterimi Şekil 3.12.'de verilmiştir.

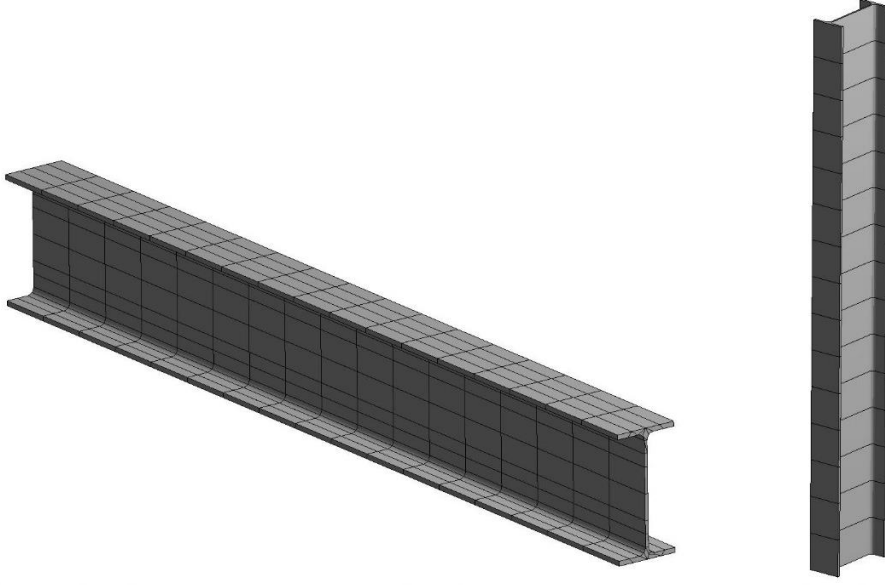


Şekil 3.12. Rough temas davranışının şematik gösterimi.

Özellikleri verilen temas örneklerinden Yapıştırılmış temas (Bonded) ve Ayrılmaz temas (No Separation) temas durumları doğrusal analiz (Linear) temaslardır çünkü normal doğrultuda ayrılma söz konusu değildir. Sürtünmeli temas (Frictional), Sürtünmesiz temas (Frictionless) ve Kaba temas (Rough) için ise doğrusal olmayan analiz (Non-linear) temaslardır çünkü normal doğrultuda hareket söz konusudur. Problemlerde doğrusal olmayan temas türlerin sayısının fazla olması demek çözüm süresinin artması anlamına gelir. Problem türüne bağlı olarak doğrusal analiz temasları seçilerek analiz süresinin azaltılması sağlanabilir.

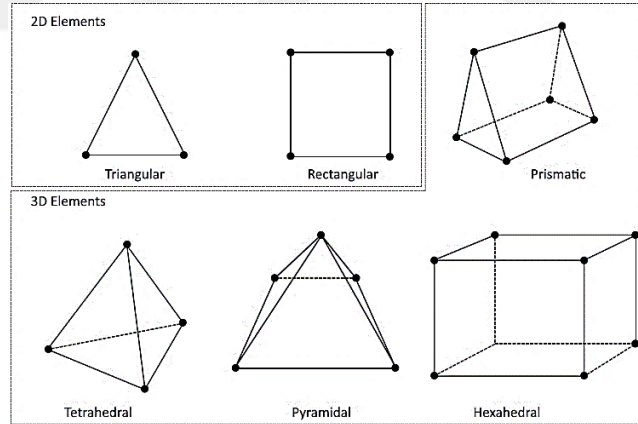
3.5. Meshleme/Düğüm Noktaları ve Elemanlar Olarak Alt Bölümlere Ayırma

Sonlu elemanlar analiz yönteminde problemlerin çözümlenmesinde dikkate alınması gereken diğer önemli aşamalardan bir tanesi de problemin sonlu eleman ağının oluşturulmasıdır. Bu meshleme olayı, modelleme de boyutları/alanları belirlenmiş elemanları meshleme ile çok küçük elemanlara (boyutlara/alanlara) bölme işlemi olarak tanımlanabilir. Örnekte kullanılacak olan kolon ve kiriş I çelik profil elemanı Şekil 3.13.'de verilen meshleme ile küçük alt birimlere bölündüğünün örneği gösterilmiştir. Burada amaç birim alana düşen gerilimi belirleyebilmek için toplam alanı, elementler ile daha küçük alanlara bölmektir. Tüm elementlerde oluşan gerilimler çeşitli fonksiyonlar ile birleştirilip toplam gerilme belirlenmektedir.



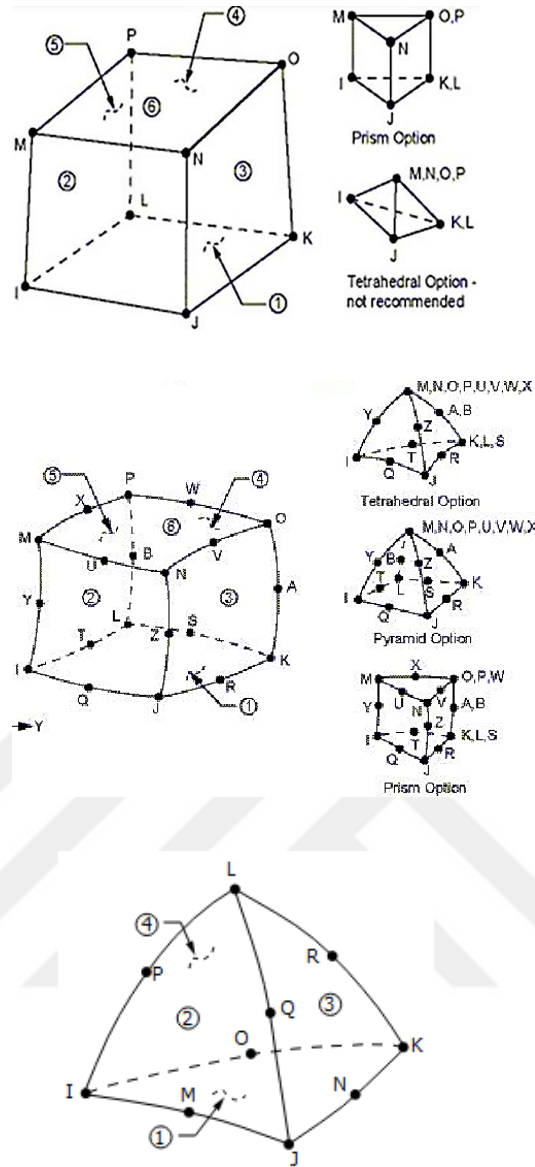
Şekil 3.13. Meshlenmiş çelik I profil kolon ve kiriş örneği.

Tasarlanan modeli meshlemede, geometrisinin şekline ve karmaşıklığına göre farklı meshleme element türleri kullanılmaktadır. Şekil 3.14.'de kullanılan element türleri verilmektedir.



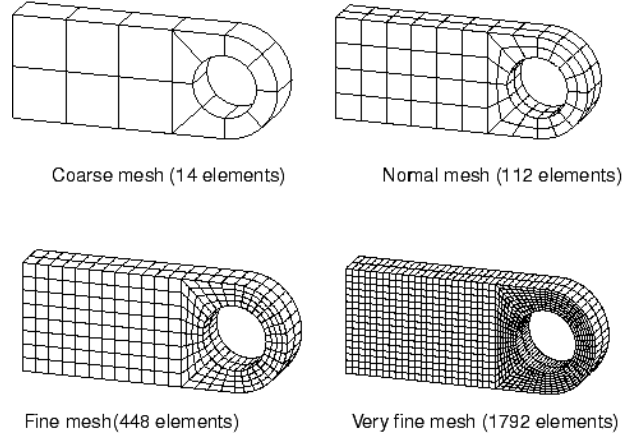
Şekil 3.14. Meshlemede kullanılan element türleri.

Üç boyutlu katı ve yüzey modellenmiş parçaların meshlenmesinde kullanılan elementler hacim meshlemede kullanılır. Bu üç boyutlu problemlerde sık kullanılan bazı üç boyutlu elemanlar Şekil 3.15.'de verilmiştir.



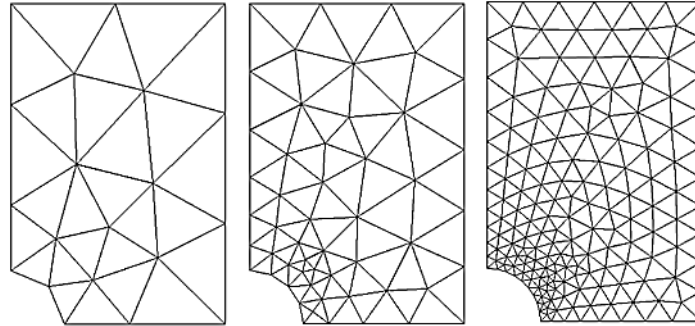
Şekil 3.15. Üç boyutlu katı modelleri meshlemede kullanılan bazı üç boyutlu elemanlar (ANSYS Inc., 2018).

Meshlemenin hassasiyeti arttırıldıkça daha net sonuçlar elde edilebilir. Meshleme hassasiyetinin arttırılması işlemi problemin analiz süresini arttırmaktadır. Bu yüzden gereğinden fazla meshleme yapmak gereksiz şekilde hesaplama süresinin arttırılması demektir. Şekil 3.16.'da mesh hassasiyetini gösteren şekil verilmiştir.



Şekil 3.16. Kaba ve hassas meshleme türleri (Abaqus, 2019).

Local (Bölgesel) meshleme, tüm sonlu eleman analiz modellerinde meshlemenin en önemli aşamalarından biridir. Modelde özellikle her yere aynı yoğunluk ve türde meshleme yapılması doğru değildir. Local mesh, özellikle temas yüzeylerinde, yük aktarımı yüzeylerinde, keskin köşelerde, delik bölgelerinde ve çatlak başlangıçlarında hassas meshleme yapılmalıdır. Bu yerlere local mesh ile daha hassas bölgesel meshleme yapılmaması durumunda mesh hata oranı artmaktadır. Bu hata oranını minimuma indirmek ve kabul edilebilecek düzeye getirebilmek amacıyla local (bölgesel) mesh yapılmaktadır. Şekil 3.17.'de local meshleme örneği gösterilmiştir.

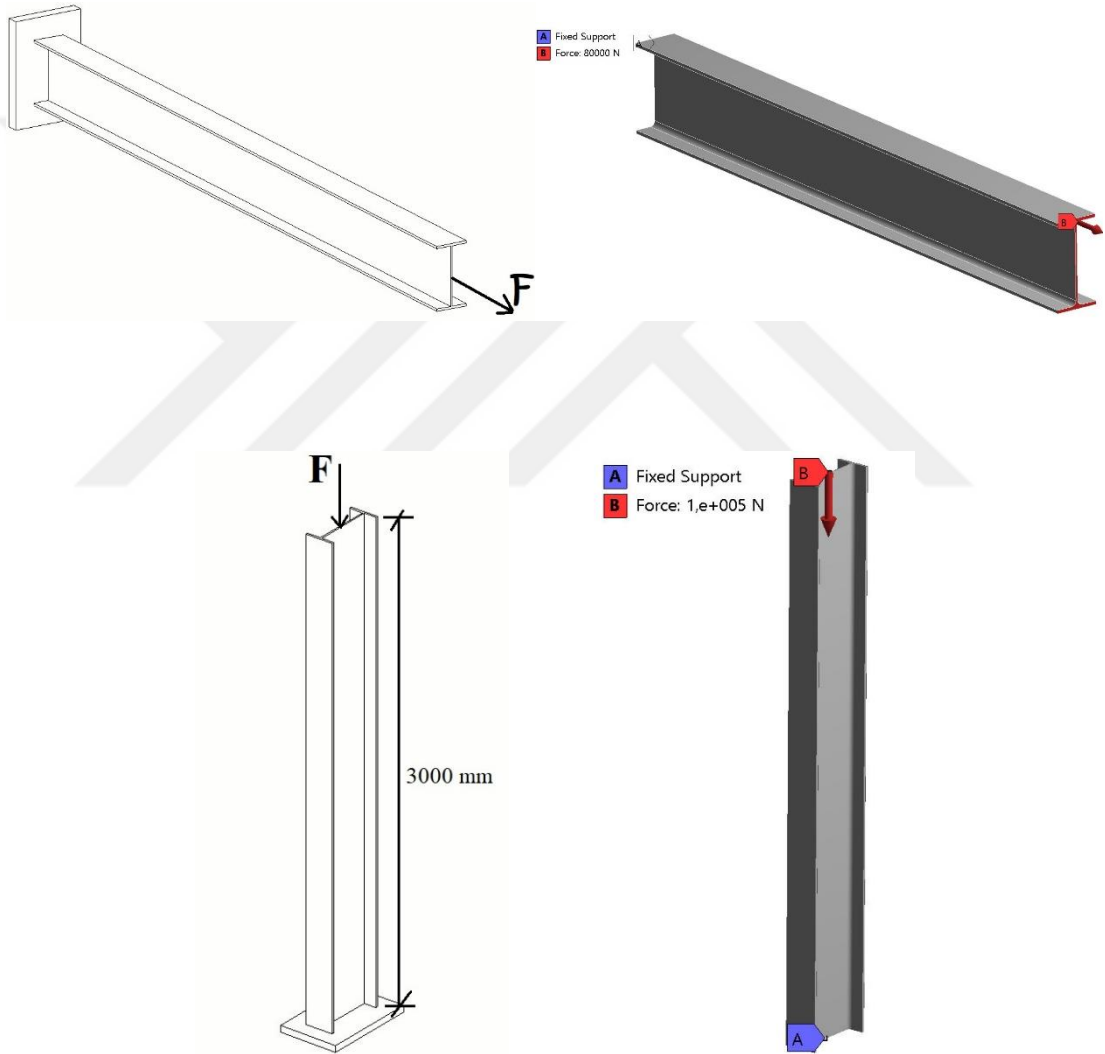


Şekil 3.17. Local (Bölgesel) mesh örneği (Frei, 2013).

Meshleme esnasında genel olarak dikkat edilmesi gereken hususlar geometrik süreksizliklerinin bulunduğu yerler daha yoğun (local) meshlenmeli, problemde incelenecek yerler modelin diğer yerlerine göre daha yoğun (local) meshlenmeli, temas bölgelerinde meshleme diğer bölgelere göre daha yoğun (local) mesh yapılmalıdır. Yoğun mesh bölgeleri arttıkça çözüm süresinin uzamasına sebep olacağı için mümkün mertebe en uygun ve doğru şekilde meshleme işlemleri yapılmasına dikkat edilmelidir.

3.6. Sınır Şartların, Başlangıç Şartların ve Yüklerin Uygulanması

Sonlu elemanlar analiz modellerinin doğru modelleme yapılması ve sonuç alınmasında diğer önemli bir nokta da sınır şartlarının ve yüklerin uygulanmasının, doğru olarak tanımlanmasıdır. Modelde bilinmeyen sayısının azaltılması ve bu sayede analiz süresinin azaltılması için sınır şartlarının tam ve doğru olarak tanımlanması önem arz etmektedir. Örnekteki I çelik profiline uygulanan sınır şartları ve yükler Şekil 3.18.'de gösterilmiştir.

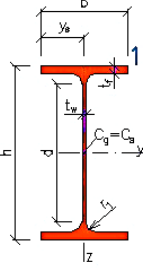
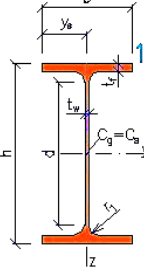


Şekil 3.18. Sınır şartlarının ve yüklerin uygulanması örneği.

3.7. Çözümün Yapılması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Yükleme ve sınır şartları girilen modellerin düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler veya bir elemandaki asal gerilemelerin çözüm değerlerini elde etmek için lineer veya lineer olmayan analizler program yardımıyla yaptırılarak sonuç değerler yorumlanır. Çözümün yapılmasından sonra elde edilen sonuçlar doğrultusunda gerilme, deformasyon, burkulma, eğilme, kesit yeterliliği, et kalınlığının yeterliliği, emniyet katsayısı gibi birçok verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanması gerekmektedir.

Örnekte dikkate alınan çelik I profiller, IPE kesitli S235 çelik sınıfı olan yapısal çelik yapı elemanlarıdır. IPE270 kirişine ve IPE400 kolonuna ait kesit bilgileri Şekil 3.19.'da verilmiştir. 2000 mm uzunluğundaki kiriş elemanı ucundan 80 kN'luk bir aksel çekme kuvveti uygulanarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. 3000 mm uzunluğundaki kolon elemanı ucundan 100 kN'luk aksel basınç yükü uygulanarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır.

<p>h = 270 mm b = 135 mm t_f = 10.2 mm t_w = 6.6 mm r₁ = 15 mm y_s = 67.5 mm d = 219.6 mm A = 4590 mm²</p>		<p>h = 400 mm b = 180 mm t_f = 13.5 mm t_w = 8.6 mm r₁ = 21 mm y_s = 90 mm d = 331 mm A = 8450 mm²</p>	
---	---	---	---

Şekil 3.19. IPE270 kirişine ve IPE400 kolonuna ait kesit bilgileri.

Problemin Analitik Çözümü:

IPE270 kesitli kirişte uygulanan çekme kuvveti sonucunda oluşan gerilme ve deformasyon aşağıda hesaplanmıştır.

IPE270 kesitinin gerilme hesabı.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F}{A} \quad F = 80000 \text{ N} \quad A = 4590 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{80000 \text{ N}}{4590 \text{ mm}^2} = 17,429 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (MPa)}$$

IPE270 kesitinin deformasyon hesabı.

$$\Delta l = \frac{F \cdot L}{E \cdot A} \quad E = 200000 \text{ MPa} \quad L = 2000 \text{ mm}$$

$$\Delta l = \frac{80000 \text{ N} \cdot 2000 \text{ mm}}{200000 \text{ N/mm}^2 \cdot 4590 \text{ mm}^2} = 0,174 \text{ mm}$$

IPE270 kesitinin güvenlik katsayısı hesabı.

$$F_y = \sigma_y = 235 \text{ MPa} \quad s = \frac{\sigma_y}{\sigma_c} = \frac{235 \text{ MPa}}{17,429 \text{ MPa}} = 13,483$$

IPE400 kesitli kolona uygulanan basınç kuvveti sonucunda oluşan burkulma kuvveti, deformasyon ve burkulma gerilmesi aşağıda hesaplanmıştır.

IPE400 kesitinin burkulma kuvveti hesabı.

$$E = 200000 \text{ MPa} \quad I_x = 13200000 \text{ mm}^4 \quad F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{L_k^2}$$

$$L_k = K \cdot L \quad K = 2,0 \quad L_k = 2 \cdot L \quad L_k^2 = 4 \cdot L^2$$

$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{L_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200000 \cdot 13200000}{4 \cdot 3000^2} = 723770,989 \text{ N}$$

IPE400 kesitinin deformasyon hesabı.

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} = \frac{100000 \cdot 3000}{200000 \cdot 8450} = 0,17751 \text{ mm}$$

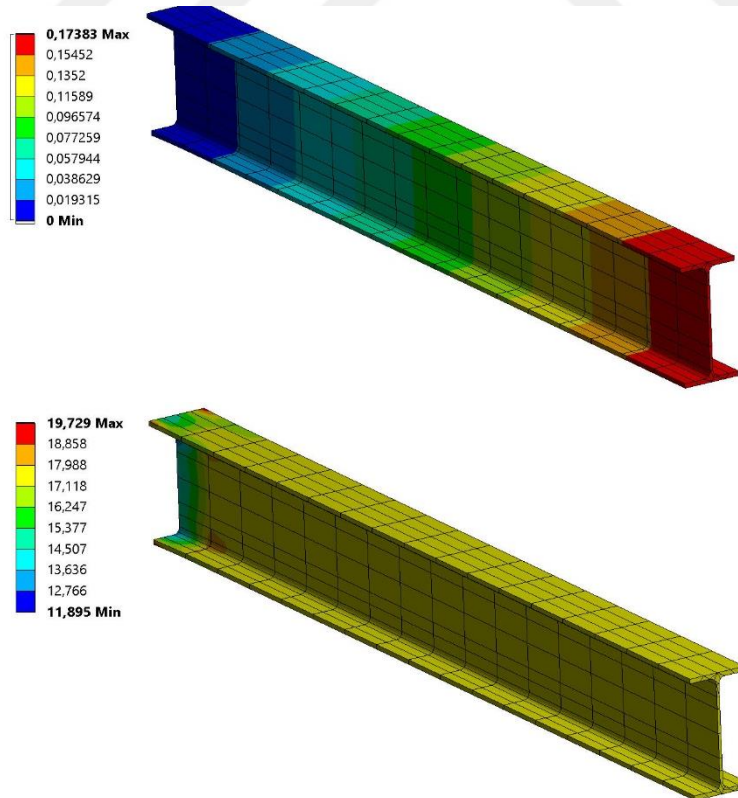
IPE400 kesitinin burkulma gerilmesi hesabı.

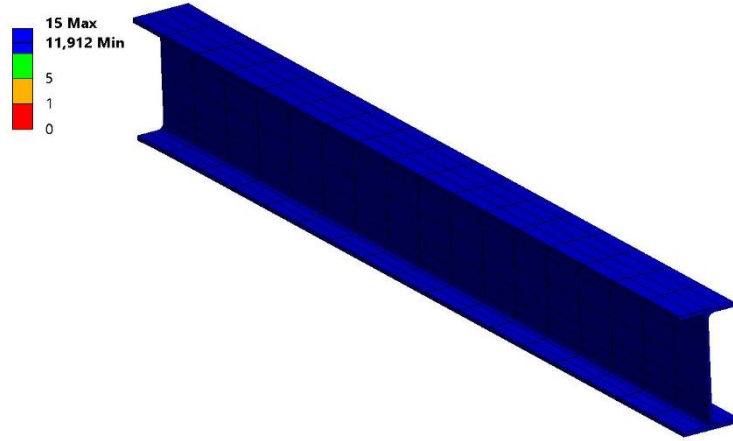
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{100000}{8450} = 11,834 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{kr} = \frac{F_{kr}}{A} = \frac{723770,989}{8450} = 85,653 \text{ MPa}$$

Problemin ANSYS ile Çözümü ve Sonuçları:

Örnekteki kiriş ve kolon yapı elemanlarının yapısal çelik sınıfı S235 olarak ANSYS Workbench programına girilip, kesitler yapı elemanının boyutlarına göre modellenmesi yapılmıştır. Problemdaki sınır şartları ve yüklemeler uygulanarak yapı elemanlarının farklı mesh boyutları ile sonu elamanlar analizi yapılp istenilen sonuçlar ve değerler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.20. ve Şekil 3.21.'de verilmiştir. Analitik hesaplarda elde edilen sonuçların, ANSYS Workbench ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması Çizelge 3.1.'de ve 3.2.'de verilmiştir

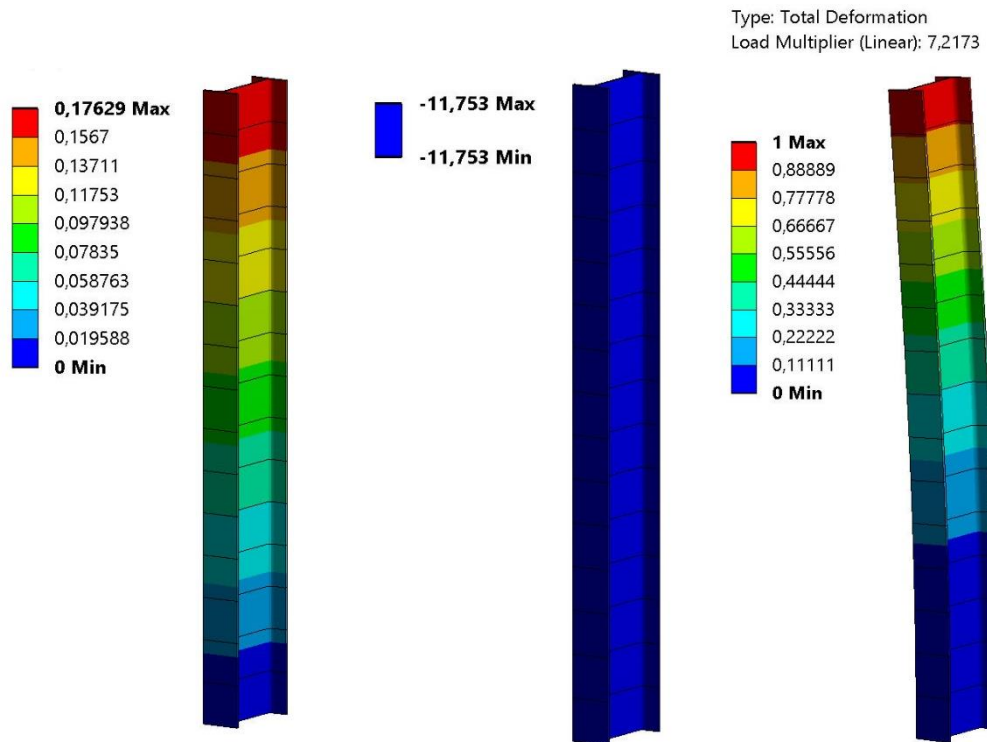




Şekil 3.20. IPE270 kirişinde oluşan gerilme ve deformasyonlar.

Çizelge 3.1. Teori ve ANSYS Analiz Kiriş Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Gerilme (MPa)	Uzama Miktarı (mm)	Max. Gerilme (Mpa)	Nodes	Elements
Mesh Boyutu (10 mm)	17,412	0,17385	28,695	84903	12800
Mesh Boyutu (40 mm)	17,410	0,17382	23,534	12476	1850
Mesh Boyutu (80 mm)	17,413	0,17380	20,681	3652	575
Mesh Boyutu (120 mm)	17,416	0,17383	19,729	2658	425
Analitik Çözüm	17,429	0,17429	17,429	–	–



Şekil 3.21. IPE400 kolonunda oluşan gerilme ve deformasyonlar.

Çizelge 3.2. Teori ve ANSYS Analiz Kolon Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Basınç Gerilmesi (MPa)	Kritik Yük (MPa)	Total Deformasyon (mm)	Nodes	Elements
Mesh Boyutu (200 mm)	11,753	721730,00	0,17629	31	15
Mesh Boyutu (500 mm)	11,753	721740,00	0,17629	13	6
Analitik Çözüm	11,834	723770,99	0,17751	-	-

Çekme gerilmesi uygulamasında analitik olarak hesaplanan gerilme değeri 17,42 MPa olarak bulunmuştur. ANSYS Workbench programı ile yapılan sonlu elemanlar analiz sonucunda ise gerilme değeri mesh aralıklarına göre çok fazla farklılık göstermese de farklı sonuçlar elde edilmiş olup bu değer yaklaşık olarak 17,41 MPa'dır. Analitik hesapla bulunan gerilme değeri ile neredeyse aynıdır. Kesitte meydana gelen uzama miktarı, analitik olarak elde edilen 0,1742 mm'dir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen uzama miktarı 0,1738 mm'dir ve bu değer teoride hesaplanan değer ile neredeyse aynıdır.

Burkulma gerilmesi uygulamasında analitik olarak hesaplanan basınç gerilmesi 11,834 MPa olarak bulunmuştur. ANSYS Workbench programı ile yapılan sonlu elemanlar analiz sonucunda ise basınç gerilmesi değeri farklı mesh aralıklarına göre farklılık göstermemiştir ve bu değer mesh aralığı arttıkça artış göstermiştir ve 11,753 MPa'dır. Analitik hesapla, sonlu elemanlar analizi ile bulunan basınç gerilmesi neredeyse aynıdır. Kesitte meydana gelen kritik yük, analitik sonucu 723770,99 MPa'dır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kritik yük 200 mm mesh aralığında değeri 721730,00 MPa'dır. Analitik hesapla, sonlu elemanlar analizi ile bulunan basınç gerilmesi değeri ile neredeyse aynı olduğu görülmektedir.

Elde edilen sonuçlar arasındaki hata miktarı oranları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Elde edilen sonuçlar ve hata miktarı oranları.

	Gerilme (MPa)		Sonuçlardaki Hata Miktarı Oranı (%)	Deformasyon (mm)		Sonuçlardaki Hata Miktarı Oranı (%)
	Analitik Sonuç	ANSYS Sonuç		Analitik Sonuç	ANSYS Sonuç	
Çekme Gerilmesi	17,42	17,41	0,057	0,1742	0,1738	0,229
Burkulma Gerilmesi	11,834	11,753	0,684	0,17751	0,17629	0,687

4. SONLU ELEMANLAR MODELLEMELERİNİN DOĞRULANMASI

Tez kapsamında incelenecek olan birleşimlerin analizlerine başlanmadan önce sonlu elemanlar analiz (SEA) yönteminin doğrulanması amacıyla, literatürden Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem Araştırma Laboratuvarın 'da tersinir tekrarlanır (çevrimsel) yükleme altında deneysel analizleri incelenen 4 adet alın levhalı bulonlu kolon – kiriş birleşimlerinden ilki olan referans numunesi seçilmiştir (Hatipoğlu, 2011).

Bu bölümde seçilen örnek birleşim sonlu elemanlar analiz yöntemi ile modellenerek, elde edilen analiz sonuçları literatürde elde edilen deneysel sonuçlarla yük geçişi grafikleri, yük – deplasman grafikleri, moment – toplam dönme grafikleri, dayanım zarfı grafikleri ve rijitlik azalımı grafikleri bakımlarından karşılaştırılması yapılacaktır.

4.1. Birleşimin Sonlu Elemanlar Analiz Modelinin Oluşturulması

4.1.1. Birleşimin Geometrik Detayı

Birleşimdeki kolon ve kiriş kesitleri, bulon çapı, alın levhası kalınlığı, malzeme kalitesi, mesnet özellikleri, yükleme şekilleri, kolon ve kiriş uzunlukları gibi veriler literatürdeki deneysel çalışmadan alınmaktadır.

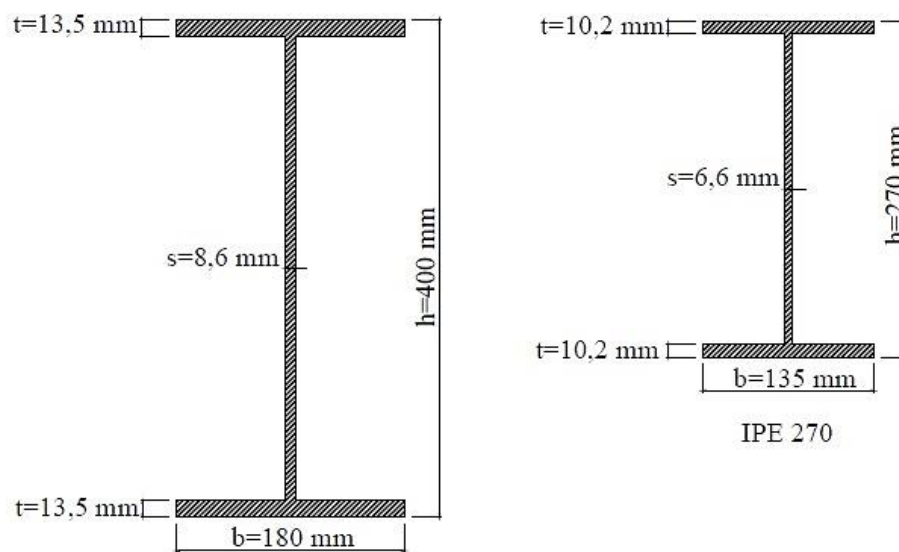
Deneyde kullanılan kolon IPE400 kesitli ve 3 metre uzunluğundadır. Kolon rijit yükleme duvarına dönme ve ötelenme yapması önlenerek şekilde sabitlenmiştir. Kiriş IPE270 kesitli ve 2 metre uzunluğundadır. Kiriş ucuna 20 mm kalınlığında alın levhası kaynatılmış ve kolon ortasından 8.8 kalitesinde M18'lik bulonlar ile sabitlenmiştir. Kullanılan profillerin geometrik ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.1.'de ve Şekil 4.1.'de verilmiştir. Birleşimde kirişin kolona birleştiği bölgede, kolon panel bölgesinin korunması amacıyla kolon gövdesi berkitmeler atılarak güçlendirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.2.'de verilmektedir. Kiriş ucundan tersinir tekrarlı (çevrimsel) yük verilmesi amacıyla oluşturulan yükleme düzeneğinin yatayda ve düşeyde hareketinin engellenecek şekilde yükleme sehpası bulonlar ile zemine sabitlenmiştir. Yükleme sehpası üzerinde sabitlenmiş olan hidrolik krikolar, birleşim sistemine hem çekme hem de basınç kuvveti uygulamamıza imkân sağlamaktadır. Yük okumalarını yapabilmek için

hidrolik kriko üzerine yük hücresi yerleştirilmiş. Birleşim detayları ise Şekil 4.3.'de gösterilmektedir. (Hatipoğlu, 2011).

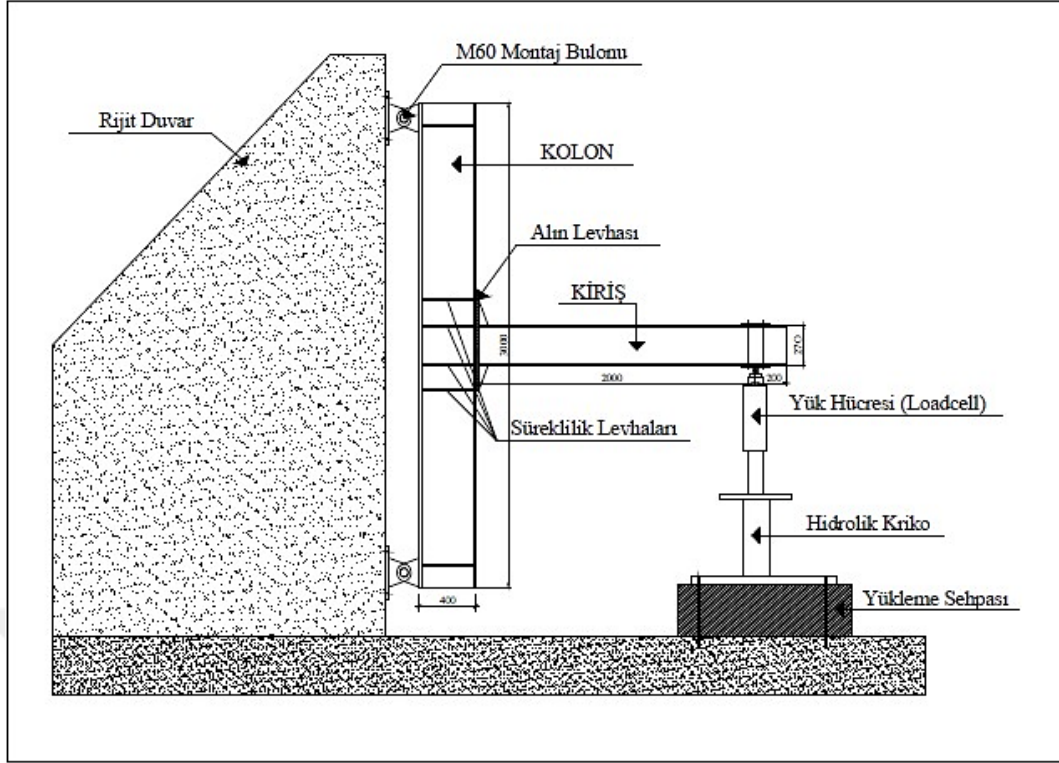
Şekil 4.2.'de görülen mesnet şartlarına ilave olarak yükleme noktası da düzlem dışına hareket etmeyecek şekilde mesnetlenmiştir. Birleşimin geometrik modellemeye bulunları ve kaynaklar modellenmeden dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.1. Birleşim örneklerinde kullanılan IPE profillerinin fiziksel ve şekilsel özellikleri. (Hatipoğlu, 2011).

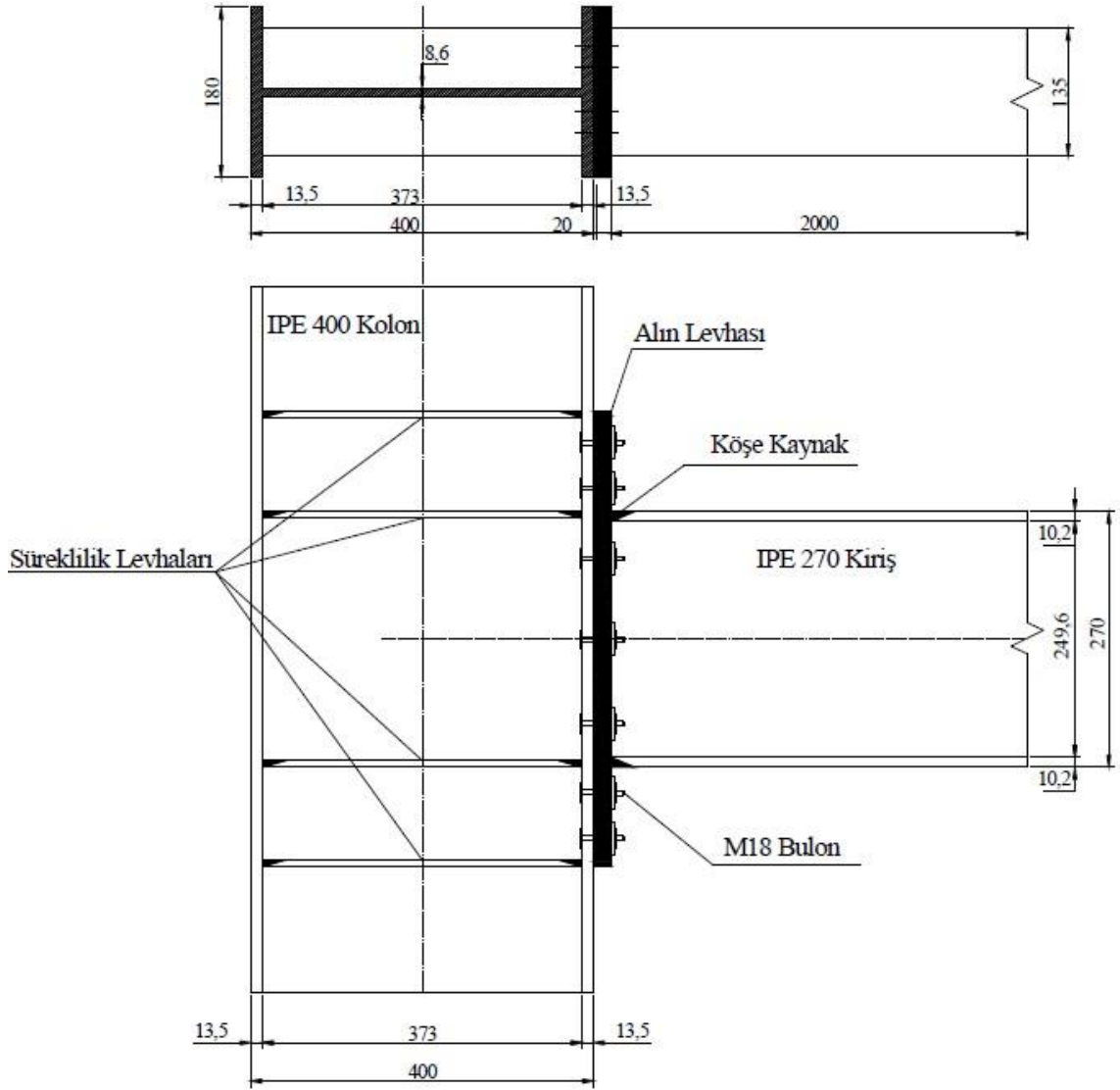
Parametreler / Profiller		IPE400	IPE270
b	(mm)	180	135
h	(mm)	400	270
t	(mm)	13,5	10,2
s	(mm)	8,6	6,6
F	(cm ²)	84,50	45,9
G	(kg/m)	66,3	36,1
I _x	(cm ⁴)	23130	5790
I _y	(cm ⁴)	1320	420
W _x	(cm ³)	1160	429
W _p	(cm ³)	1470	484
W _y	(cm ³)	146	62,2
İ _x	(cm)	16,5	11,2
İ _y	(cm)	3,95	3,02



Şekil 4.1. Birleşim örneklerinde kullanılan IPE kesitlerinin geometrik özellikleri (Hatipoğlu, 2011).



Şekil 4.2. Örnek birleşim sisteminin deney düzeneği (Hatipoğlu, 2011).

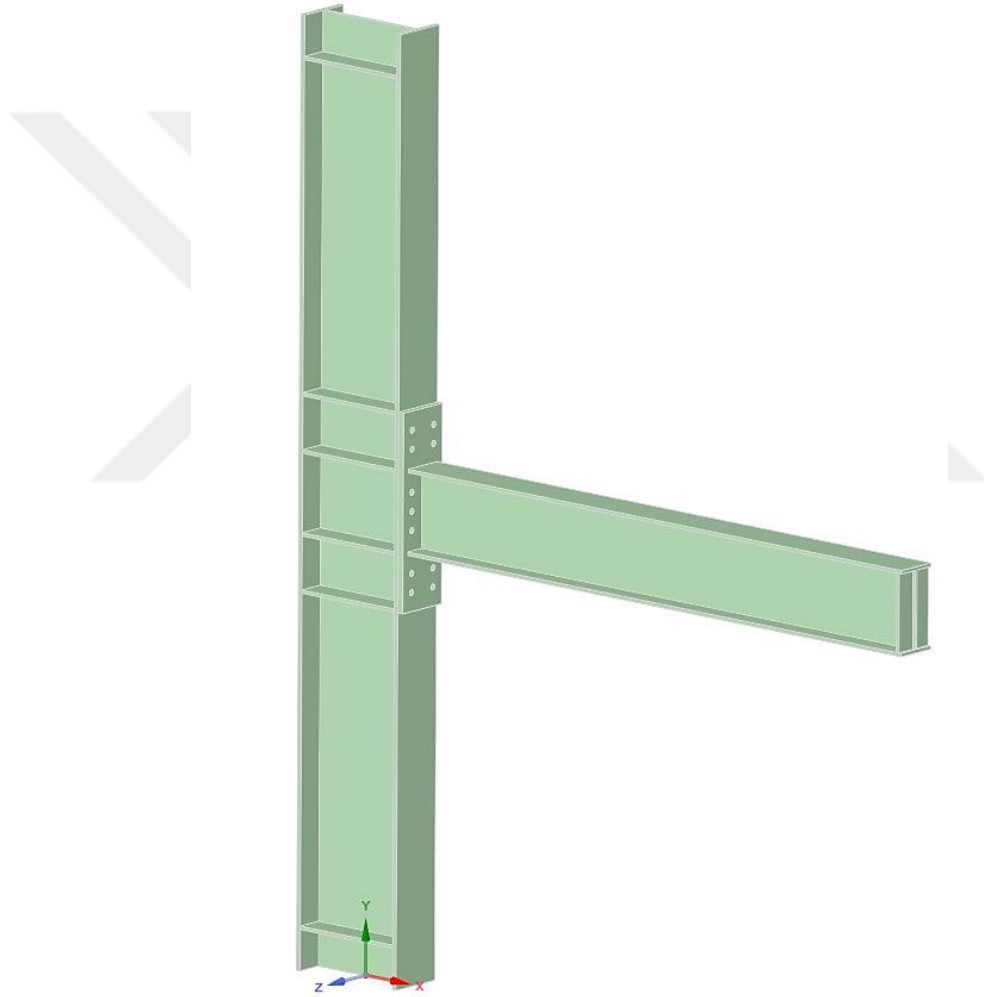


Şekil 4.3. Birleşim detayı (Hatipoğlu, 2011).

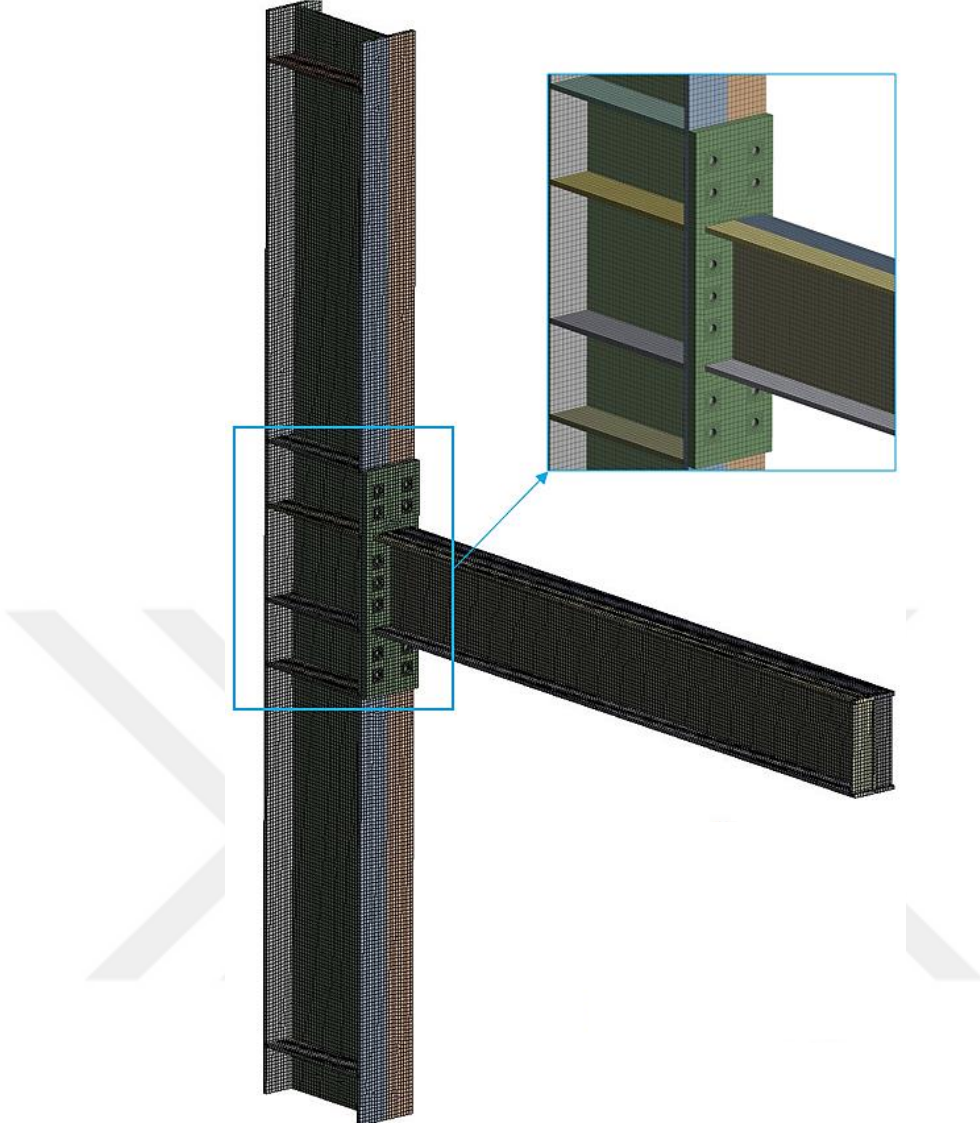
4.1.2. Birleşimin Sonlu Elemanlar Modeli

Literatürdeki deneysel çalışmadaki deney düzeneğinin analiz süresini azaltabilmek amacıyla bulonlar modellenmemiştir. Deneyde bulonlarla ilgili bir detay çalışma yapılmadığından dolayı bulon elemanları ile aynı işlevi görecektir parçalar arasındaki bağlantı elemanı olan beam elemanları kullanılarak meshlemede oluşan eleman sayısı ve düğüm nokta sayısı minimum seviyede tutularak analiz süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Birleşim detayı modellenirken Shell eleman yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Burada Shell eleman olarak modelleme ile kolay ve düzgün meshleme amaçlanmıştır.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken dört yüzlü (Quadrilaterals) elemanlar kullanılmıştır. Şekil 4.4.'te ANSYS Workbench programında modellenen örnek çalışma gösterilmektedir. Şekil 4.5.'te ise örnek çalışma birleşim modelinin sonlu elemanlar ağı modellenmesi gösterilmiştir. Sonlu eleman ağları oluştururken delik çevrelerindeki gerilmeler gibi gerilme dağılımlarının önemli olduğu yerlerde boyut olarak daha küçük elemanlara bölme işlemi ile meshleme işlemi yapılmıştır. Örnek birleşim için yapılan meshleme işleminde oluşan eleman ve düğüm noktası sayıları Çizelge 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Birleşimin geometrik şekli



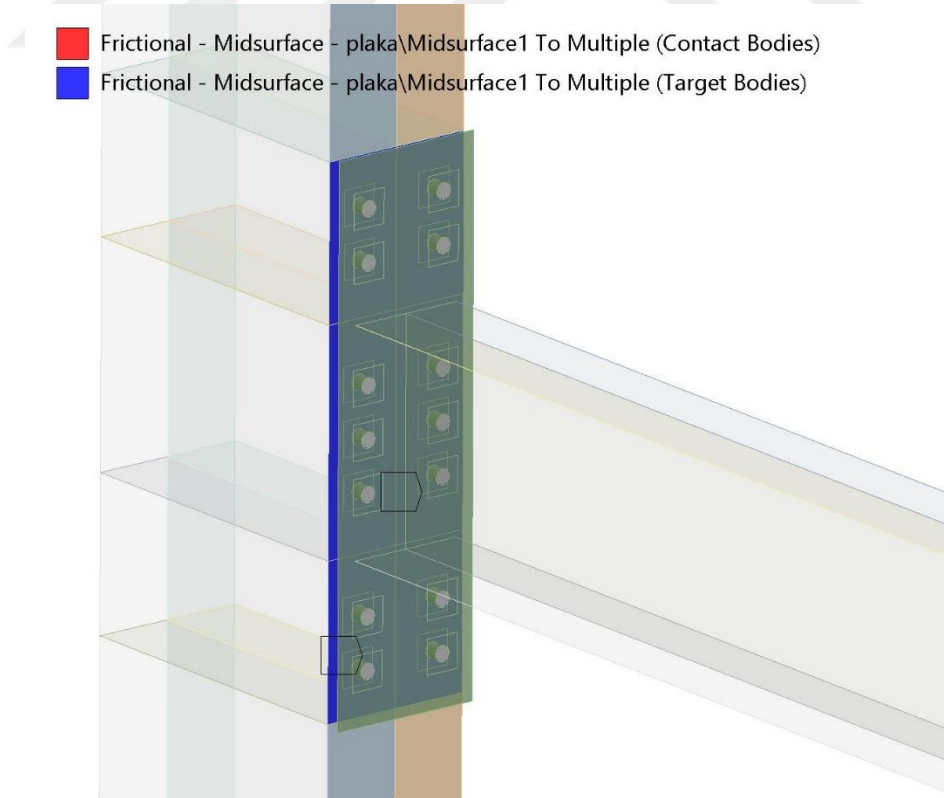
Şekil 4.5. Örnek birleşim sonlu elemanlar ağ modeli

Çizelge 4.2. Örnek birleşimdeki düğüm noktası ve eleman sayıları.

	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
Örnek Birleşim	41022	40309

4.1.3. Birleşimdeki Temas Durumları

Örnek birleşim modelindeki kolon – kiriş birleşimi; kolon, kiriş, alın levhası, bulonlar ve berkitme elemanlarından meydana gelmektedir. Bu parçaların birbirleriyle arasındaki etkileşimini sonlu elemanlar analiz modellemesi esnasında dikkate alınması gerekmektedir. Kolon başlığı ile alın levhası arasında sürtünmeli temas (Frictional Contact) durumu dikkate alınmıştır. Burada kullanılan sürtünme katsayısı 0,44 olarak alınmıştır. Kiriş uç kısmı ile alın levhası kaynak birleşimini tam bağlı olarak (Bonded) temas özelliği kullanmak yerine modellemede Share Topology özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Berkitme elemanları ile kolon ve kiriş arasındaki kaynaklı birleşimleri tam bağlı (Bonded) temas durumu yerine Share Topology özelliği kullanılarak tanımlama yapılmıştır. Bulonlar ilgili bir detay çalışma yapılmadığından ve delik çevresi gerilmelere bakılacağından dolayı bulon elemanları ile aynı işlevi görecektir parçalar arasındaki bağlantı elemanı olan beam elemanları kullanılmıştır. Bu elemanlar tanımlanırken davranışları deforme olabilir şekilde tanımlanmıştır. Birleşimlerde uygulanan temas durumuna örnek Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Örnek birleşim üzerinde temas durumunun açıklanması

4.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Deneyde kullanılan profillerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kiriş ve kolon elemanlarının başlık ve gövde kısımlarından yeterli miktarda kesitler alınarak Selçuk Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarında çekme deneyine tabi tutulmuş. Deney sonucunda elde edilen çelik profillerin malzeme özellikleri Çizelge 4.3.'de verilmiştir. (Hatipoğlu, 2011).

Deney numunesinde kullanılan bulonların malzemesi 8.8 kalite olarak dikkate alınmıştır. Akma gerilmesi 640 MPa (N/mm²), kopma gerilmesi 800 MPa (N/mm²) ve elastisite modülü 200000 MPa (N/mm²) olarak dikkate alınmıştır. Sonlu elemanlar modelinde malzeme kaliteleri literatürdeki deneyde kullanılan profil ve bulonların mekanik özellikleri ile aynı değerler dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.3. Deneyde kullanılan IPE profillerinin mekanik özellikleri. (Hatipoğlu, 2011).

Parametreler / Profiller		Numune
Akma Gerilmesi (σ_y)	(N/mm ²)	302
Kopma Gerilmesi (σ_u)	(N/mm ²)	448
Akma Birim Uzaması (ϵ_y)(%)		24
Kopma Birim Uzaması (ϵ_u)(%)		34
Elastisite Modülü (E)	(N/mm ²)	203000

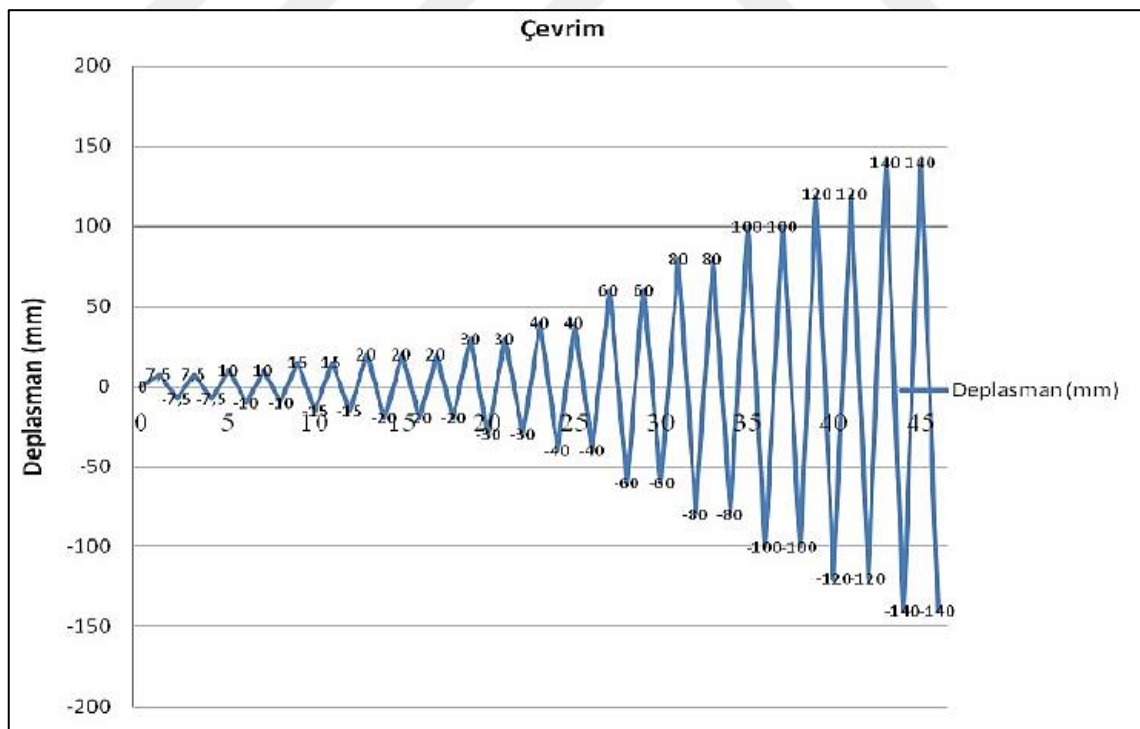
4.1.5. Sınır Şartlarının ve Yüklerin Uygulanması

Literatürdeki deneysel çalışmada 3 metre uzunluğunda olan kolon M60 bulonlar ile rijit yükleme duvarına sabitlenmiştir. Burada uygulanan işlem, sistemin herhangi bir yönde ötelenme ve dönme hareketlerini yapmasını kısıtlamaktır. Sisteme 2 metre uzunluğundaki kiriş uç noktasına yükleme uygulanmıştır. Bu yükleme programı FEMA-351 'de verilen çevrimsel yükleme şekli dikkate alınarak yapılmıştır. Birleşim sistemine ilk olarak (1-1) çevriminde basınç yönünde 7,5 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır, daha sonra sistemdeki yük boşaltılmıştır. Sonraki yükleme -(1-1) çevrimi ile geri yüklemeye maruz bırakılmış yani çekme yönünde 7,5 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır. Bir sonraki adımda ikinci çevrim ile sisteme ileri yüklemeye basınç yönünde ve geri yüklemeye çekme yönünde 10 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır. Bu çevrimsel yükleme programı işlemleri birleşim sisteminin göçme moduna ulaşıncaya kadar devam

edilmiştir. Çevrimsel yükleme programı Çizelge 4.4.'de verilmiştir. Şekil 4.7.'de ise çizelge göz önüne alınarak hazırlanmış çevrim – deplasman grafiği verilmiştir. (Hatipoğlu, 2011).

Çizelge 4.4. Deneyde kullanılan deplasman çevrim değerleri. (Hatipoğlu, 2011).

Yükleme Adımı	Toplam Dönme ϕ (Radyan)	Periyot Tekrarı, n_j	Deformasyon Miktarı (mm)
1	0,00375	2	7,5
2	0,005	2	10
3	0,0075	2	15
4	0,01	4	20
5	0,015	2	30
6	0,02	2	40
7	0,03	2	60
8	0,04	2	80
9	0,05	2	100
10	0,06	2	120



Şekil 4.7. Deneyde kullanılan deplasman yükleme grafiği. (Hatipoğlu, 2011).

4.1.6. Sonlu Elemanlar Analiz Ayarları

Literatürdeki deneysel çalışmada dikkate alınan kolon – kiriş birleşim modelinin analizi; doğrusal olmayan büyük geometri değişimleri, doğrusal olmayan malzeme özellikleri ve doğrusal olmayan eleman temas durumları dikkate alınarak sonlu elemanlar modelinin analiz ayarı yapılmıştır. Deneysel çalışmada yüklerin yüklenme adımları ile ilgili yeterince detaylı bilgiye sahip olunmadığından dolayı, sonlu eleman modelinde yükleme adımları program kontrolünde bırakılarak analiz yapılmıştır. Programa girilen çevrimsel yükleme deplasmanı yakınsama elde edinceye kadar uygulanan yüklemeyi gerekli gördüğü adım sayısına bölerek yükleme yapmaktadır.

4.2. Sonuçların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde yapılan deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının sonuçlarını karşılaştırıp birbirine yakın ve benzer sonuçlar elde edildiği incelenecektir. Deneyde yük geçmişi, yük – deplasman grafiği, moment – toplam dönme grafiği, dayanım zarfı grafiği ve rijitlik azalım grafikleri çizdirilmiştir. Deneysel ve sonlu elemanlar analiz grafik sonuçlarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 4.8.’den Şekil 4.12.’ye kadar gösterilmiştir.

Yük geçmişi grafiği, deney sırasında her bir çevrim için ileri ve geri olarak yapılan yüklemelerde elde edilmiş olan yük değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, çevrim ve yük ilişkisi grafiksel olarak yük geçmişi grafikleri çizdirilmiştir.

Yük – Deplasman grafiği, çevrimsel yükleme sırasında yük hücrelerinden okunan yük değerleri (P) ile kiriş ucundaki oluşan yer değiştirme ölçümlerinden (Δ) faydalanılmıştır.

Moment – Toplam dönme grafiği, Moment ($M=P \times L$) ve Toplam Dönme ($\phi=\Delta/L$) hesaplanarak grafikler çizdirilmiştir.

Dayanım zarfı grafikleri, her çevrim sırasında okunan en büyük yatay deplasman değerleri ile bu deplasmanlara karşı gelen en büyük yük değerleri elde edilmesiyle çizdirilmiştir.

Rijitlik azalım grafiği, tersinir – tekrarlanır yükleme altında, birleşim elemanlarının rijitliklerinde her çevrimde bir azalma olmaktadır. Birleşim elemanları numunelerinin rijitlik değerleri, her bir çevrim için Yük – Deplasman grafiğinin eğimi bulunarak elde edilmiştir. Her bir çevrimdeki, Yük – Deplasman eğrisinde okunan yük

değerleri F_1 ve F_2 , deplasman değerleri ise Δ_1 ve Δ_2 'dir. Çevrim için rijitlik değeri aşağıdaki denklem (4.1) ile elde edilmiştir.

$$\text{Rijitlik } (\phi) = (|F_1| + |F_2|) / (|\Delta_1| + |\Delta_2|) \quad (4.1)$$

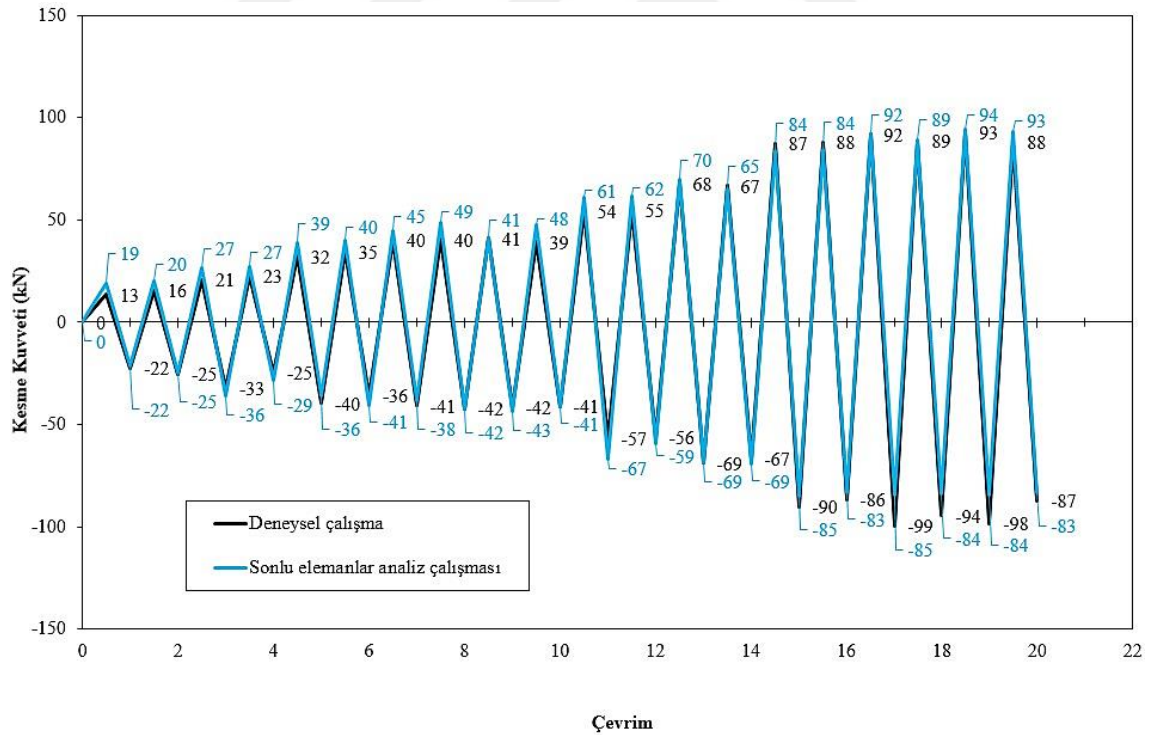
Bulunan rijitlik değişim değerlerinin, Deplasman/Açıklık (Δ/L) oranı ile grafiksel olarak çizdirilmesiyle rijitlik azalım grafiği elde edilmiştir. Rijitlik azalım grafiği, iyi bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla; çevrim sayısına yerine, (Δ/L) oranına bağlı olarak grafik çizdirilmiştir.

Deney başlangıcında 1-1 çevrimi ile basınç doğrultusunda sisteme 7,07 mm'lik deplasman uygulanmış ve karşılığında 13,48 kN yük elde edilmiştir. Daha sonra yük kaldırılmış ve 2,31 mm'lik kalıcı deplasman olduğu görülmüştür. -(1-1) çevriminde çekme yönünde sisteme 7,06 mm deplasman uygulanmış ve karşılığında 22,23 kN yük elde edilmiştir. Yük kaldırılmış ve 1,49 mm kalıcı deplasman ölçülmüştür. Bu işlem yükleme programınca aynı şekilde devam etmiştir. 7-1 yükleme çevrimine kadar sistemde herhangi bir yapısal bozukluk görülmemiş. 7-1 yükleme çevriminde sisteme basınç doğrultusunda 60,04 mm deplasman uygulanmış ve buna karşılık 87,34 kN yük değeri ölçülmüş. Yük kaldırıldığında 24,72 mm'lik kalıcı deplasman olduğu görülmüştür. 7-1 yükleme çevriminde kiriş alt başlığında akma meydana geldiği görülmüştür. -(7-1) çevrim yüklenmiş, 61,37 mm deplasmana ulaşılmış ve 90,05 kN değerinde yük değeri okunmuştur. Yük kaldırıldığında 17,55 mm kalıcı deplasman meydana gelmiştir. 8-1 çevriminde 80,25 mm deplasman uygulanmış ve 91,85 kN yük elde edilmiş, sistemde 47,98 mm kalıcı deplasman olduğu gözlenmiştir. Bu çevrimin sonunda kiriş alt başlığının kaynaktan ayrılmaya başladığı gözlenmiştir. -(8-1) çevriminde 81,61 mm deplasman uygulandığında, 99,40 kN yük ölçülmüş ve sistemde 35,72 mm kalıcı deplasman meydana gelmiştir. 8-2 ve -(8-2) çevrimlerinde elde edilen yükler sırasıyla 88,55 kN ve 94,49 kN olarak okunmuştur. 9-1 ve -(9-1) çevrimlerinde elde edilen yükler sırasıyla 92,57 kN ve 98,19 kN olarak okunmuştur. 9-2 ve -(9-2) çevrimlerinde elde edilen yükler sırasıyla 88 kN ve 87,06 kN olarak okunmuştur. (Hatipoğlu, 2011).

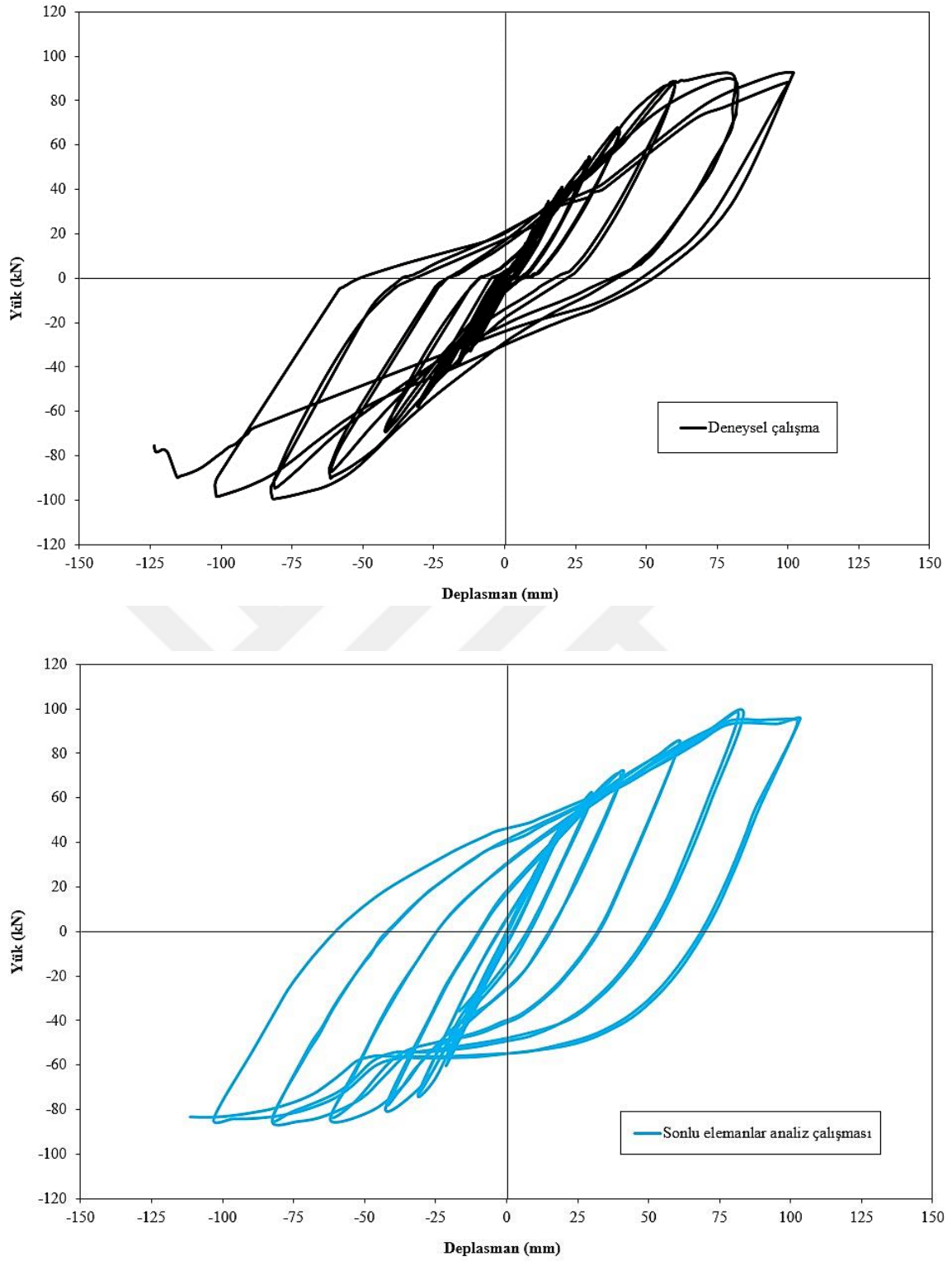
Deneyde bahsedilen çevrimsel yükleme sırasında elde edilen yük kuvvetlerinin sonlu elemanlar analizi ile elde edilen yüklerin karşılaştırılması Çizelge 4.5.'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Deplasman değerine karşılık elde edilen yüklerin karşılaştırılması.

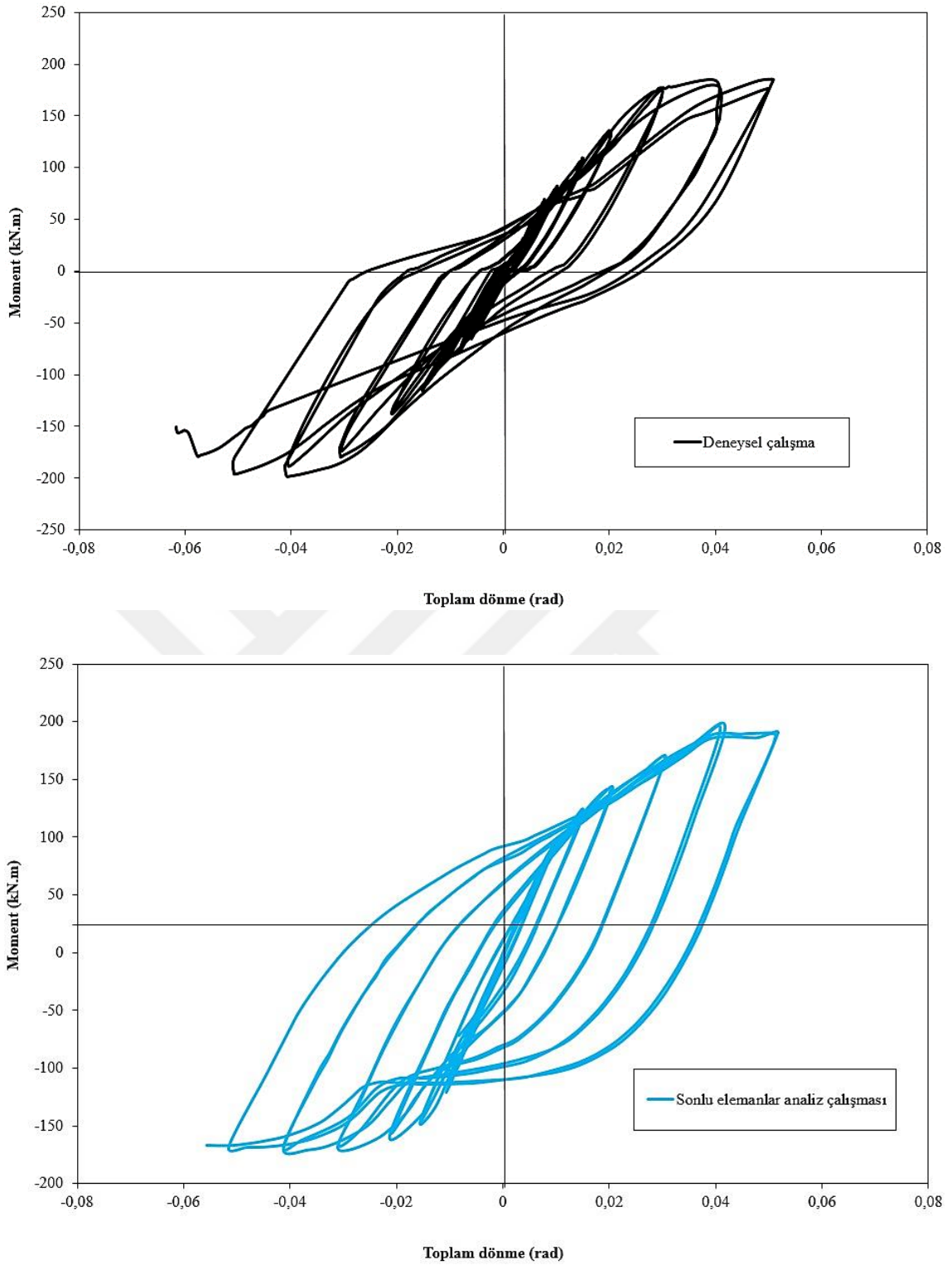
Deneysel Çalışma (D)		Sonlu Elemanlar (S)		(S)/(D)
Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	
7,07	13,48	7,07	18,80	1,39
-7,06	-22,23	-7,06	-21,50	0,97
60,04	87,34	60,04	83,72	0,96
-61,37	-90,05	-61,37	-84,75	0,94
80,25	91,85	80,25	92,25	1,00
-81,61	-99,40	-81,61	-84,57	0,85
81,71	88,55	81,71	88,93	1,00
-81,12	-94,49	-81,12	-83,88	0,89
101,20	92,57	101,20	94,49	1,02
-101,63	-98,19	-101,63	-84,14	0,86
99,77	88,00	99,77	93,00	1,05
109,71	-87,06	109,71	-83,26	0,96



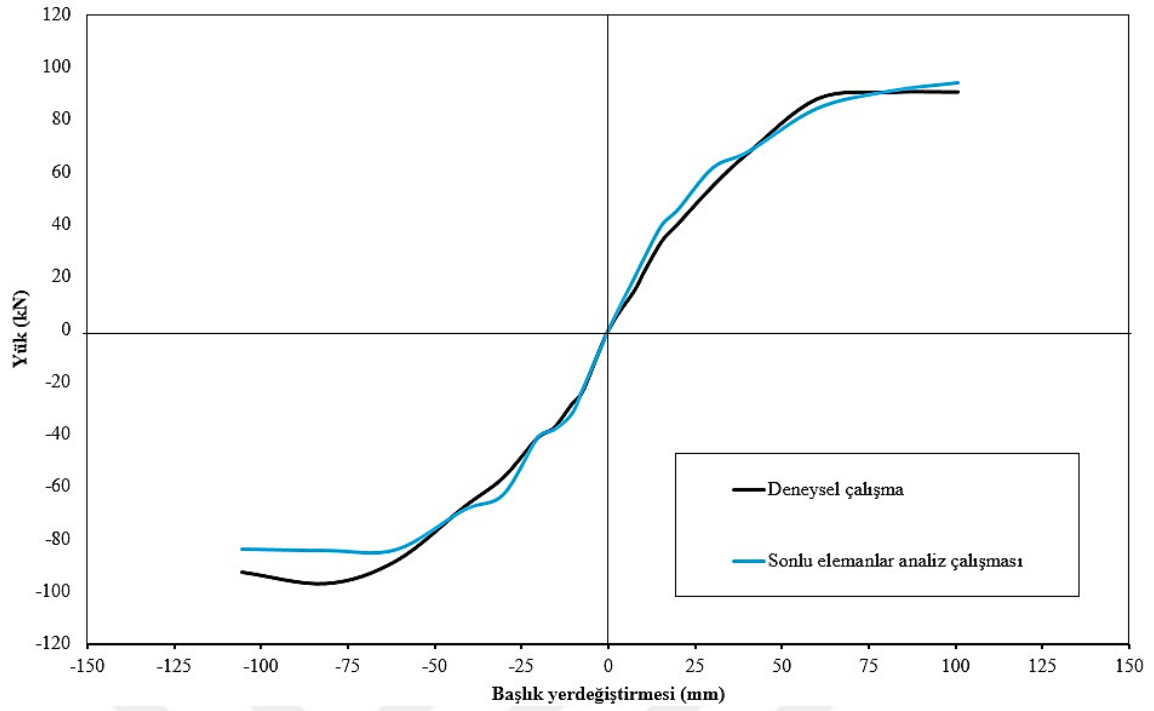
Şekil 4.8. Literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının yük geçmişi ilişkisinin karşılaştırılması.



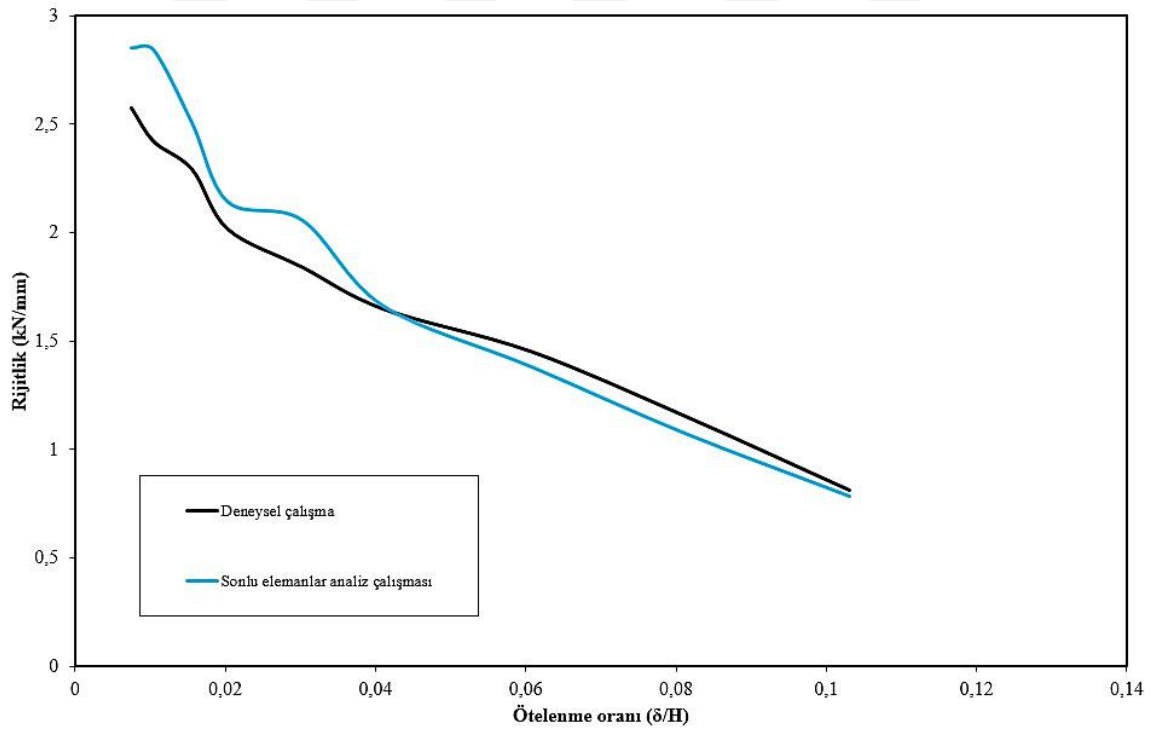
Şekil 4.9. Literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının yük-deplasman ilişkisinin karşılaştırılması.



Şekil 4.10. Literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının moment-toplam dönme ilişkisinin karşılaştırılması.



Şekil 4.11. Literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının dayanım zarfı ilişkisinin karşılaştırılması.



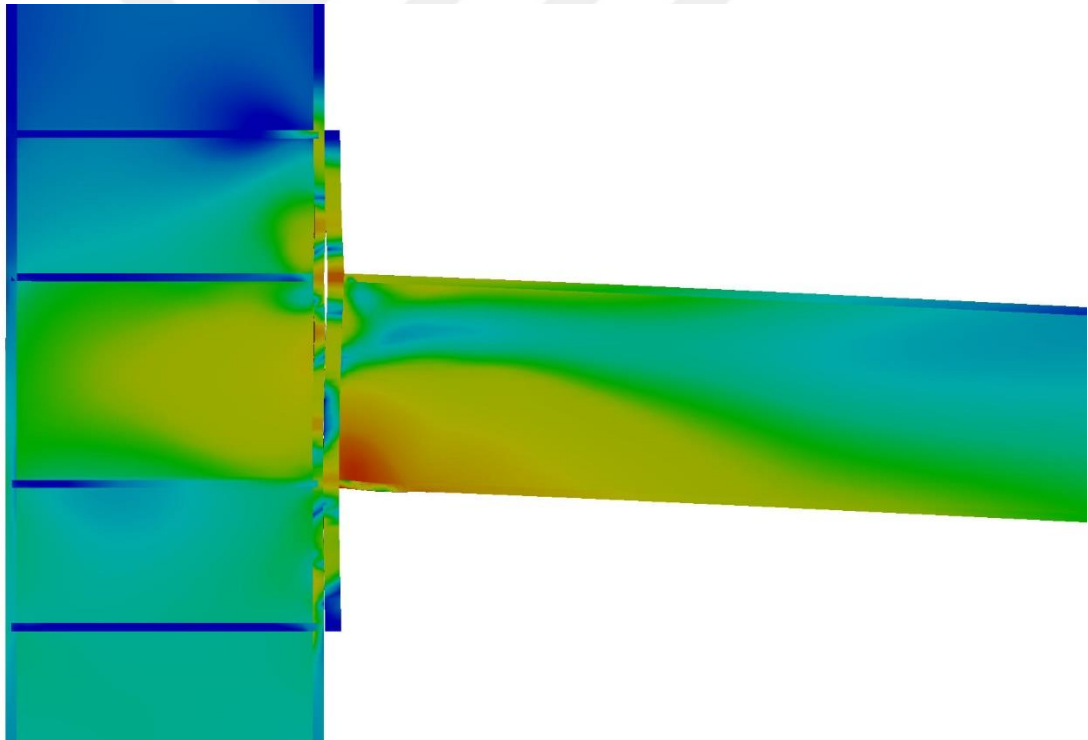
Şekil 4.12. Literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar analiz çalışmasının rijitlik azalım ilişkisinin karşılaştırılması.

Deneysel çalışmadaki ve sonlu elemanlar analiz çalışmasındaki sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu ve küçük farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu örnek çalışmadaki birleşimin literatürden alınan deneysel çalışmadaki ve sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen göçme modu Şekil 4.13.'de görülmektedir. Bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşimi, 7-1 çevrimi sonucunda kirişin alt başlığında akma meydana geldiği gözlenmiş ve analize devam edilmiştir. 8-1 çevrimi sonucunda kirişin alt başlık kaynağında ayırma meydana gelmiş ve analize devam edilmiştir. 8-2 çevrimi sonucunda kirişin alt başlık kısmında yanal burkulma ve gövde kısmında ise düğüm noktasına yakın yerde buruşma oluşmuştur. 9-1 çevriminde kiriş gövde alt kısmında yırtılma meydana gelmiştir. 9-2 çevriminde ise kiriş üst başlık kısmındaki kaynaktan ayrılmaya başlamış ve deneye son verilmiştir. Bu birleşim 8-1 çevrimi sonucunda en büyük yük değerine ulaşmış ve kiriş alt başlık kaynağında ayrılma meydana gelmesi sonucunda yük taşıyamaz duruma gelmiştir. Bu çevrim sonucunun karşılaştırılması Şekil 4.14.'de verilmiştir.

Bu çalışmada literatürden alınan deneysel çalışmadaki sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşim örneğinin, kesme kuvveti kapasiteleri, yük – deplasman, moment – toplam dönme, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve göçme modu karşılaştırmaları çok az farklılıklar olsa bile birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Karşılaşılan farklılıkların nedeninin, uygulamadaki kaynak işçiliğinden kaynaklanabilecek kusurlar, bulonlara uygulanan öngerilme kuvvetlerinin farklılıklarından oluşabilecek kusurlar, birleşim düzeneğinde kullanılan potansiyometrik cetveller ve hidrolik krikonun kalibrasyon sorunları, sonlu elemanlar metodunun mesh yoğunluğu, uygulanan sonlu eleman mesh tipi ve birleşim parçaları arasındaki temas durumunun tipi gibi nedenlerden dolayı olabileceği düşünülmektedir.



a) Deneysel çalışma (Hatipoğlu, 2011).

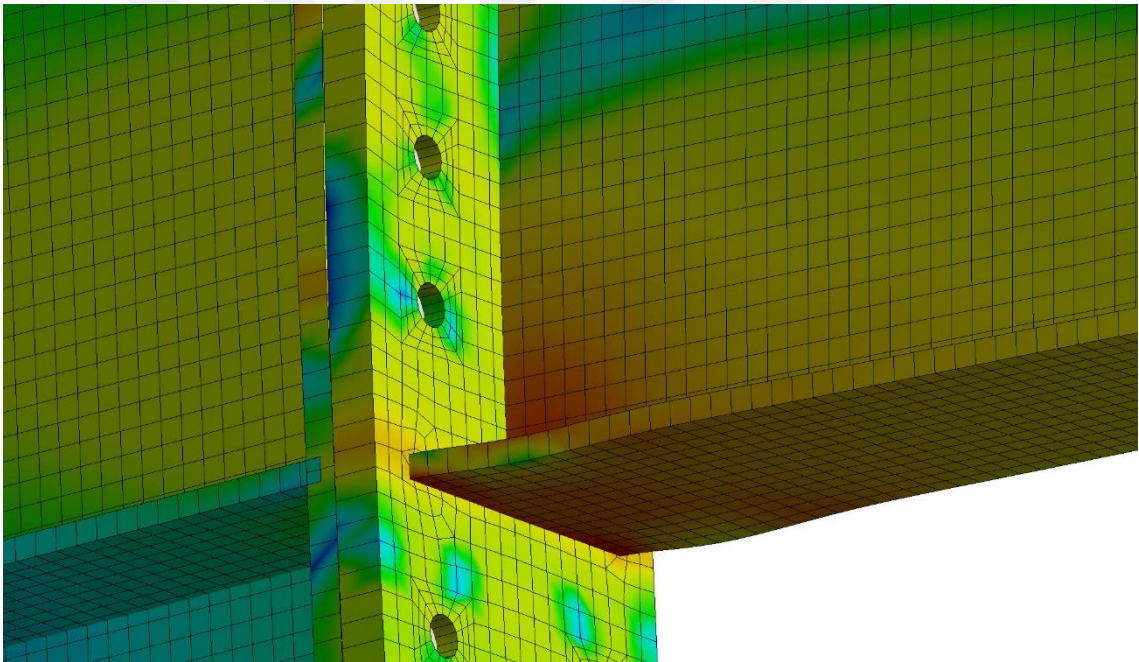


b) Sonlu elemanlar analizi.

Şekil 4.13. Bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşiminin göçme modu bakımından karşılaştırılması.



a) Deneysel çalışma (Hatipoğlu, 2011).



b) Sonlu elemanlar analizi.

Şekil 4.14. Bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşiminin kaynak ayrılması ve giriş gövde yırtılması durumunun karşılaştırılması.

5. FARKLI TÜRDEKİ ÇELİK BAĞLANTILARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu tez çalışmasında uygulamalarda sıklıkla tercih edilen moment aktaran ve yarı – rijit farklı tipte çelik kolon – kiriş birleşimlerinin sonlu elemanlar modellemelerinin analizleri yapılmaktadır. Bu birleşimlerin kesme kuvveti kapasiteleri, yük – deplasman, moment – toplam dönme, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve göçme modu sonuçlarının karşılaştırılması yapıp tip birleşimler kendi içerisinde kıyaslanıp değerlendirilecektir.

5.1. Birleşimin Sonlu Elemanlar Analiz Modelinin Oluşturulması

5.1.1. Birleşimlerin Geometrik Detayı

Sonlu elemanlar analizleri incelenecek olan birleşimler aynı malzeme özelliklerine, aynı kesitlere ve tip boyutlarda modellenerek analizleri yapılmaktadır. Modellemelerde moment aktaran birleşimlerde kolonlar 3 m uzunluğunda IPE400 profil, kiriş ise 2 m uzunluğunda IPE270 profil kullanılmaktadır. Konsol olarak bağlanan kiriş elamanı üzerindeki yükleme noktasının kolon yüzeyine olan uzaklığı 2 m olarak alınmıştır. Yarı – rijit birleşimlerde kolon / kiriş destek elemanları 2,5 m uzunluğunda HEA280 profil, kiriş elemanları ise 1,2 m uzunluğunda IPE270 profil kullanılmaktadır. Yükleme yapılan kiriş elamanı üzerinde bulunan yükleme noktasının kolon yüzeyine olan uzaklığı 1,2 m olarak alınmıştır. Moment aktaran birleşimlerindeki sınır şartları ile kolon ve kiriş elemanlarının uzunluk detayları Şekil 5.1.'de gösterilmektedir. Yarı – rijit birleşimlerindeki sınır şartları ile kolon ve kiriş elemanlarının uzunluk detayları ise Şekil 5.2'de gösterilmektedir.

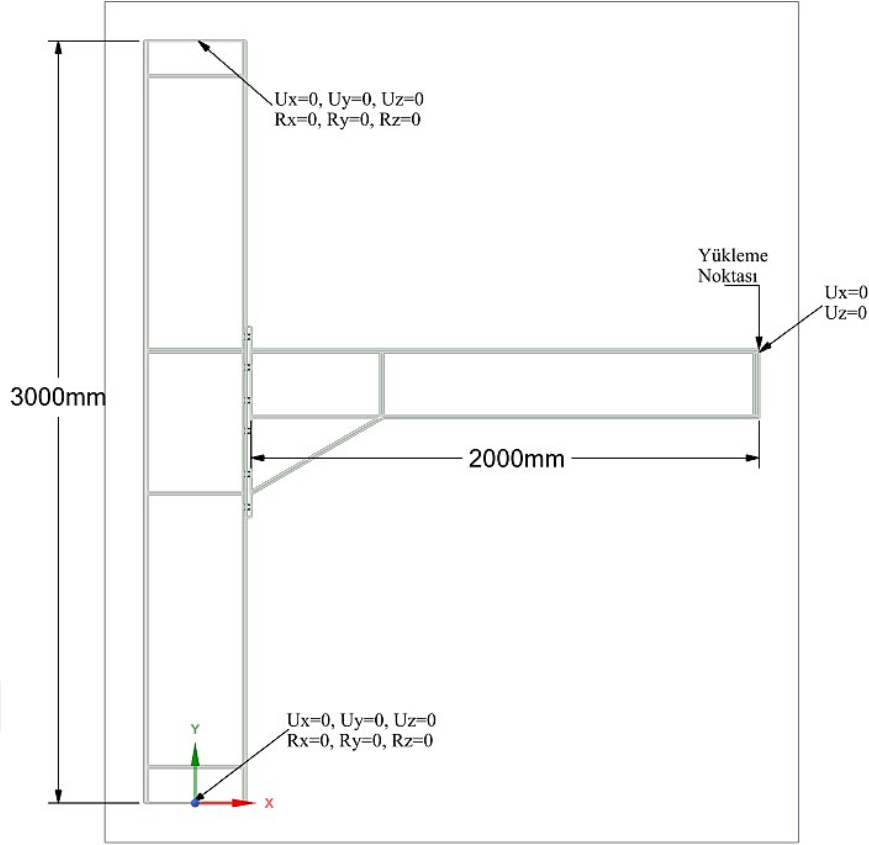
Bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşimi, 20 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlıklarına ve gövdesine kaynak ile bağlanmaktadır. Kirişin kolon başlığına bağlantısı ise 14 adet M18 bulonlarla alın levhasından bağlantısı yapılmaktadır. Birleşim bölgelerinde, kolon uç noktalarında ve yükleme noktalarında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır.

Bulonlu guseli alın levhalı başlık berkitmeli (EMHF) birleşimi, 20 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlıklarına ve gövdesine kaynak ile bağlatısı yapılmaktadır. 10 mm kalınlığındaki guse plakaları kiriş alt başlığına ve alın plakasına kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. Kirişin kolon başlığına bağlantısı ise 12 adet M18

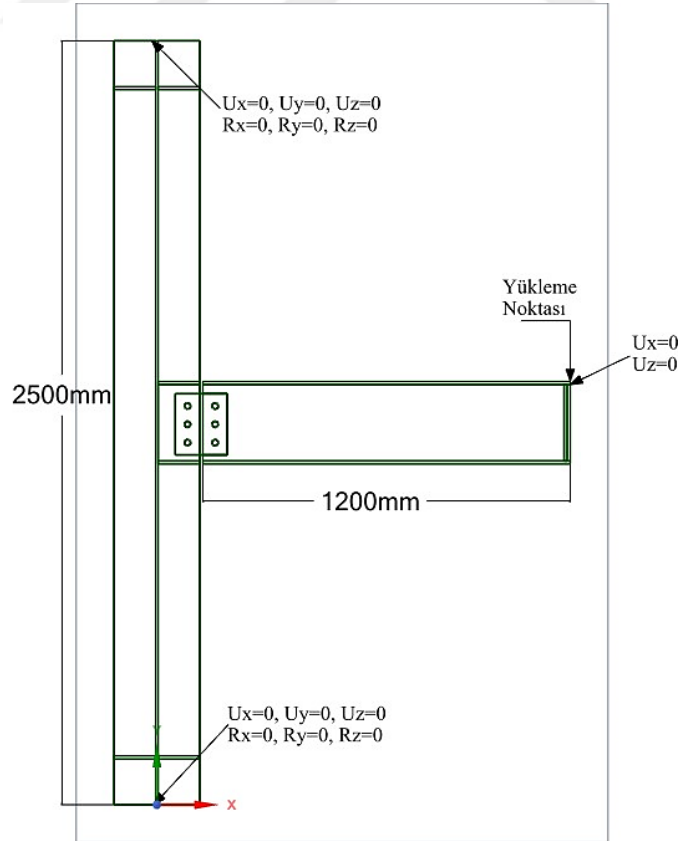
bulonlarla alın levhasından bağlantısı yapılmaktadır. Birleşim bölgelerinde, kolon uç noktalarında, guse hizasında ve yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır.

Bulonlu üstten guseli alın levhali başlık berkitmeli (EMTF) birleşimi, 20 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlıklarına ve gövdesine kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. 10 mm kalınlığındaki guse plakaları kiriş alt başlığına ve alın plakasına kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. Kirişin kolona uç kısmından başlığına bağlantısı ise 10 adet M18 bulonlarla alın levhasından bağlantısı yapılmaktadır. Birleşim bölgelerinde, kolon uç noktalarında ve yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır.

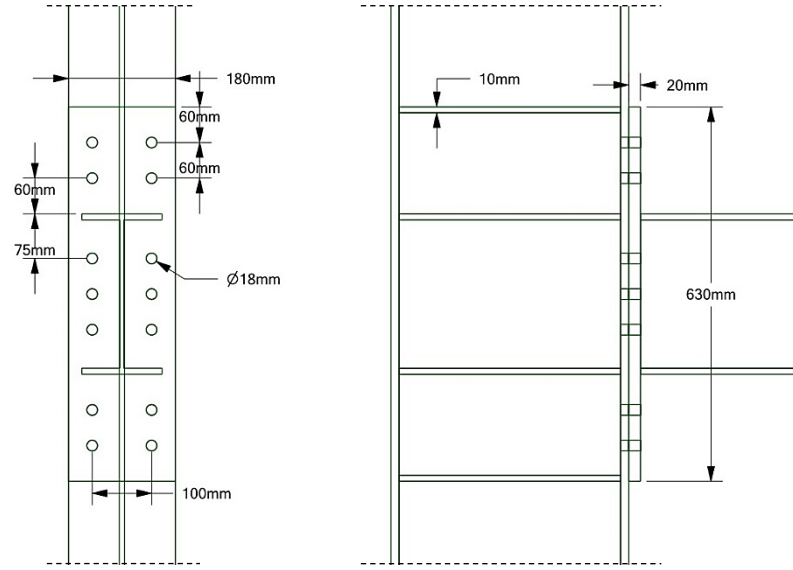
Moment aktaran birleşimlerin detayları Şekil 5.3. – Şekil 5.5’de gösterilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde modelleri basitleştirmek ve bulonlarla ilgili bir detay çalışma yapılmadığından dolayı bulon elemanları ile aynı işlevi görecektir parçalar arasındaki bağlantı elemanı olan beam temas birleşim elemanları kullanılarak meshlemede oluşacak eleman sayısı ve düğüm nokta sayısını minimum seviyede tutularak analiz süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Birleşim detayı modellenirken Shell eleman yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Birleşimde modellenen profiller başlık ve gövde elemanları dikdörtgen Shell eleman olarak modelleyerek kolay ve düzgün meshleme olması amaçlanmıştır.



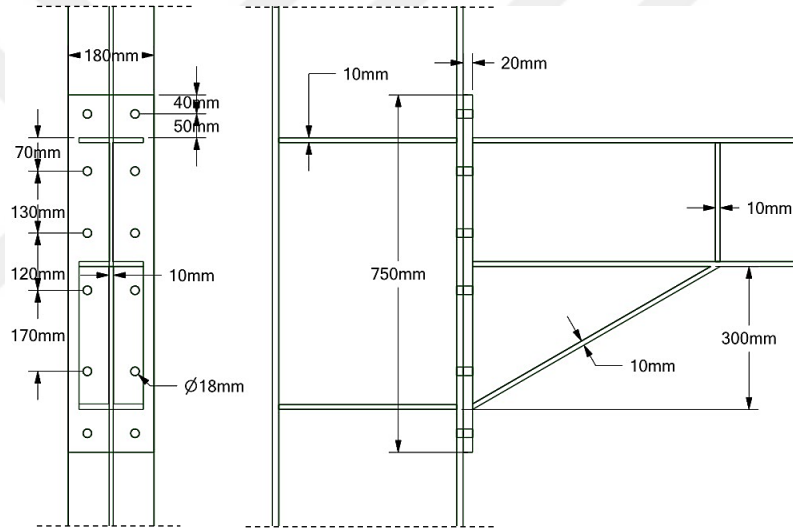
Şekil 5.1. Moment aktaran birleşimlerindeki sınır şartları ve kolon – kiriş uzunluk detayı.



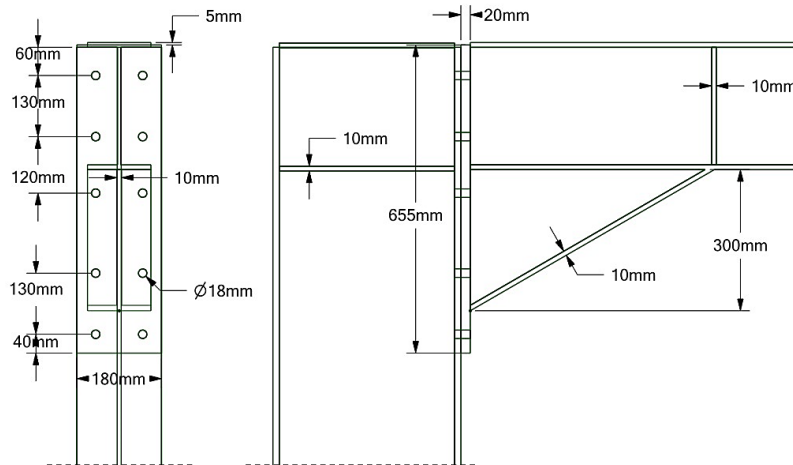
Şekil 5.2. Yarı – rijit birleşimlerindeki sınır şartları ve kolon – kiriş uzunluk detayı.



Şekil 5.3. EMF örneğinin bağlantı detayı.



Şekil 5.4. EMHF örneğinin bağlantı detayı.



Şekil 5.5. EMTF örneğinin bağlantı detayı.

Bulonlu alın levhalı (EP) birleşimi, 10 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlığına ve gövdesine kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. Kiriş kolona, uç kısmından başlığına bağlantısı ise 6 adet M20 bulonlarla alın levhasından bağlantısı yapılmaktadır. Kolon uç noktalarında ve yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır.

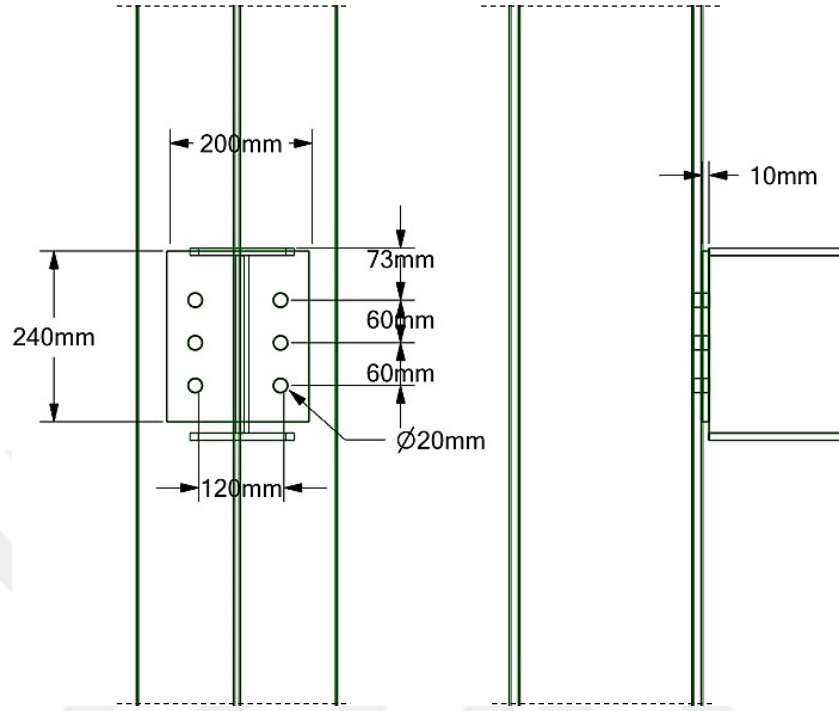
Bulonlu bağlantı levhalı kiriş – kiriş (DS) birleşimi, 10 mm kalınlığında gusset plakası taşıyıcı kirişin başlığına ve gövdesine kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. Desteklenen kiriş, taşıyıcı kirişe kaynaklı olan gusset plakasına 6 adet M20 bulonlarla 2 adet 10 mm kalınlığında kesme plakaları ile kiriş gövdesinden gussete bağlantısı yapılmaktadır. Taşıyıcı kiriş uç noktalarında ve desteklenen kiriş yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır. İki kiriş birleşiminde kirişlerin birbirleri arasındaki boşluk 10 mm alınmaktadır. Kesme plakası ile kiriş gövdesi arasındaki boş kalan kısım 1,7 mm kalınlığında dolgu plakaları ile boşluklar giderilmiştir.

Bulonlu bağlantı levhalı kolon – kiriş (DSD) birleşimi, 10 mm kalınlığında gusset plakası kolon gövdesine ve 10 mm kalınlığındaki berkitme plakalarına bağlantısı kaynak ile yapılmaktadır. Kiriş kolona kaynaklı olan gusset plakasına 6 adet M20 bulonlarla ve 2 adet 10 mm kalınlığında kesme plakaları ile bağlantısı yapılmaktadır. Kolon uç noktalarında ve desteklenen kiriş yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır. Kolon kiriş birleşiminde birbirleri arasındaki boşluk 10 mm alınmaktadır. Kesme plakası ile kiriş gövdesi arasındaki boş kalan kısım 1,7 mm kalınlığında dolgu plakaları ile boşluklar giderilmiştir.

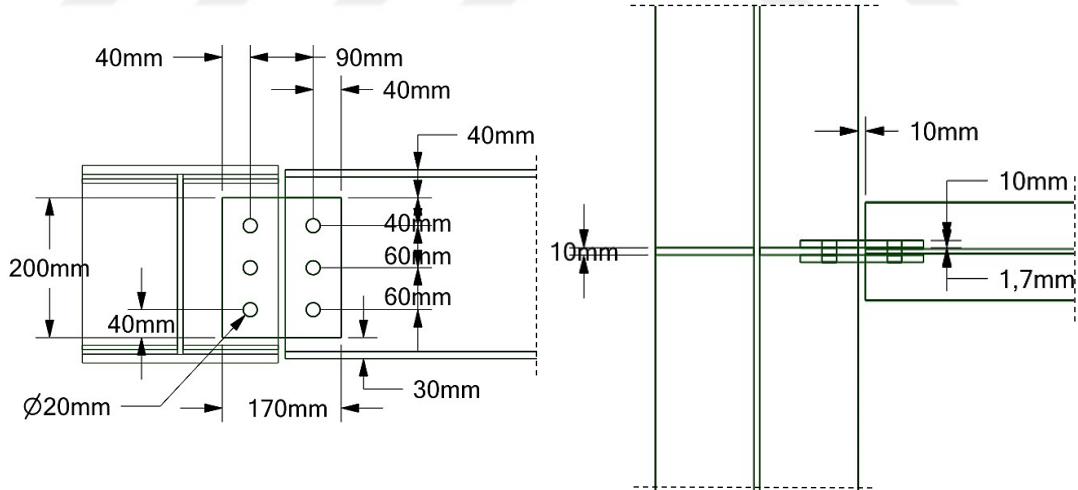
Bulonlu alın levhalı h şekilli gövde berkitmeli (EPW) birleşimi, 15 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlığına ve gövdesine kaynak ile bağlantısı yapılmaktadır. Kolon gövdesine, H şeklinde başlıklar 12 mm gövde 10 mm kalınlığında plakalardan oluşan H şekilli kesme yapım kirişinin ucuna 15 mm kalınlığında alın levhası kaynamaktadır. Kolon gövdesine kaynaklı H şekilli kesme yapım kirişinin alın plakası ile kiriş alın plakası 6 adet M20 bulonlarla bağlantı yapılmaktadır. Kolon uç noktalarında ve yükleme noktasında 10 mm kalınlığında berkitme plakaları kullanılmıştır.

Yarı – rijit birleşimlerin detayları Şekil 5.6. – Şekil 5.9’de gösterilmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde modelleri basitleştirmek ve bulonlarla ilgili bir detay çalışma yapılmadığından dolayı bulon elemanları ile aynı işlevi görecektir parçalar arasındaki bağlantı elemanı olan beam temas birleşim elemanları kullanılarak meshlemede oluşacak eleman sayısı ve düğüm nokta sayısını minimum seviyede tutularak analiz süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Yarı – rijit birleşim detayı modellenirken Shared Topology yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Birleşimde modellenen profiller başlık ve gövde

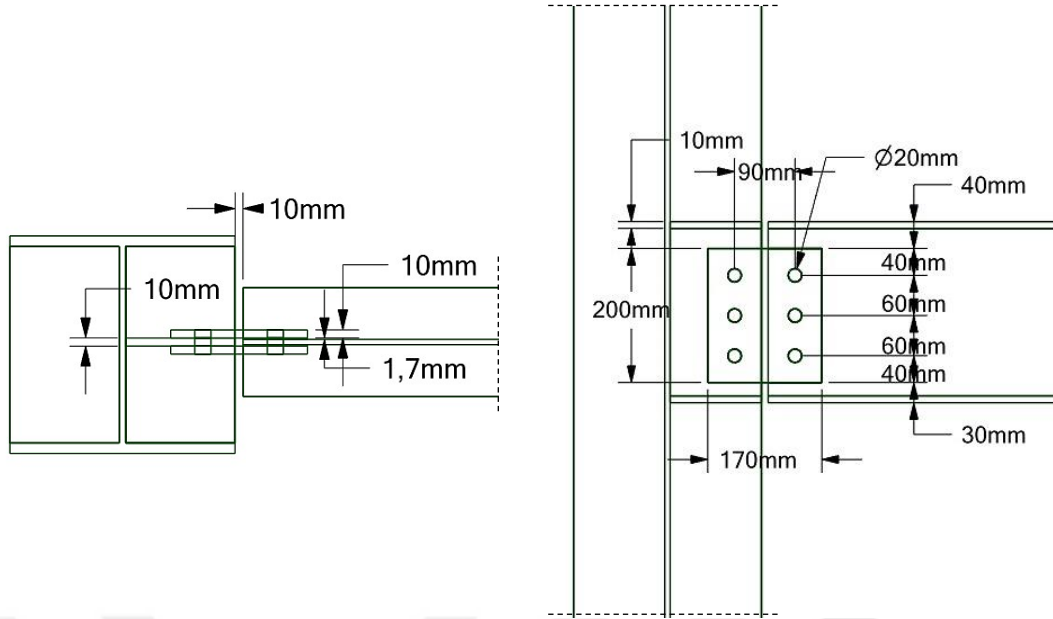
elemanları dikdörtgen Shell elemana çevirerek kolay ve düzgün meshleme olması amaçlanmıştır.



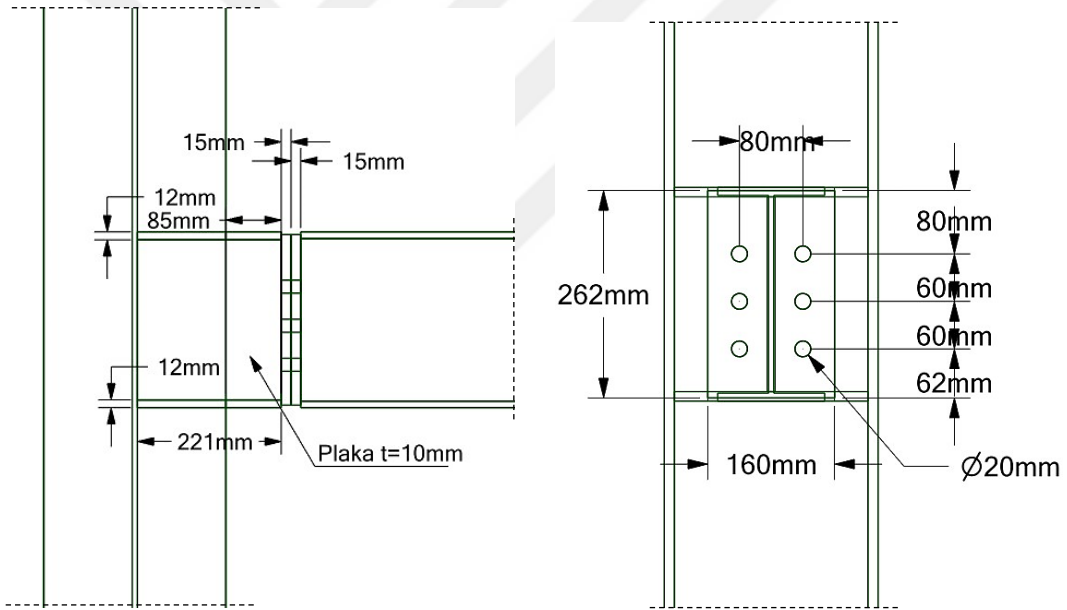
Şekil 5.6. EP örneğinin bağlantı detayı.



Şekil 5.7. DS örneğinin bağlantı detayı.



Şekil 5.8. DSD örneğinin bağlantı detayı.

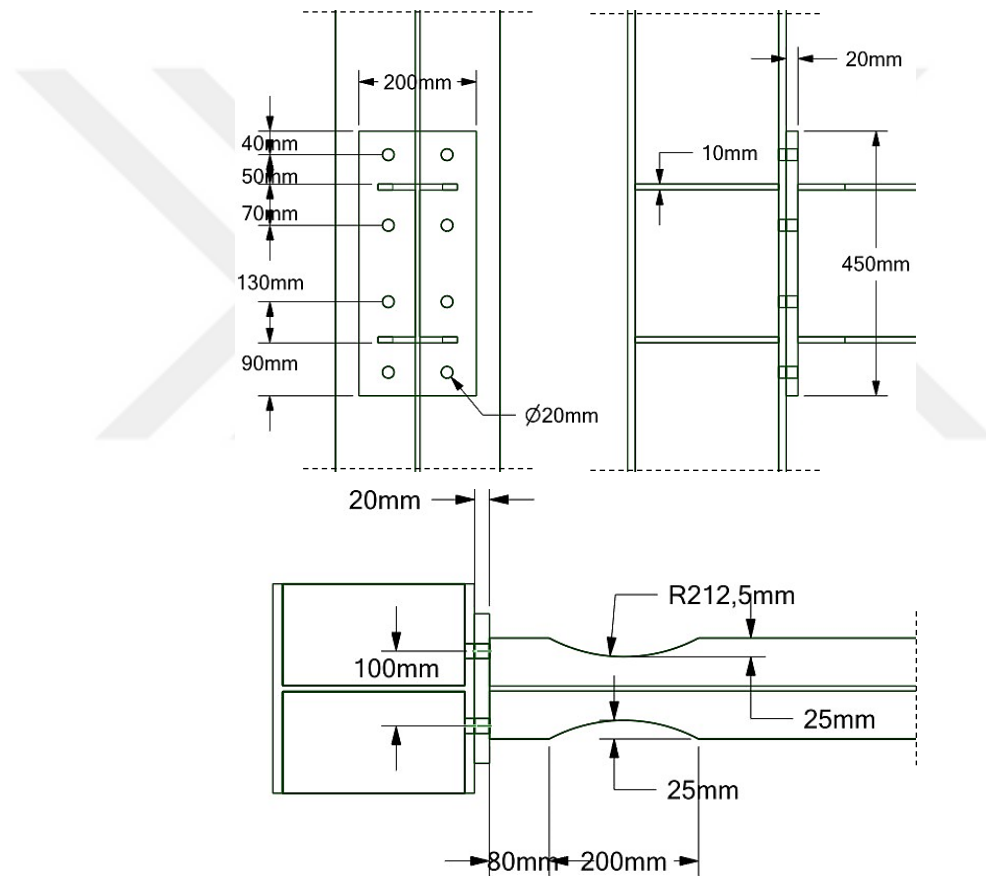


Şekil 5.9. EPW örneğinin bağlantı detayı.

Zayıflatılmış kiriş enkesiti bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (REMF) birleşim, 20 mm kalınlığında alın levhası kiriş başlıklarına ve gövdesine kaynak ile bağlanmaktadır. Kirişin kolon başlığına bağlantısı ise 8 adet M20 bulonlarla alın levhasından bağlantısı yapılmaktadır. Birleşim bölgelerinde, kolon uç noktalarında ve yükleme noktalarında 10 mm kalınlığında berkitme plakları kullanılmıştır. Bu birleşimde kiriş alt ve üst başlığında yaklaşık olarak %40 oranında dairesel biçimde zayıflatma işlemi yapılmış şekilde kiriş elemanı modellenmiştir. Bu tez kapsamında modellemelerde dikkate alınan ve uygulanan tüm sonlu elemanlar modelleme özellikleri bu birleşimde de

olduğu gibi dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Birleşimin detayı Şekil 5.10.'da gösterilmektedir.

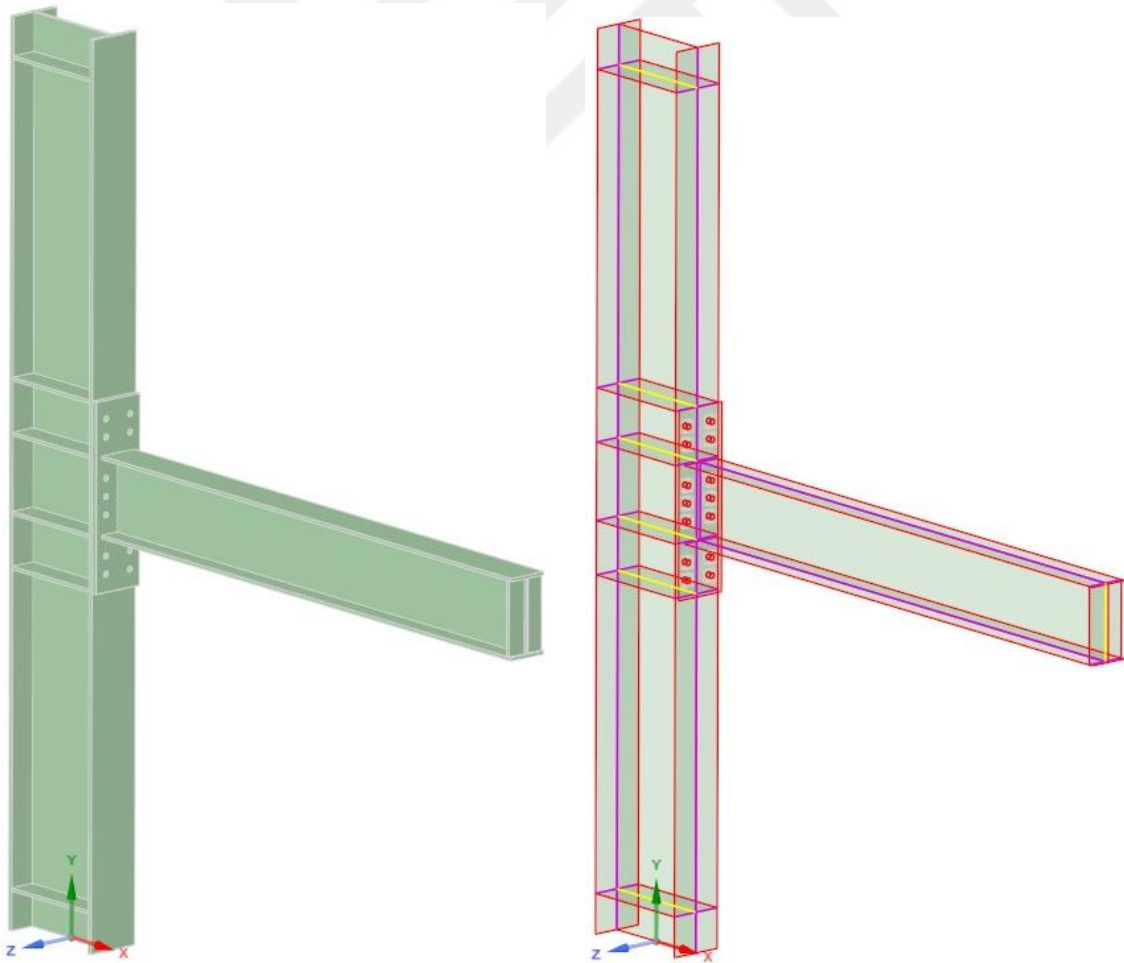
Kiriş başlıklarında yapılan azaltma yönteminin olumsuz sonuçlara neden olacağı düşünülse de, yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar bu düşüncenin tam tersi yönde olduğunu göstermektedir. Kiriş başlığında uygulanan bu azaltma yöntemiyle moment taşıma kapasitesinin azaltılması hedeflenmektedir. Moment taşıma gücü önceden hesaplanmış değerden daha düşük değerde olması, birleşimi sağlayan kaynak üzerinde oluşacak olan gerilmeyi azaltmakta ve 'gcl kolon-zayıf kiriş' ilkesinin sağlanmasında yardımcı olmaktadır. (Hatipoğlu, 2011).



Şekil 5.10. REMF birleşim detayı.

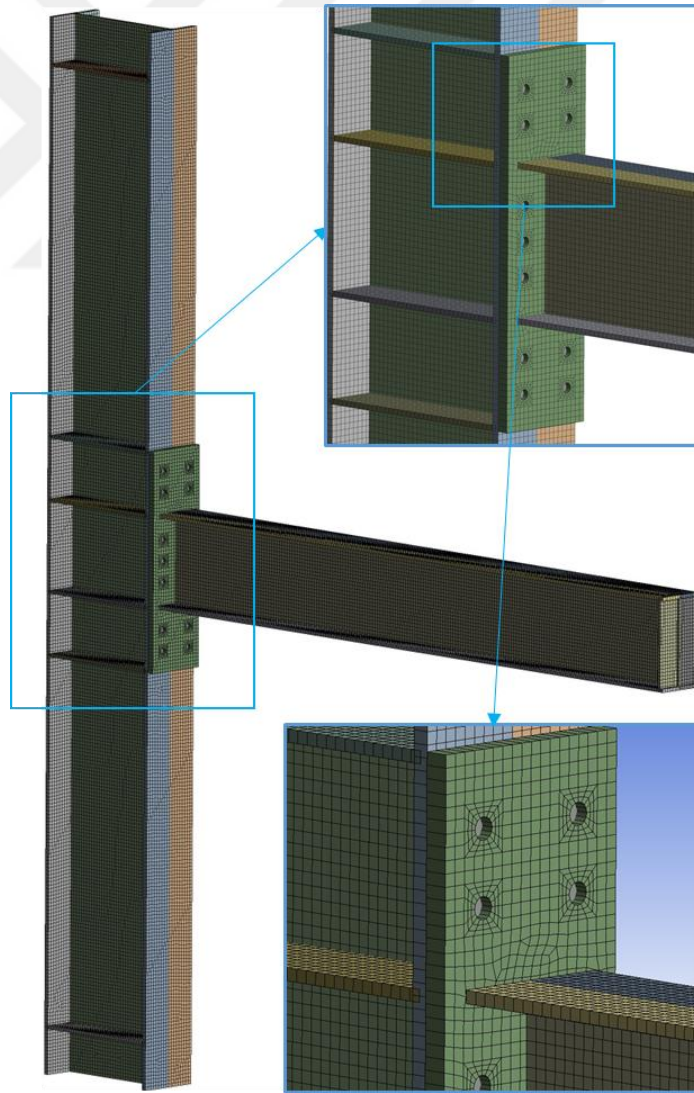
5.1.2. Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Modelleri

Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması bölümünde olduğu gibi bu modellerde de mümkün olduğunca sonlu elemanlar ağı oluşturulurken dört yüzlü (Quadrilaterals) elemanlar kullanılmaktadır. Daha düzgün mesh yapısı ve analiz sürelerinin azaltılması için solid olarak tasarlanan birleşimler, daha sonra Shell elemana çevrilip Shared Topology özelliği kullanılarak elemanların birleştiği yerlerde uyumlu bir ağ geçişi olması sağlanmıştır. Elemanların kesişim yerlerinde düzgün ağ modelleri elde edilerek, gerilme geçişlerinin düzgün ve doğru bir şekilde olması sağlanıp daha doğru sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Deneyde bulonlarla ilgili bir çalışma yapılmadığından dolayı analiz süresini azaltabilmek amacıyla bulonlar modellenmemiştir. Bulon elemanları ile aynı işlevi gören bağlantı elemanı olan beam elemanları kullanılarak delik çevrelerinde oluşan gerilme değerleri ve deformasyon sonuçları elde edilmiştir. Birleşimlere uygulanan tipik Shared Topology özelliği örnek olarak Şekil 5.11’de verilmiştir.

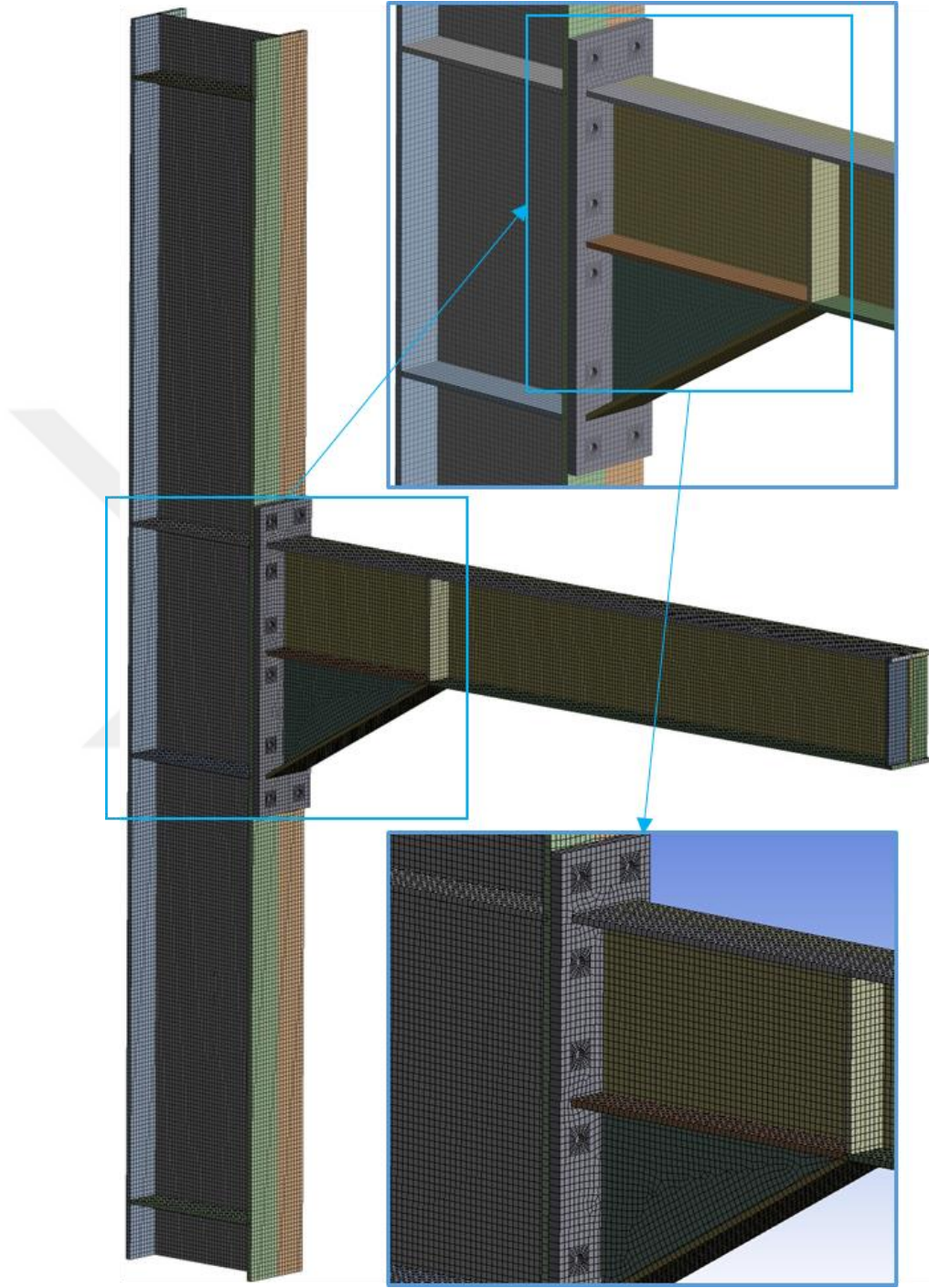


Şekil 5.11. Birleşimlere uygulanan Shared Topology örneği.

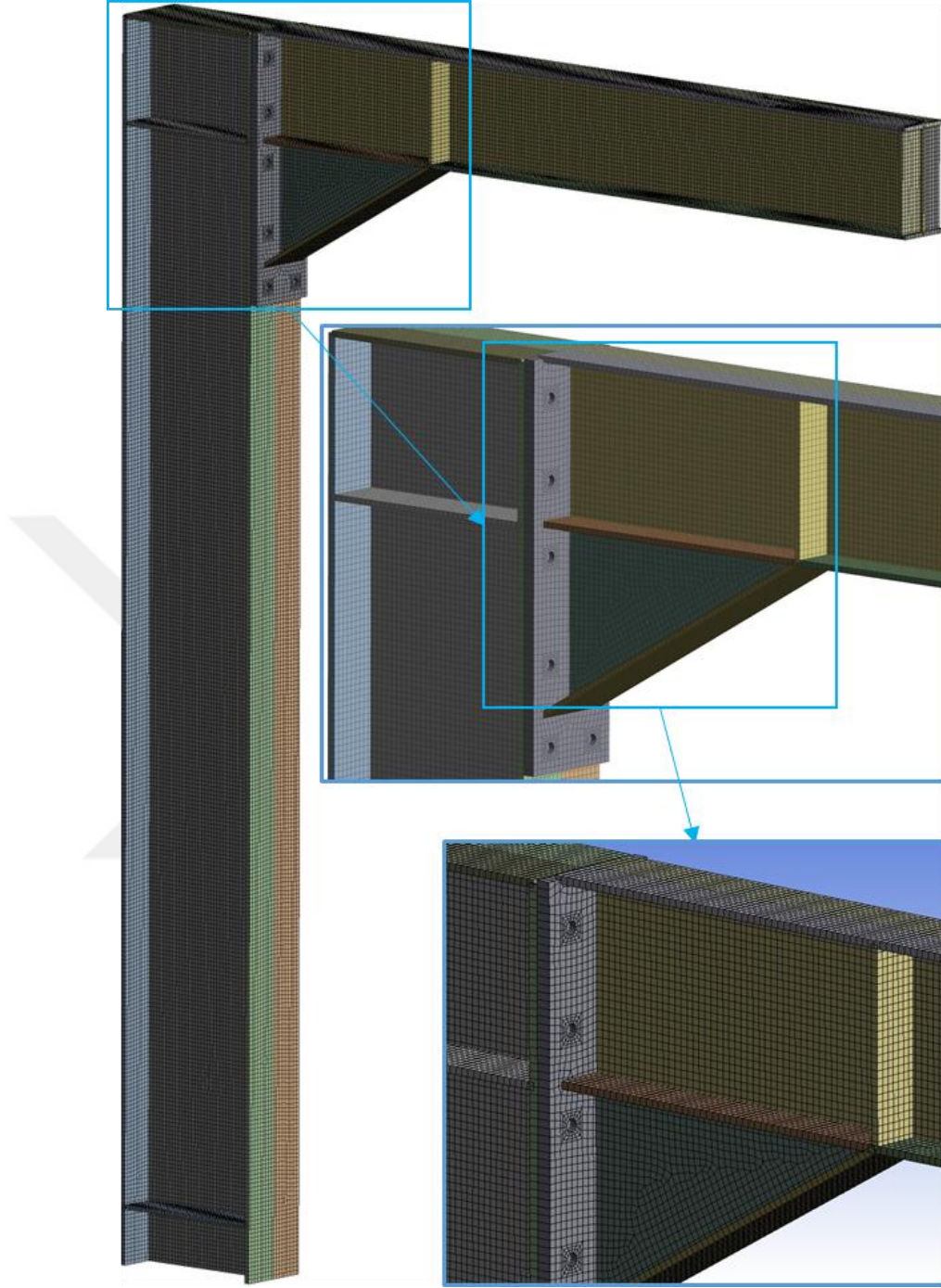
Kullanılan beam elemanları sayesinde meshlemede oluşan eleman ve düğüm nokta sayısı minimum seviyede tutularak analiz süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Sonlu eleman ağları oluştururken delik çevreleri gibi gerilme dağılımlarının önemli olduğu yerlerde daha hassas sonuçlar elde edebilmek için daha küçük elemanlara bölme işlemi ile meshleme yapılmıştır. Mesh yoğunluğunu arttırarak daha hassas sonuçlar elde edilmesine rağmen analiz süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Uygun mesh yoğunluğu için analizler yapıp elde edilen sonuçlara göre uygun olan mesh yoğunluğu belirlenmiştir. Belirlenen mesh yoğunluğu tüm modellemelerde kullanılmıştır. Kaliteli mesh elde edebilmek için bölgesel meshler kullanılmıştır. Moment aktaran birleşimlerin sonlu elemanlar ağ modelleri Şekil 5.12. – Şekil 5.14.’de gösterilmiştir. Çizelge 5.1.’de moment aktaran birleşimlerinde yapılan meshleme sonucu oluşan düğüm noktası ve eleman sayıları verilmektedir.



Şekil 5.12. EMF birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli



Şekil 5.13. EMHF birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli

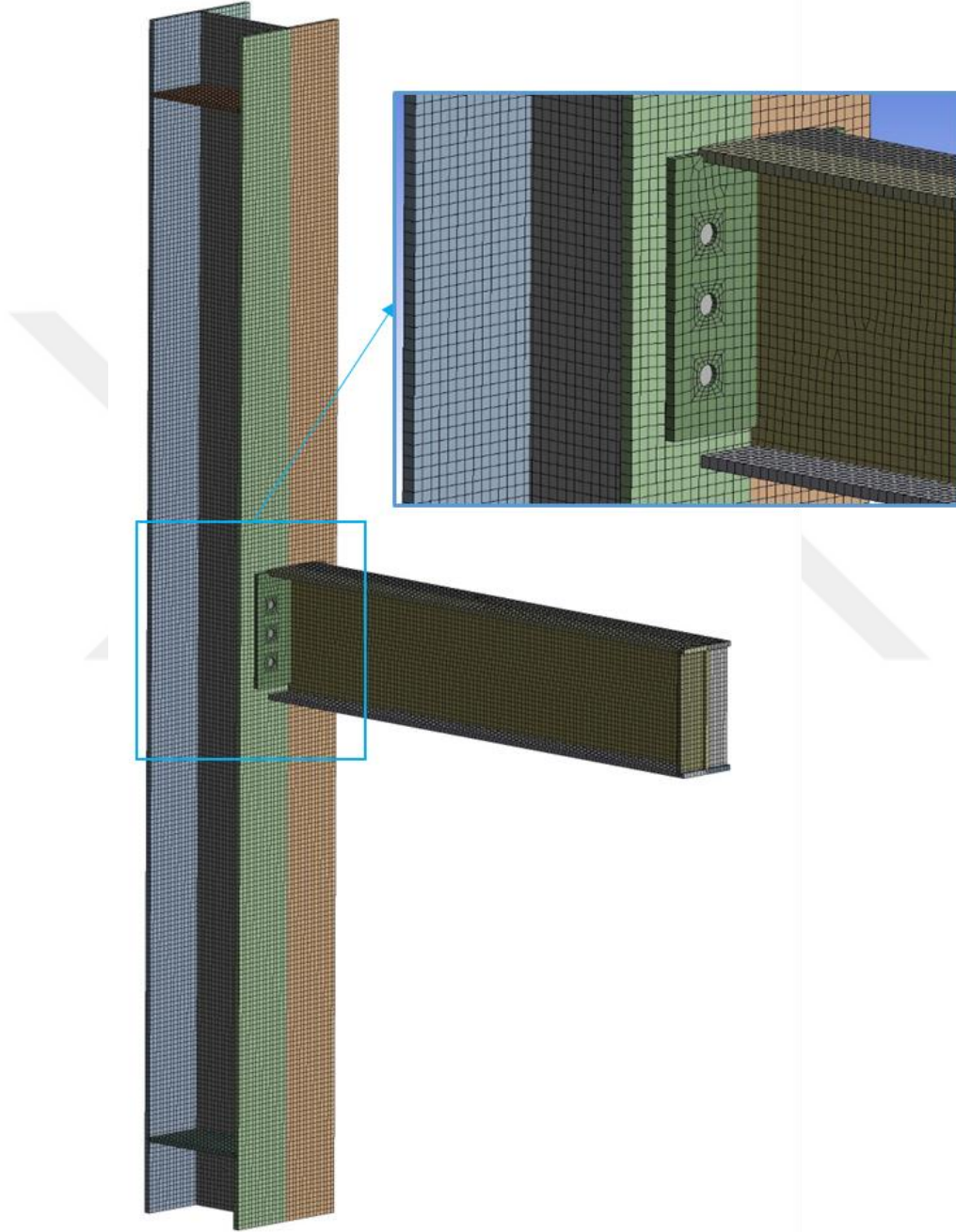


Şekil 5.14. EMTF birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli

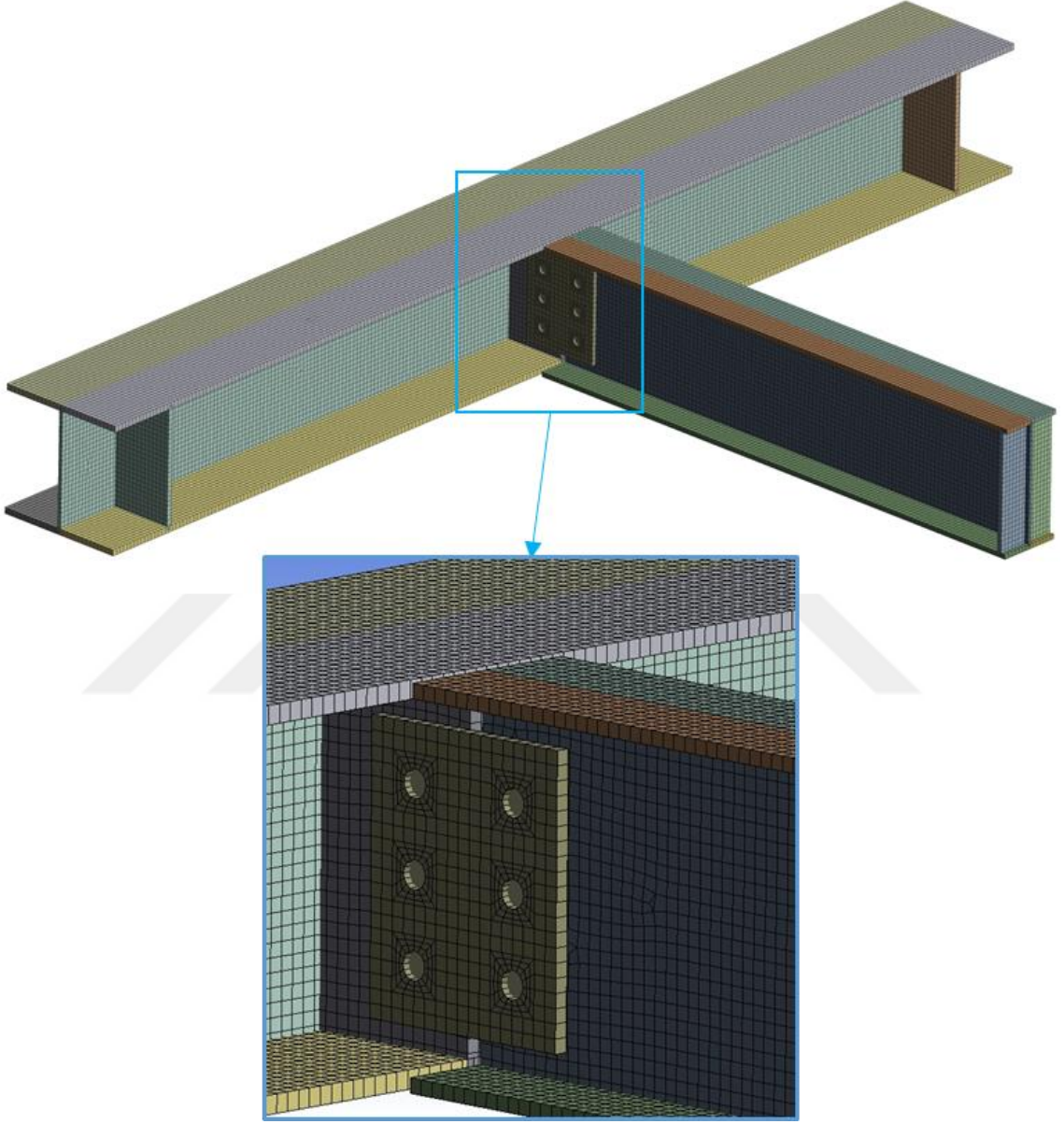
Çizelge 5.1. Moment aktaran birleşimlerin düğüm noktası ve eleman sayıları.

Birleşim	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
EMF	41022	40309
EMHF	41902	41199
EMTF	40516	39842

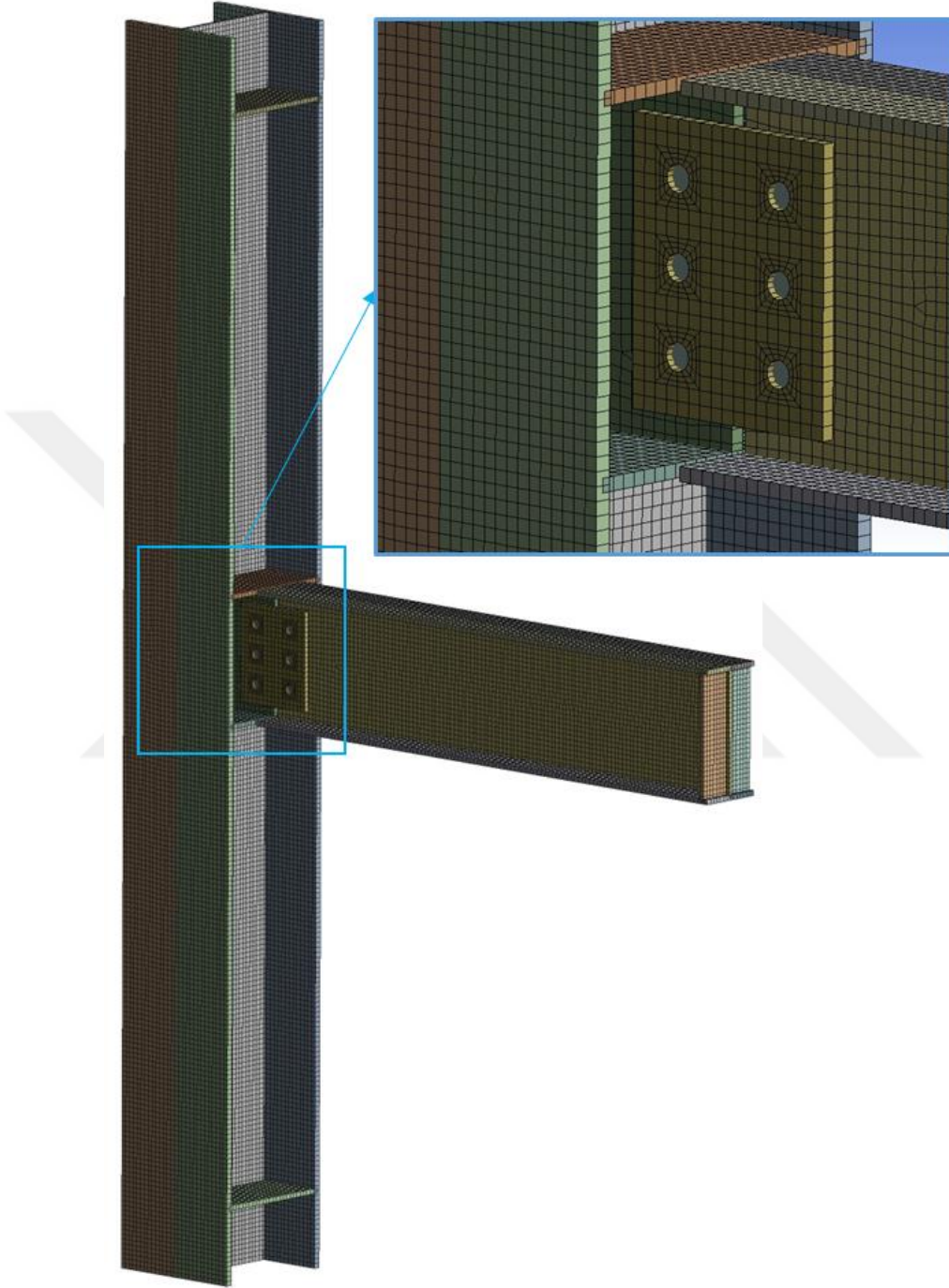
Moment aktaran birleşimlerde uygulanan modelleme özellikleri, yarı – rijit birleşim modellerinde de aynen uygulanmıştır. Yarı – rijit sonlu elemanlar ağ modelleri Şekil 5.15. – Şekil 5.18.’de gösterilmiştir. Çizelge 5.2.’de yarı – rijit birleşimlerinde yapılan meshleme sonucu oluşan düğüm noktası ve eleman sayıları verilmektedir.



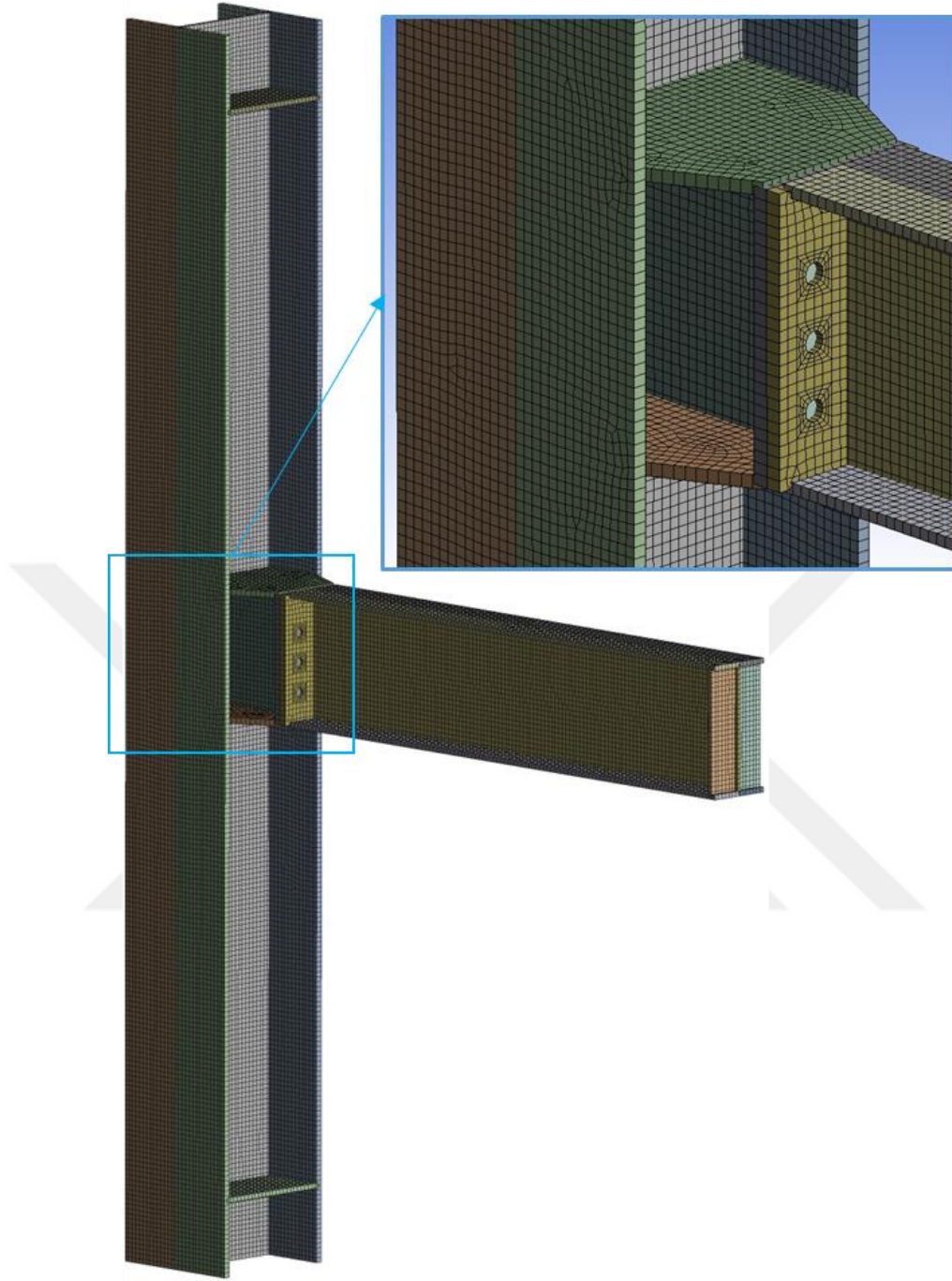
Şekil 5.15. EP birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli



Şekil 5.16. DS birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli



Şekil 5.17. DSD birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli

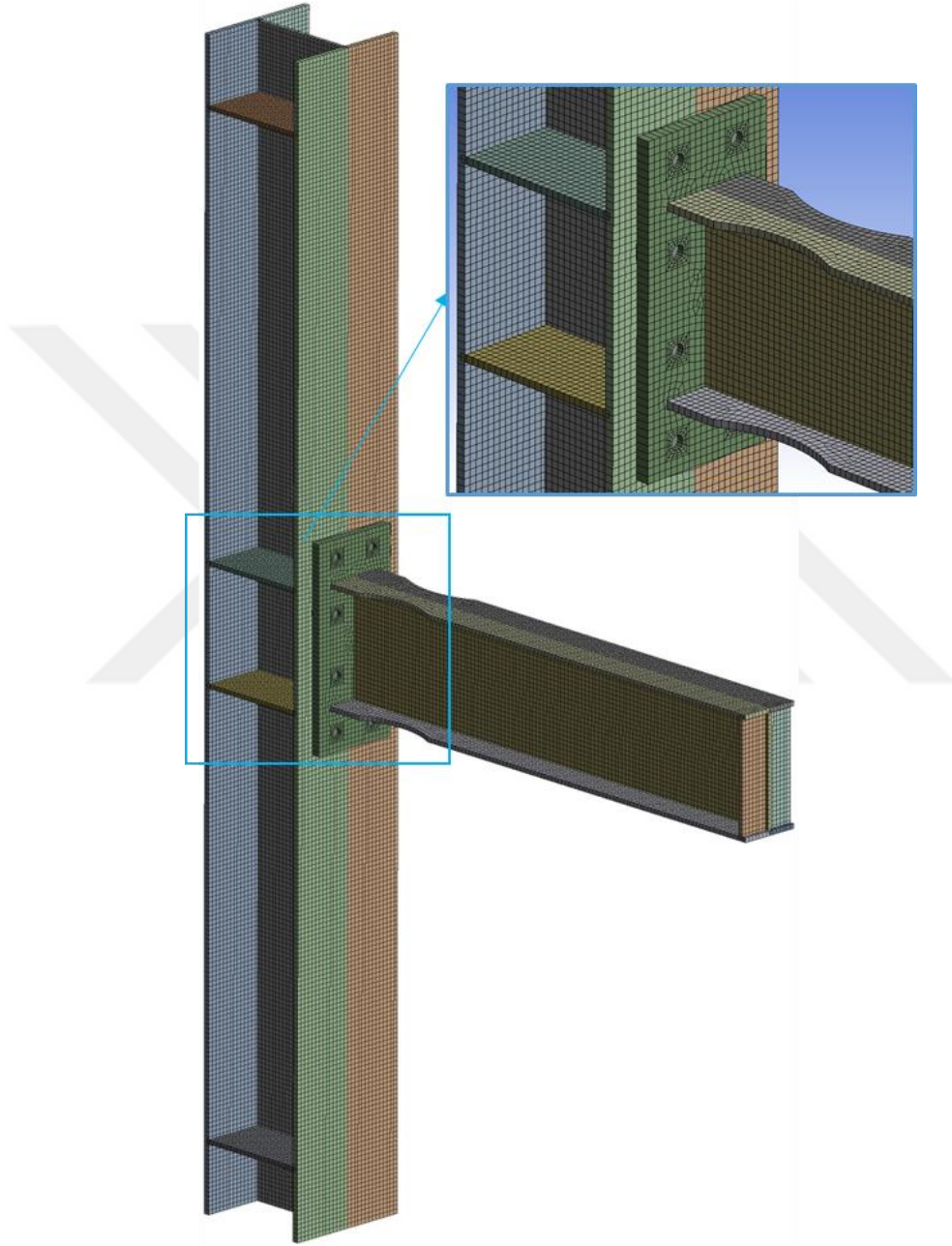


Şekil 5.18. EPW birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli

Çizelge 5.2. Yarı – rijit birleşimlerin düğüm noktası ve eleman sayıları.

Birleşim	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
EP	30378	29854
DS	31648	31041
DSD	31939	31347
EPW	32527	32081

Zayıflatılmış kiriş enkesiti bulonlu alın levhali başlık berkitmeli (REMF) birleşimin sonlu elemanlar ağ modeli Şekil 5.19.'de gösterilmiştir. Çizelge 5.3.'de birleşimde yapılan meshleme sonucu oluşan düğüm noktası ve eleman sayıları görülmektedir.



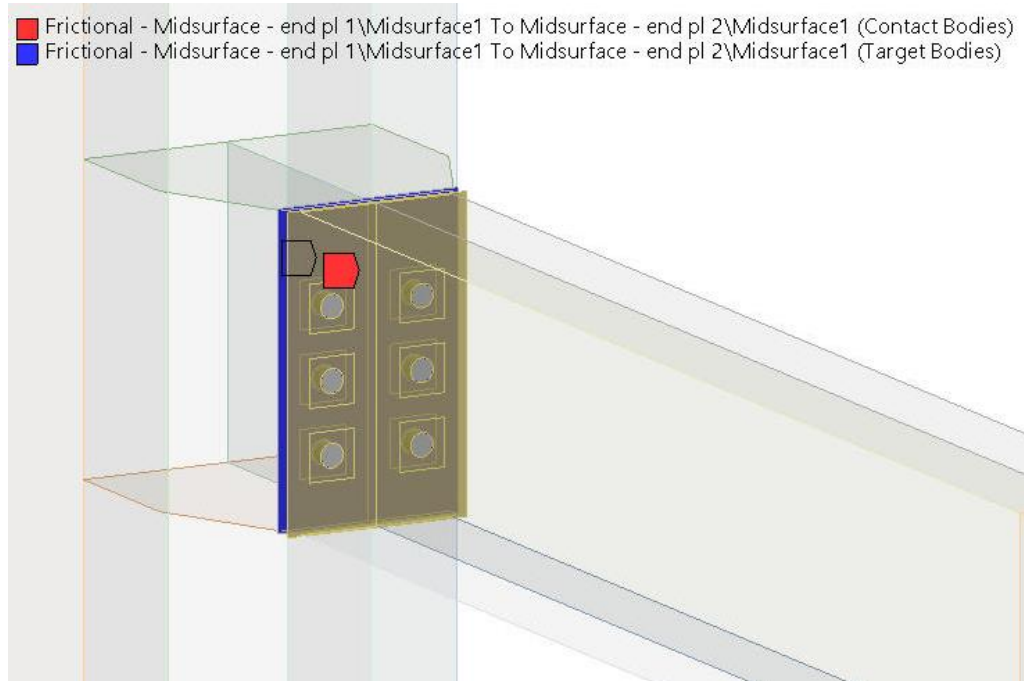
Şekil 5.19. REMF birleşim örneğinin sonlu elemanlar ağ modeli

Çizelge 5.3. REMF birleşim örneğinin düğüm noktası ve eleman sayıları.

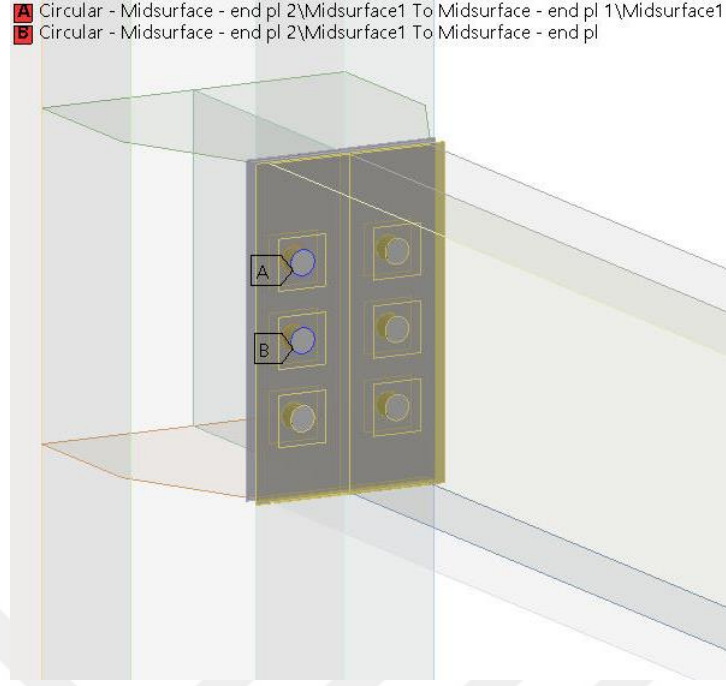
Birleşim	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
REMF	32322	31823

5.1.3. Birleşimlerdeki Temas Durumları

Birleşim modellerinde kolon – kiriş birleşimleri ve kiriş – kiriş birleşimleri; kolon, kiriş, alın levhası, bulonlar ve berkitme elemanlarından meydana gelmektedir. Bu parçaların birbirleri arasında gerçekleşen etkileşimi sonlu elemanlar analiz modellemesi esnasında dikkate alınması gerekmektedir. Temas özellikleri dikkate alınırken gerçek davranışa en uygun, doğrusal ve doğrusal olmayan temas durumları belirlenip uygulanmalıdır. Kolon başlığı ile kiriş alın levhası arasında doğrusal olmayan temas türü olan sürtünmeli temas (Frictional Contact) durumu dikkate alınmıştır. Bu temas durumundaki metal parçalar arasındaki sürtünme katsayısı 0,44 olarak dikkate alınmıştır. Kiriş uç kısmının alın levhası ile olan birleşimi gerçekte kaynaklı birleşim olarak yapılmaktadır. Sonlu elemanlar analiz modelinde kaynaklı birleşimlerde doğrusal olan yapıştırılmış temas (Bonded Contact) durumu dikkate alınır. Modellemelerde yapıştırılmış (Bonded) temas durumu yerine Share Topology özelliği kullanılarak tanımlama yapılmıştır. Analiz süresinin kısalmasını sağlaması amacıyla, bu çalışmada bulonlarla ilgili detay bir çalışma yapılmadığından ve delik çevresindeki gerilme – şekil değiştirmelere bakılacağından dolayı bulon elemanları ile aynı işlevi yapacak parçalar arasındaki bağlantı elemanı olan beam elemanlar kullanılmıştır. Birleşimlerde dikkate alınan temas durumuna örnek Şekil 5.20. – Şekil 5.21.’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Alın levhası birleşimlerinin temas durumu örneği.



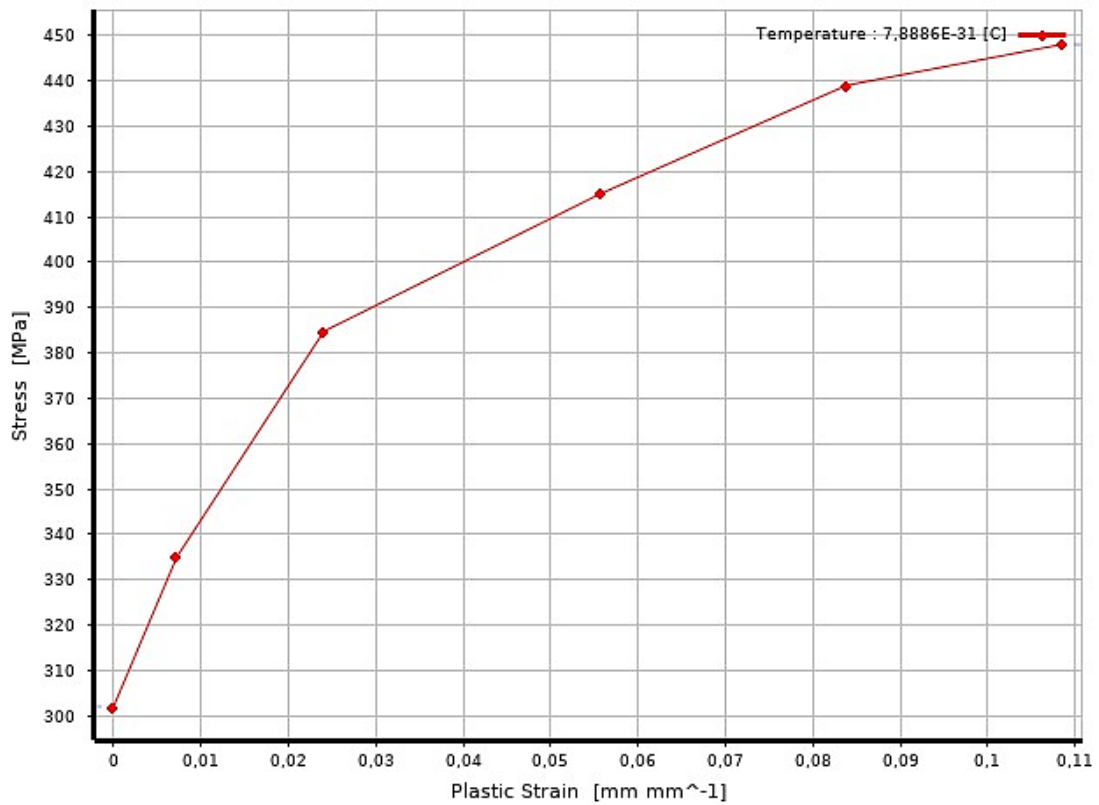
Şekil 5.21. Bulon birleşimlerinin temas durumu örneği.

5.1.4. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Sonlu elemanlar analizlerindeki tüm çalışmalarda, deneysel çalışmada kullanılan profillerden kesitler alınıp çekme deneylerine tabi tutularak belirlenen malzeme özellikleri kullanılmaktadır. (Hatipoğlu, 2011). Yapı elemanlarında, plakalarda ve bulonlarda aynı malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. Bütün malzemeler için Elastisite Modülü $203000 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ve Poisson oranı 0,3 olarak alınmıştır. Kullanılan bulon malzeme kalitesi 8.8 olarak dikkate alınmıştır. Kullanılan malzemelere ait gerilme ve plastik şekil değiştirme değerlerini Çizelge 5.4.'te verilmektedir. Programa elastik bölgeden sonra meydana gelen plastik şekil değiştirme ve gerilme değerleri girilir, elastik bölge kısmı girilen Elastisite Modülü özellikleri dikkate alınarak hesaplanır. Sonlu eleman analizlerinde monotonik yükleme durumlarında izotropik pekleşme kullanılmış olup çevrimsel yükleme durumlarında kinematik pekleşme malzeme tanımlaması yapılmıştır. Programa girilen yapı elemanlarının çok doğrusu (Multilinear) malzeme özellikleri Şekil 5.22.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.4. Kullanılan malzemelerin gerilme ve plastik şekil değiştirme değerleri.

Kullanıldığı Eleman	Plastik Şekil Değiştirme mm mm ⁻¹	Gerilme MPa (N/mm ²)
Kolon, kiriş ve plakalar	0	302
	0,0072539	335,05
	0,024068	384,75
	0,055734	415,1
	0,083862	438,96
	0,108512	448
Bulon	0	640
	0,0215739	725,33
	0,0392217	754,05
	0,0638844	777,03
	0,081546	788,51
	0,104	800



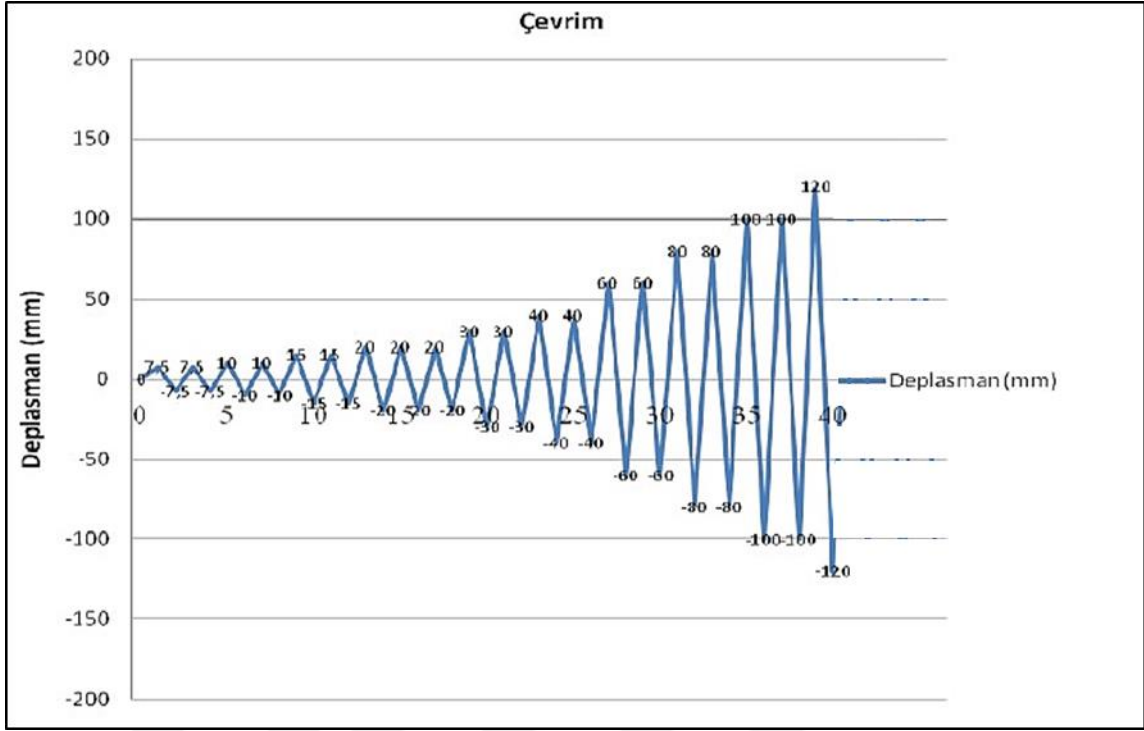
Şekil 5.22. Multilinear kinematik pekleşme gerilme – plastik şekil değiştirme grafiği.

5.1.5. Sınır Şartlarının ve Yüklerin Uygulanması

Birleşimlerin analizlerinde, monotonik ve çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler uygulanarak analizleri yapılmıştır. Monotonik yükleme programında tüm kolon kiriş birleşimlerinde konsol kirişlerin üzerlerindeki yükleme noktalarından yer çekimi yönünde düşey doğrultuda 150 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır. Çevrimsel (tekrarlı) yükleme programında ise moment aktaran birleşimlerde kirişlere aynı yükleme noktalarından, Şekil 5.23.'de gösterilen deneysel çalışmada dikkate alınan FEMA 351'de verilen 40 adımlık çevrimsel yükleme programı dikkate alınarak yapılmıştır. (Hatipoğlu, 2011). Çevrimsel yük anında uygulanan yer değiştirme değerleri Çizelge 5.5.'te verilmiştir. Yarı – rijit birleşimlerde kirişlere aynı yükleme noktalarından, Şekil 5.24.'de gösterilen 32 adımlık çevrimsel yükleme programı dikkate alınarak yapılmıştır. Çevrimsel yük anında uygulanan yer değiştirme değerleri Çizelge 5.6.'te verilmiştir. Kolon uç kısımlarından herhangi bir yönde dönme ve ötelenme hareketlerini yapmasını önlenecek şekilde modellenmiştir.

Çizelge 5.5. Moment aktaran birleşimlerde uygulanan çevrimsel yük değerleri. (Hatipoğlu, 2011).

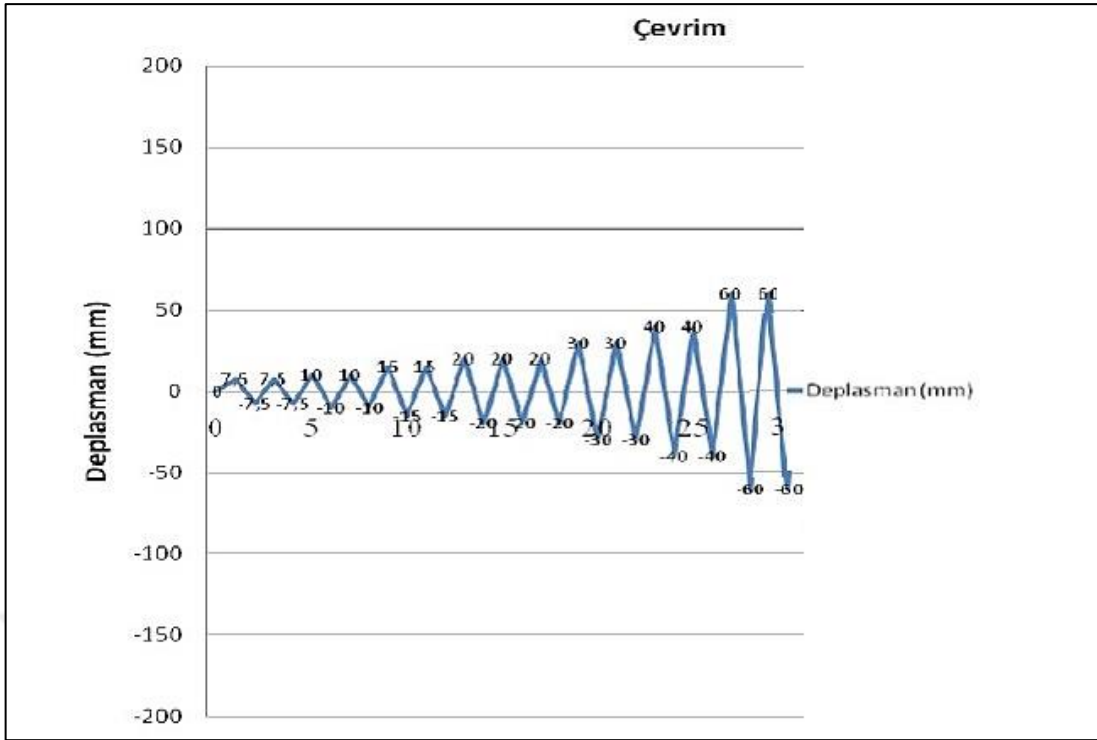
Yükleme Adımı	Toplam Dönme ϕ (Radyan)	Periyot Tekrarı, n_j	Deformasyon Miktarı (mm)
1	0,00375	2	7,5
2	0,005	2	10
3	0,0075	2	15
4	0,01	4	20
5	0,015	2	30
6	0,02	2	40
7	0,03	2	60
8	0,04	2	80
9	0,05	2	100



Şekil 5.23. Moment aktaran birleşimlerde uygulanan çevrimsel yükleme programı. (Hatipoğlu, 2011).

Çizelge 5.6. Yarı – rijit birleşimlerde uygulanan çevrimsel yük değerleri.

Yükleme Adımı	Toplam Dönme ϕ (Radyan)	Periyot Tekrarı, n_j	Deformasyon Miktarı (mm)
1	0,00625	2	7,5
2	0,00833	2	10
3	0,0125	2	15
4	0,0167	4	20
5	0,025	2	30
6	0,033	2	40
7	0,050	2	60



Şekil 5.24. Yarı – rijit birleşimlerde uygulanan çevrimsel yükleme programı.

5.1.6. Sonlu Elemanlar Analiz Ayarları

Moment aktaran ve yarı – rijit birleşimlerin sonlu elemanlar analizleri, doğrusal olmayan büyük geometri değişimleri, doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin kullanılması ve doğrusal olmayan birleşim temas durumlarının kullanımı ile çelik bağlantıların doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri yapılmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinde kiriş ucuna uygulanan deplasman yükleme adımları varsayılan ayarı ile program kontrolüne bırakılarak uygulanan deplasmanlar alt adımlara bölünerek yükler uygulanmış ve analiz yapılmıştır. Programa girilen çevrimsel yükleme, varsayılan ayarda uygulanan deplasman yükünü yakınsama elde edinceye kadar gerekli gördüğü adım sayısına bölerek yükleme yapmaktadır.

5.2. Sonlu Elemanlar Analizinin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Moment aktaran (rijit) ve yarı – rijit birleşimlerin modellemeleri, çevrimsel ve monotonik yükler uygulanıp analizleri sonlu elemanlar analiz programı ANSYS Workbench kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve yorumlanmasında eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları, hasar durumları, eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları yük geçmişi, yük – deplasman grafikleri, moment – toplam dönme grafikleri, dayanım zarfı grafikleri, rijitlik azalım grafikleri gibi etkenler kullanılmaktadır. Analizleri yapılan moment aktaran ve yarı – rijit birleşimler önce kendi içinde incelenecek, daha sonra bu karşılaştırmalar sonucunda öne çıkan birleşimler birbirleriyle kıyaslanacaktır.

5.2.1. Çözümlerinin Elde Edilmesi

5.2.1.1. Yük Geçmişi Grafiklerinin Oluşturulması

Yük geçmişi grafiği, monotonik yük uygulanan birleşimler yer çekimi yönünde tek bir yüklemeye maruz kalırken, çevrimsel (tekrarlı) yük uygulanan ise önce yukarı yönde sonra aşağı yönde yüklemeye maruz kalmaktadır. Elde edilen yük değerleri, yük ve çevrim ilişkisi şeklinde grafik olarak değerlendirilip her bir birleşim örneği için yük geçmişi grafiği çizdirilmiştir.

5.2.1.2. Birleşimlerin Moment – Dönme ve Yük - Deplasman Grafiklerinin Oluşturulması

Yük – Deplasman grafiği, çevrimsel yükleme sırasında kiriş ucunda okunan yük değerleri (P) ile kiriş ucundaki oluşan yer değiştirme ölçümlerinden (Δ) faydalanılmıştır. Grafiklerin çizdirilmesinde aynı deplasman değeri için gerçekleştirilen her çevrim için elde edilen yük değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır.

Moment – toplam dönme grafikleri çizdirilirken, birleşimlerin taşıdığı moment değerleri kirişin yükleme uygulanan noktasındaki kuvvet değerinin kolon yüzüne olan mesafesi ile çarpımı ($M=P \times L$) sonucu elde edilmektedir. Toplam dönme değeri ise kirişe uygulanan yükleme noktasındaki düşey yer değiştirme değerinin, yükleme noktasının kolon eksenine olan uzaklığına bölünmesi ($\phi=\Delta/L$) ile elde edilmektedir.

5.2.1.3. Birleşimlerin Dayanım Zarfı Grafiklerinin Oluşturulması

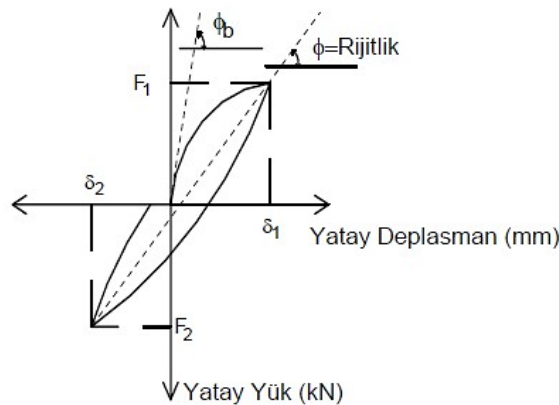
Dayanım grafiklerinin oluşturulması, her çevrim anında elde edilen en büyük deplasman değerleriyle, bu değerlere karşılık gelen en büyük yük değerleri elde edilmiştir. Yukarı ve aşağı yönlü yüklemelerde elde edilen yük değerleri ile deplasmanlar grafik halinde çizdirilmiştir.

5.2.1.4. Birleşimlerin Rijitlik Azalım Grafiklerinin Oluşturulması

Çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında, birleşimlerin rijitlik değerlerinde devam eden her çevrimde bir azalma meydana gelmektedir. Birleşimlerin rijitlik değerleri, her bir çevrim için elde edilen Yük – Deplasman grafiğinin eğimi bulunarak elde edilmiştir. Her bir çevrimdeki, Yük – Deplasman eğrisinde okunan yük değerleri F_1 ve F_2 , deplasman değerleri ise Δ_1 ve Δ_2 'dir. Çevrim için rijitlik değeri aşağıdaki denklem (5.1) ile elde edilmekte olup Şekil 5.25.'te gösterilmektedir.

$$\text{Rijitlik } (\phi) = (|F_1| + |F_2|) / (|\Delta_1| + |\Delta_2|) \quad (5.1)$$

Hesaplamalar sonucu elde edilen rijitlik değişim değerlerinin, deplasman değerlerinin, açıklık değerlerine (Δ/L) oranıyla elde edilen değerlerin grafik olarak çizdirilmesiyle rijitlik azalım grafiği elde edilmiştir. Rijitlik azalım grafikleri ile daha iyi değerlendirmeler yapılabilmesi amacıyla; çevrim sayısına yerine, (Δ/L) oranına bağlı olarak grafik çizdirilmiştir. (Hatipoğlu, 2011).



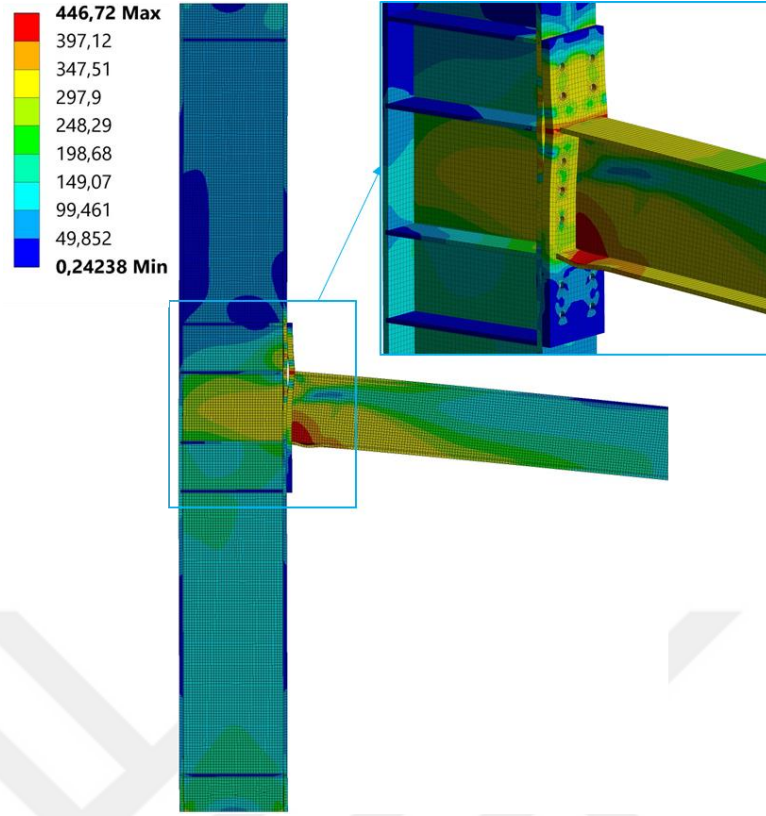
Şekil 5.25. Birleşimlerin rijitlik değerinin belirlenmesi. (Hatipoğlu, 2011).

5.2.2. Moment Aktaran Birleşimler

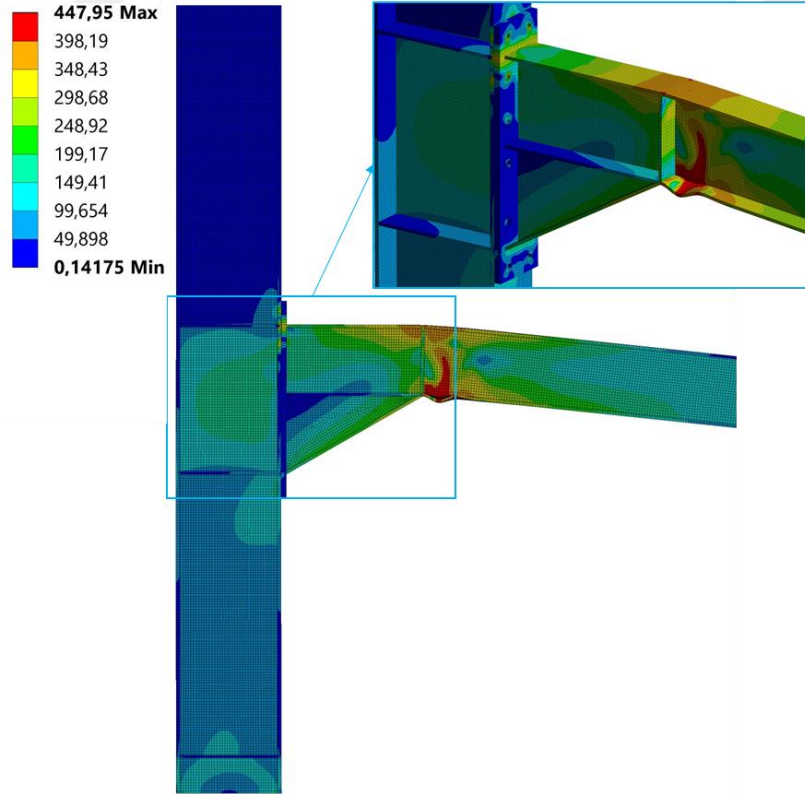
Tezin bu bölümünde moment aktaran, bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşim örneği, bulonlu guseli alın levhalı başlık berkitmeli (EMHF) birleşim örneği ve bulonlu üstten guseli alın levhalı başlık berkitmeli (EMTF) birleşim örneği sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır.

5.2.2.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri

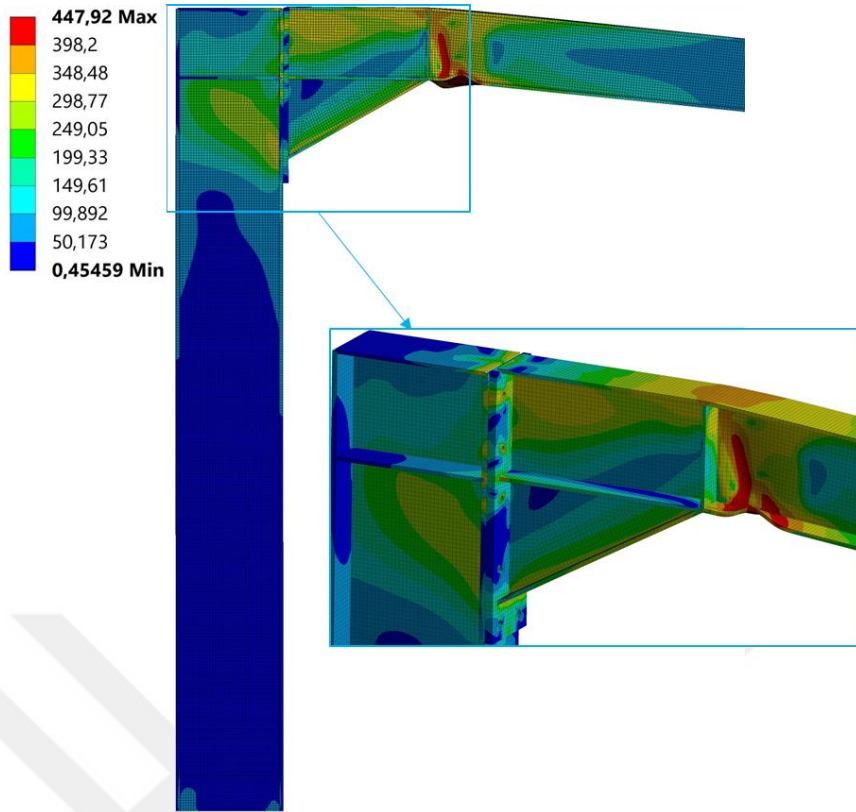
Moment aktaran (rijit) bağlantılı her bir birleşimin çevrimsel ve monotonik yüklemeler altında sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Monotonik yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından yer çekimi yönünde düşey doğrultuda 150 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır. EMF, EMHF ve EMTF birleşimleri bu 150mm'lik yer değiştirme değerine kadar yükü taşıyabildikleri görülmüştür. Çevrimsel yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından uygulanan 40 adımdan oluşan düşey deplasman yüklemesinin en büyük değeri 109,71 mm'dir. EMF, EMHF ve EMTF birleşimleri uygulanan çevrimsel yükleme programını tamamlayabildikleri görülmüştür. EMF bileşimi kopma gerilmesine ulaştığında oluşan hasar durumu birleşime yakın yerde kirişte meydana geldiği görülmüştür. EMHF ve EMTF bileşimleri kopma gerilmesine ulaştıklarında oluşan hasar durumlarının birleşimden uzakta kirişte meydana geldiği görülmüştür. Her üç moment aktaran birleşimde, kiriş başlıklarında ve gövdelerinde burkulma meydana gelmiştir. EMF birleşiminin kiriş başlık kayaklarının olduğu yerlerdeki gerilme yığılımları kaynakları zorlandığını göstermektedir. Şekil 5.26. – Şekil 5.28.'de moment aktaran birleşimlerin monotonik yükleme altında, Şekil 5.29. – Şekil 5.31.'de çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler sonucunda elde edilen deformasyona uğramış görünüşlerinin üzerinden eş değer gerilme (von-Mises stress) dağılımları verilmektedir.



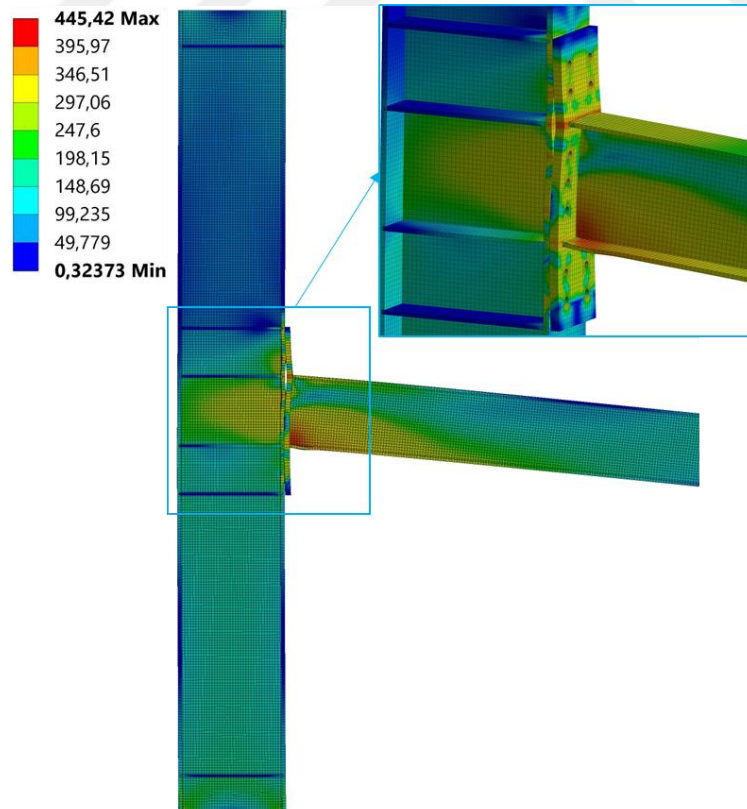
Şekil 5.26. Monotonik yük altında EMF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



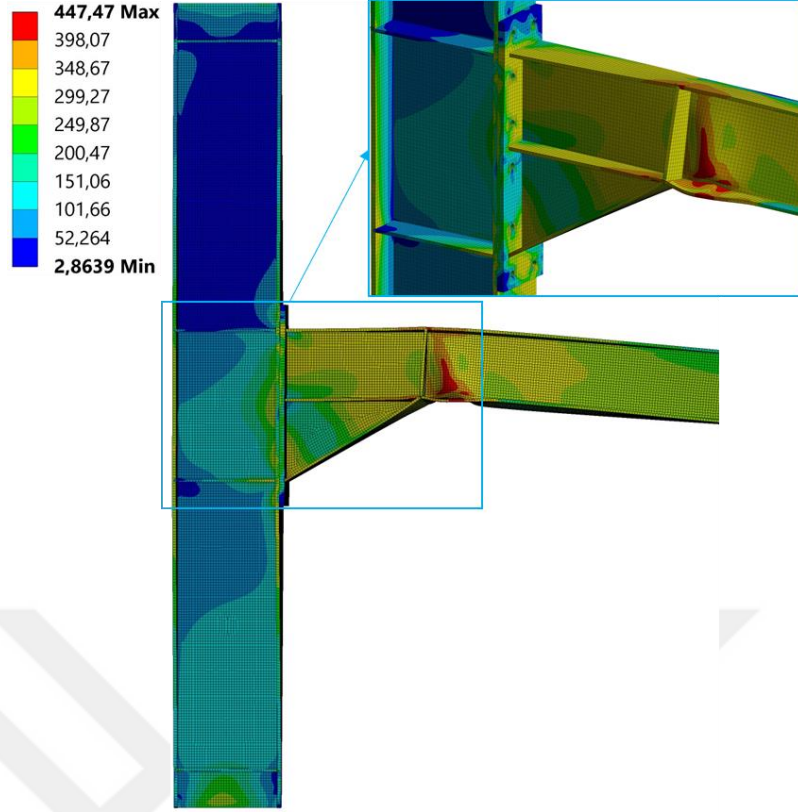
Şekil 5.27. Monotonik yük altında EMHF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



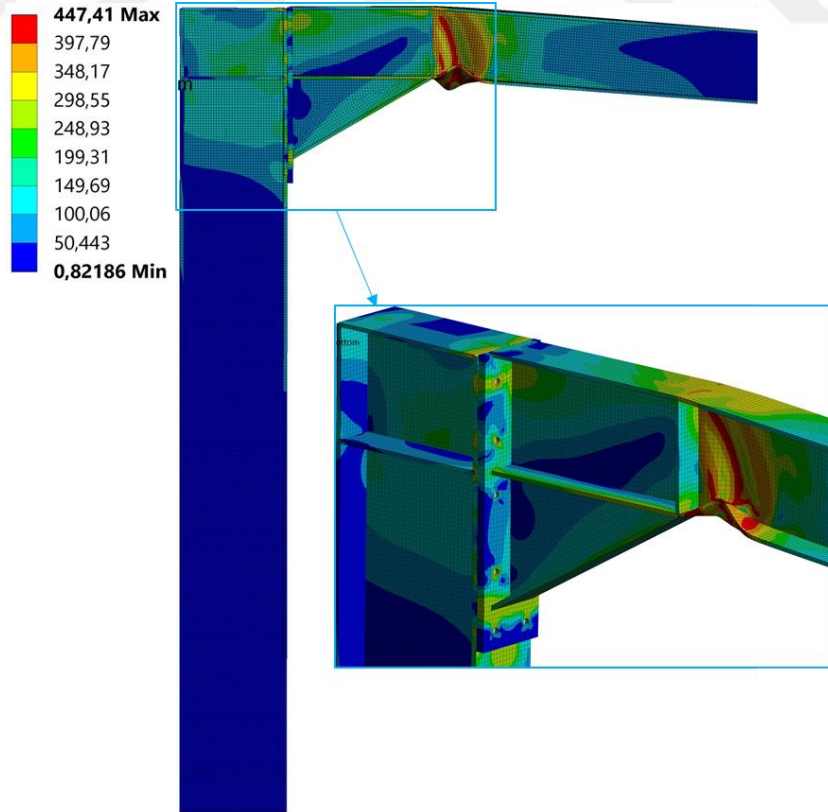
Şekil 5.28. Monotonik yük altında EMTF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



Şekil 5.29. Çevrimsel yük altında EMF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



Şekil 5.30. Çevrimsel yük altında EMHF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.

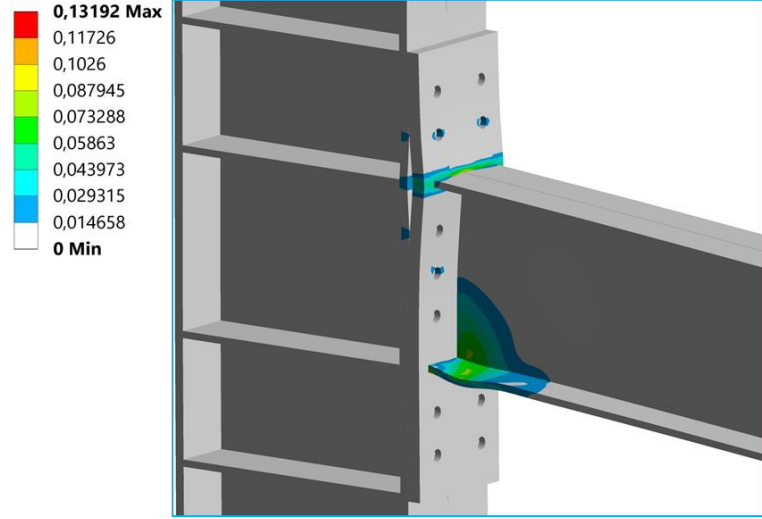


Şekil 5.31. Çevrimsel yük altında EMTF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.

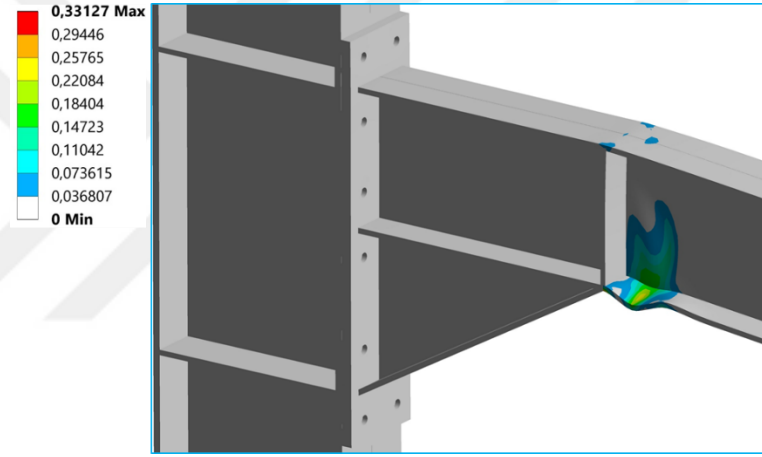
Moment aktaran birleşimlerin monotonik yükleme altındaki analiz sonuçları, hasar ve plastik mafsalin oluştuğu yerler Şekil 5.25. – Şekil 5.28’de görüldüğü üzere, EMF birleşiminde plastik mafsal kiriş üzerinde olmasına rağmen alın levhası ve kiriş başlık kaynaklarının da zorlandığı ve kopma dayanımına yaklaştığı görülmektedir. Kirişte oluşan plastik mafsal alın levhasından yaklaşık olarak 80 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. EMHF ve EMTF birleşimlerinde ise hasar ve plastik mafsal kiriş üzerinde oluştuğu ve alın levhasından yaklaşık olarak 600 mm uzakta meydana gelmiştir. Çevrimsel yükleme altındaki analiz sonuçları, hasar ve plastik mafsalin oluştuğu yerler Şekil 5.29. – Şekil 5.31.’de görüldüğü üzere, EMF birleşiminde plastik mafsal kiriş üzerinde oluşmuş fakat alın levhası ve kiriş başlık kaynaklarının da zorlandığı ve kopma dayanımına yaklaştığı görülmektedir. Monotonik yüklemeye göre alın levhası ve kiriş başlıkların kaynaklarının daha fazla zorlandığı görülmüştür. Kirişte oluşan plastik mafsal alın levhasından yaklaşık olarak 75 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. EMHF ve EMTF birleşimleri de monotonik yüklemeye göre alın levhaları, kiriş ve guse başlıklarının kaynaklarının olduğu kısımların daha çok zorlandığı görülmektedir.

EMF örnek birleşiminde monotonik yükleme sonucunda oluşan kiriş başlıklarında ve gövdesinde meydana gelen burkulmanın, çevrimsel yükleme altında oluşan burkulmalarla neredeyse aynı olduğu görülmektedir. EMHF ve EMTF birleşim örneklerinde çevrimsel yükleme altındaki kiriş başlıklarında ve gövdesinde meydana gelen burkulmanın, monotonik yükleme altında meydana gelen burkulmalardan daha fazla olduğu görülmektedir.

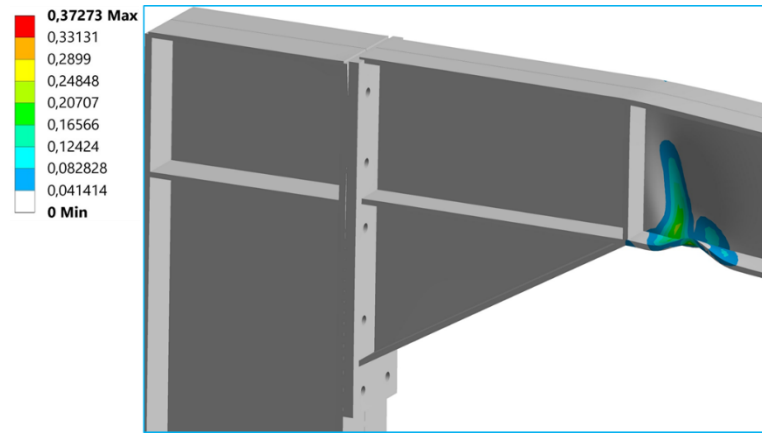
Birleşimlerde meydana gelen hasar durumlarının ve oluşan plastik mafsalların oluştuğu bölgelerin daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi için eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme durumların değerlendirilmelidir. Moment aktaran (rijit) birleşimlerim monotonik yükleme altında oluşan bu dağılımları Şekil 5.32. – Şekil 5.34.’de, çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında oluşan bu dağılımları Şekil 5.35. – Şekil 5.37.’de gösterilmiştir. EMF birleşiminde monotonik yükleme altında dağılım kiriş başlıklarından kiriş gövdesinin ortalarına doğru doğrusal şekilde artma görülürken, aynı birleşimin çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altındaki dağılımında böyle bir durumla karşılaşmamıştır. EMHF ve EMTF birleşimlerinde monotonik ve çevrimsel her iki yükleme altında da gusenin berkitmesinin bittiği yerde kiriş başlıklarından kiriş gövdesinin ortalarına doğru doğrusal artan bir dağılım görülmektedir.



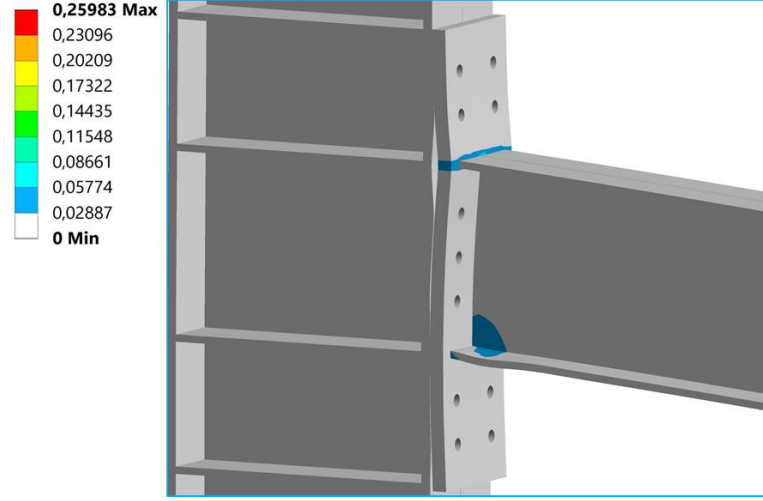
Şekil 5.32. Monotonik yük altında EMF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



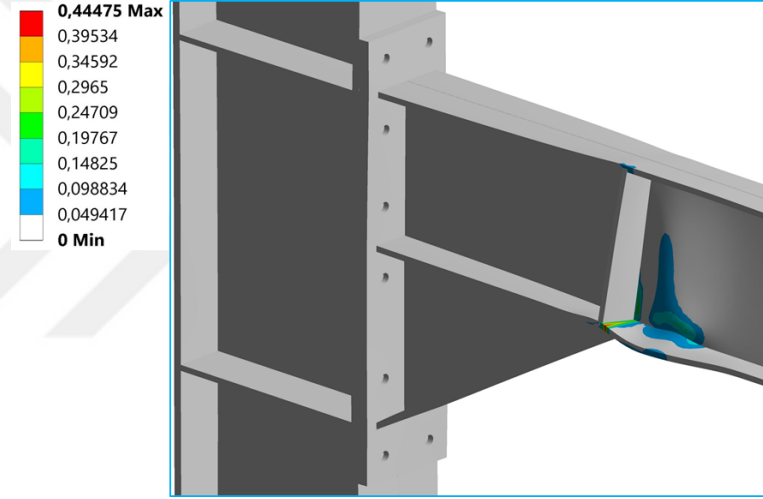
Şekil 5.33. Monotonik yük altında EMHF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



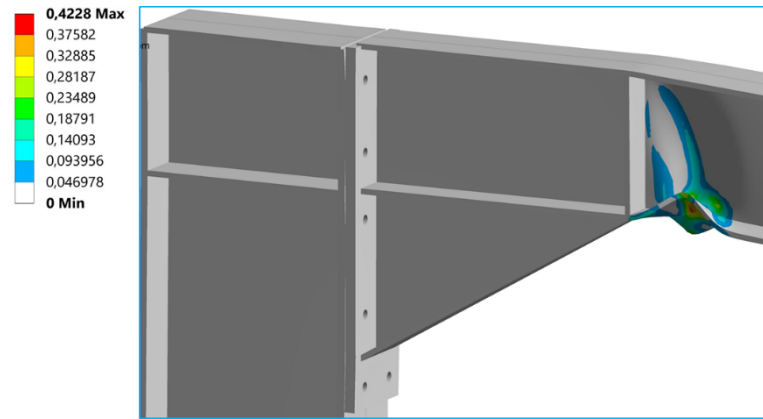
Şekil 5.34. Monotonik yük altında EMTF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.35. Çevrimsel yük altında EMF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.36. Çevrimsel yük altında EMHF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



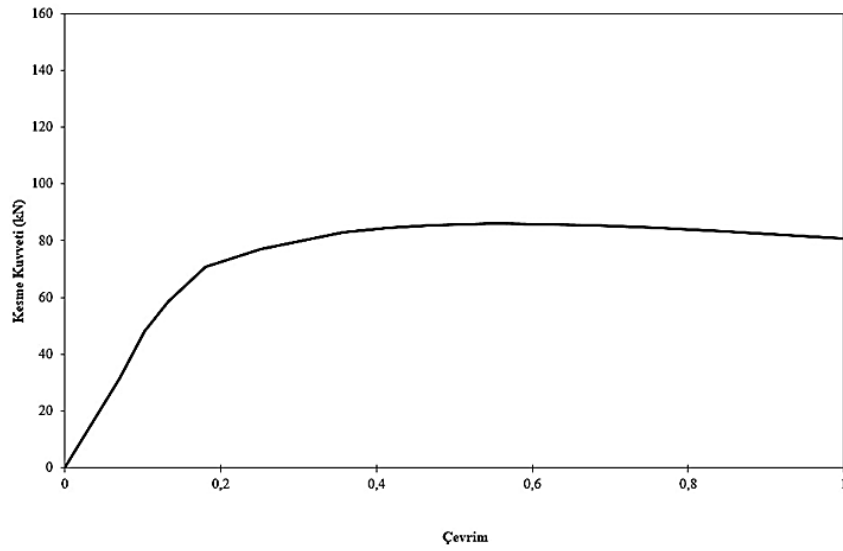
Şekil 5.37. Çevrimsel yük altında EMTF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.

5.2.2.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler

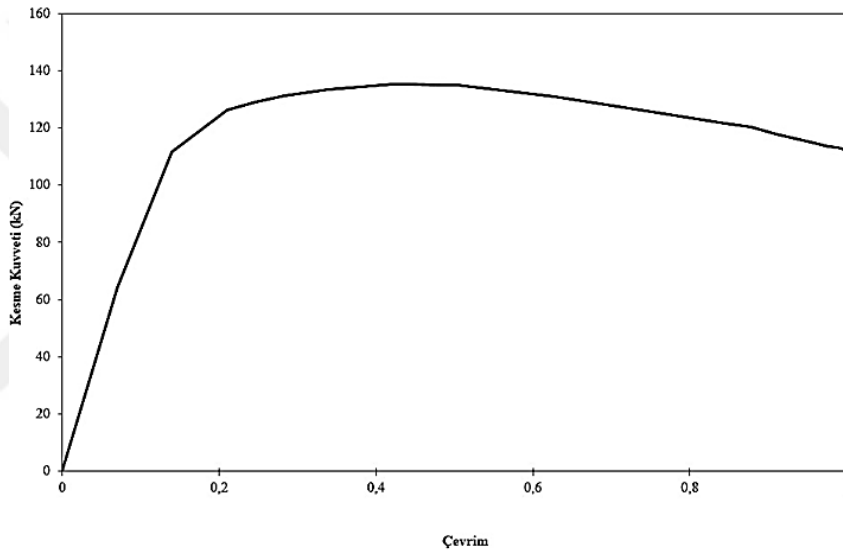
Moment aktaran birleşimlerin analizinde giriş yükleme noktasından uygulanan yer değiştirme yüklerinin, aynı yükleme noktasında oluşan tepki kuvvetlerinin monotonik yüklemesi için Şekil 5.38.'de çevrimsel yüklemesi için Şekil 5.39'da gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, birleşimler yaklaşık olarak aynı belirli bir yük adımından sonra taşınan kuvvette azalma olduğu görülmüştür. EMHF ve EMTF birleşim örnekleri çevrimsel yükleme altında aynı yük adımında (13. çevrim) kuvvet taşıma değerlerinde azalmalar görülmeye başlanmış, EMF birleşim örneğinde ise çevrimsel yükleme altında 16. çevrim yük adımında kuvvet taşıma değerinin azalmaya başladığı görülmüştür.

Moment aktaran birleşim örneklerinin giriş yükleme noktasında oluşan yük değerleri ile aynı noktada oluşan deplasman değerleri ile elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafikleri ve bu grafiklerden elde edilmiş moment – toplam dönme grafikleri, monotonik ve çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında oluşan durumları EMF örnek birleşimi Şekil 5.40.'da, EMHF örnek birleşimi Şekil 5.41.'de, EMTF örnek birleşimi için Şekil 5.42'de gösterilmektedir.

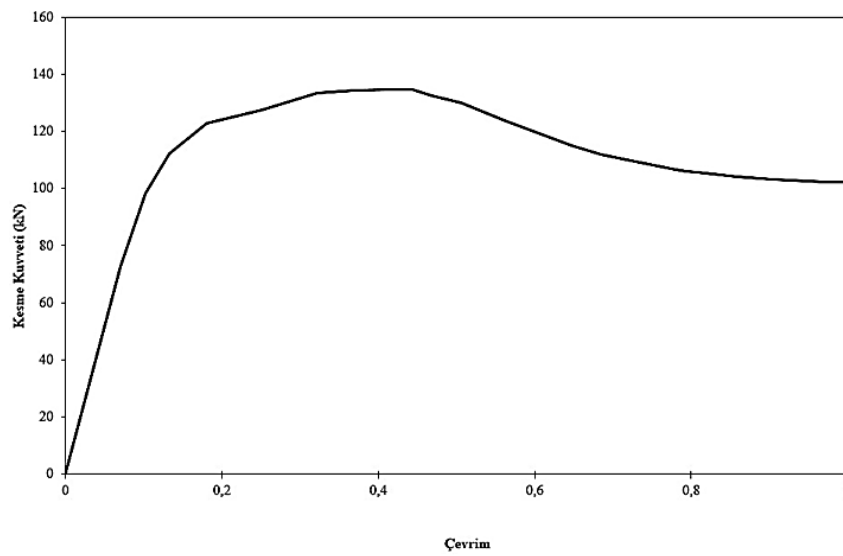
FEMA-350'ye göre birleşim bölgelerinde herhangi bir göçme meydana gelmezse bile uygulanan çevrimsel yüklemenin bir çevriminde ulaşılan maksimum moment değeri, sistemin moment kapasitesinin %80'inin altına düşüyorsa, sistemde göçme meydana geldiği kabul edilmektedir (Yılmaz, 2015). Birleşimlerin tümü uygulanan çevrimsel yükleme altında 0,05 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini tamamlamışlardır. EMHF ve EMTF birleşimlerinin taşıdığı moment değerleri belli bir adımdan sonra sistem moment kapasitesinin %80'inin altına düştüğü görülmüştür. EMF birleşimi 0,04 radyan pozitif dönme değerinin ikinci çevriminde maksimum moment taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüş geriye kalan çevrimlerde moment değerlerinde ise %80'in altına düştüğü görülmemiştir. EMHF ve EMTF birleşimi 0,05 radyan pozitif dönme değerinin ilk çevriminde maksimum moment taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüş ve bu çevrimden sonra moment değerlerinin %80'inin altına düştüğü gözlenmiştir. Moment kapasitesinin %80'inin altına düştüğü yerler moment – toplam dönme grafiklerinde Şekil 5.40.- Şekil 5.42.'de işaretlenip gösterilmiştir. Birleşimlerin ulaştıkları maksimum momentte sonra çevrimsel yükleme tamamlanana kadar her çevrim sonucunda elde edilen moment değerleri Çizelge 5.7.'de tablo şeklinde verilmiştir.



a) EMF birleşimi

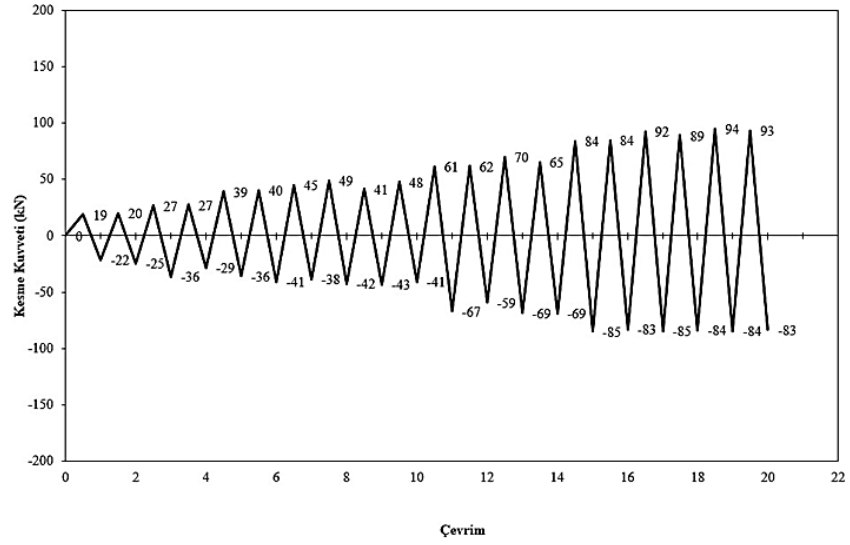


b) EMHF birleşimi

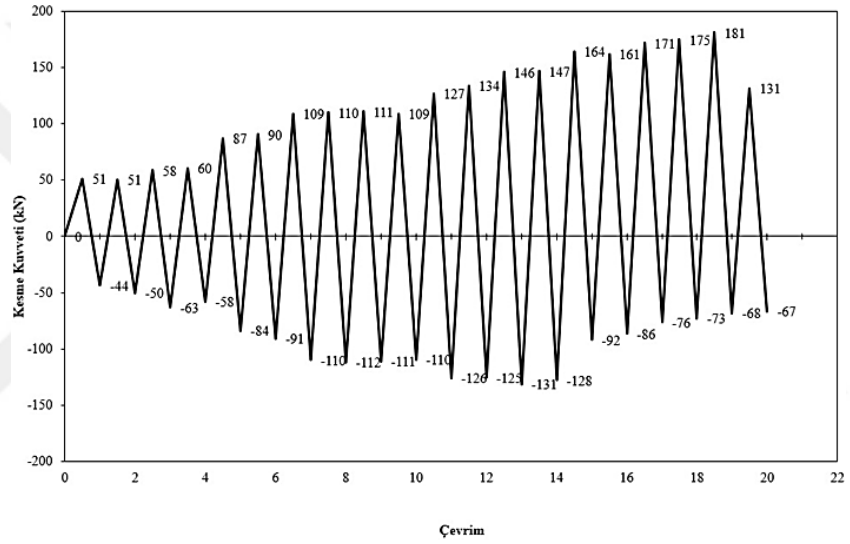


c) EMTF birleşimi

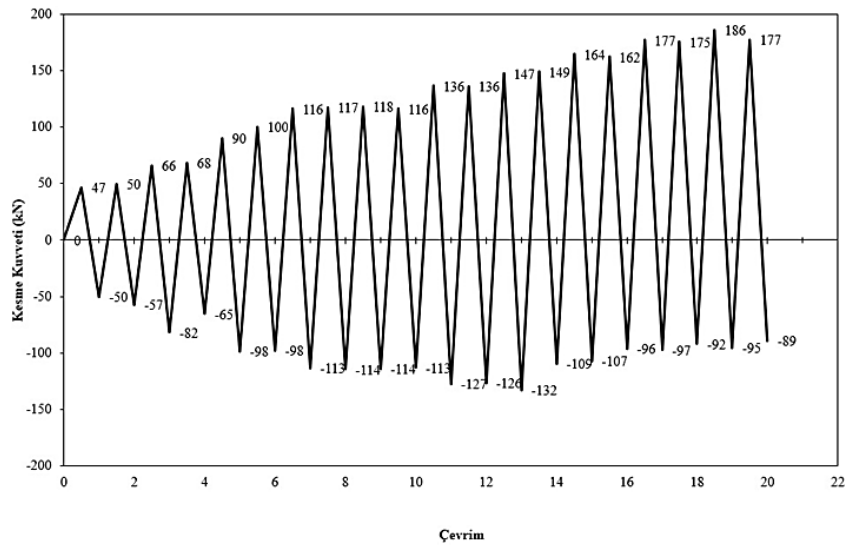
Şekil 5.38. Moment aktaran birleşimlerin monotonik yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.



a) EMF birleşimi

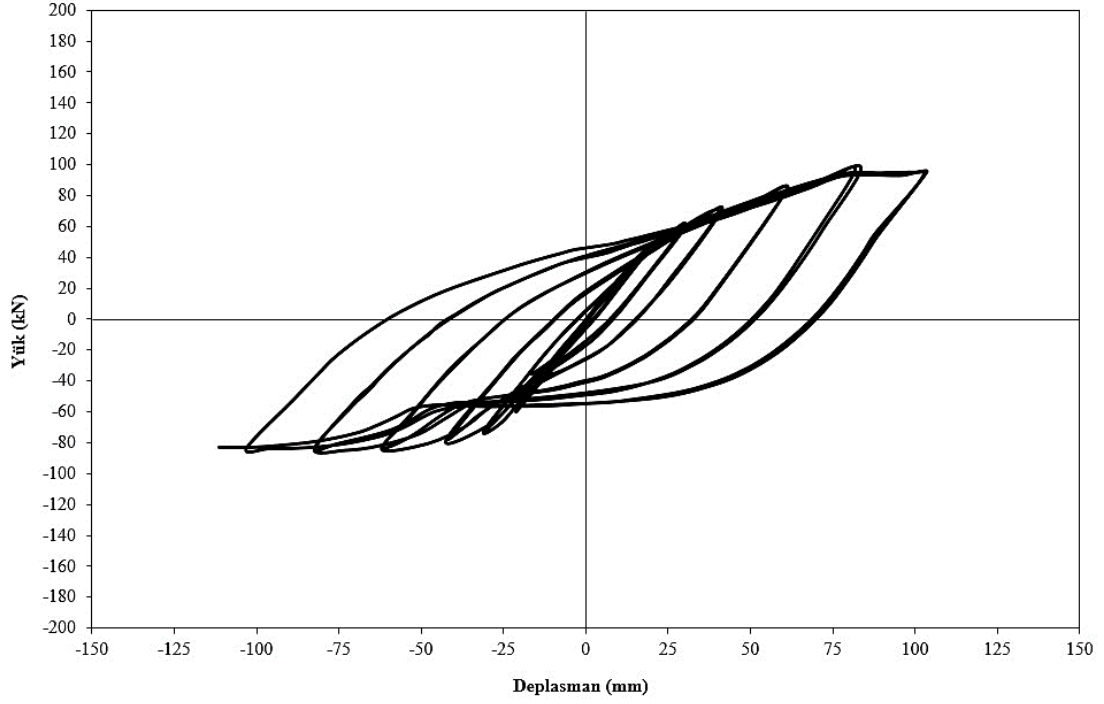


b) EMHF birleşimi

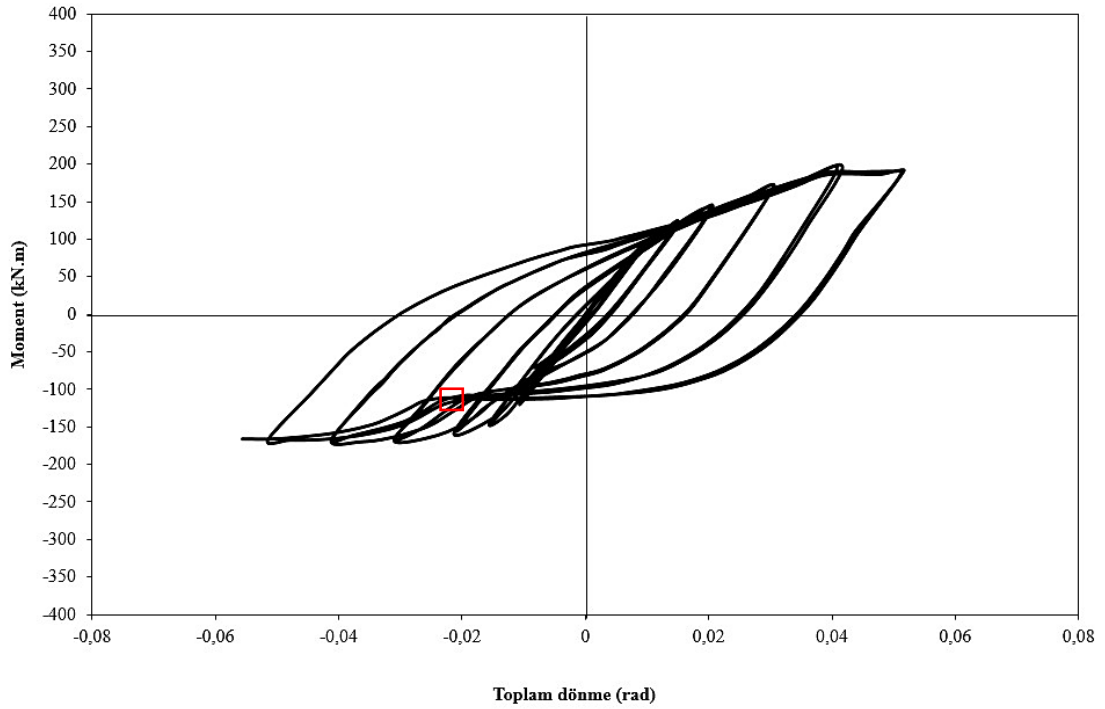


c) EMTF birleşimi

Şekil 5.39. Moment aktaran birleşimlerin çevrimsel yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.

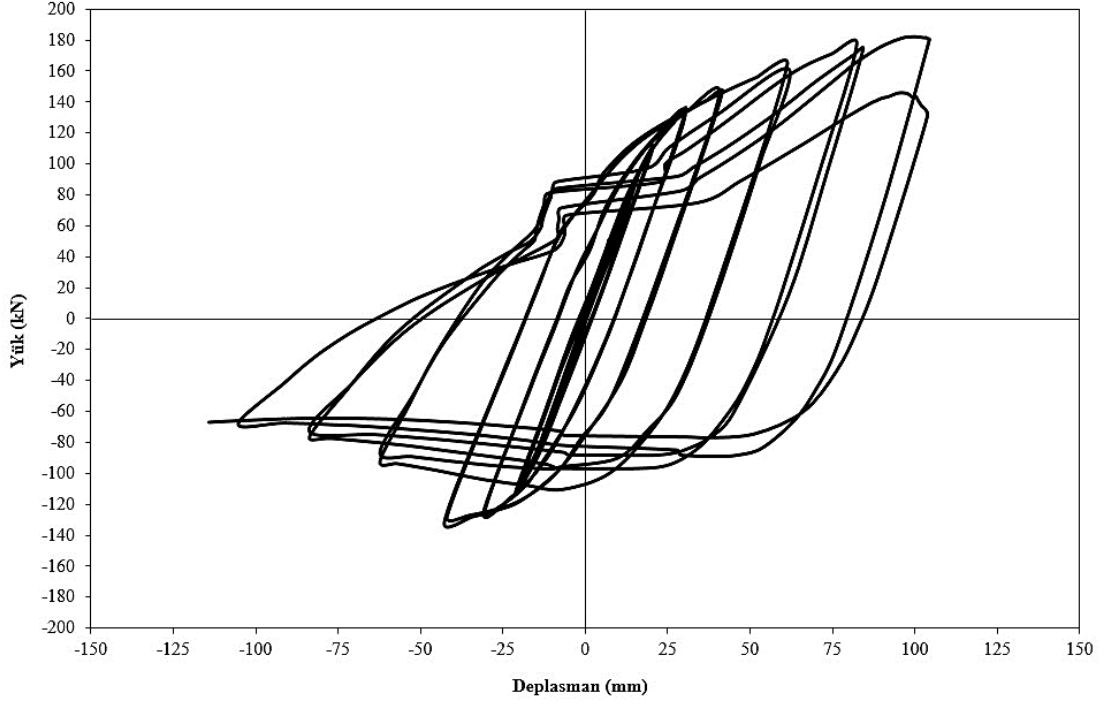


a) EMF birleşimi Yük – Deplasman grafiği

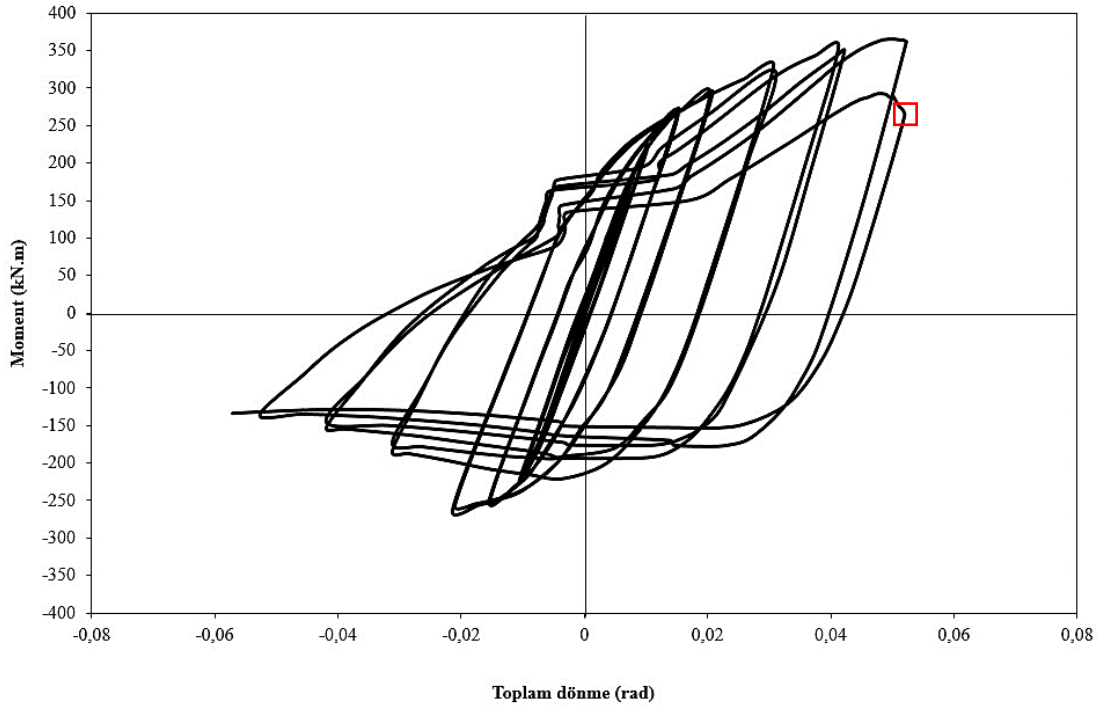


b) EMF birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.40. EMF birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

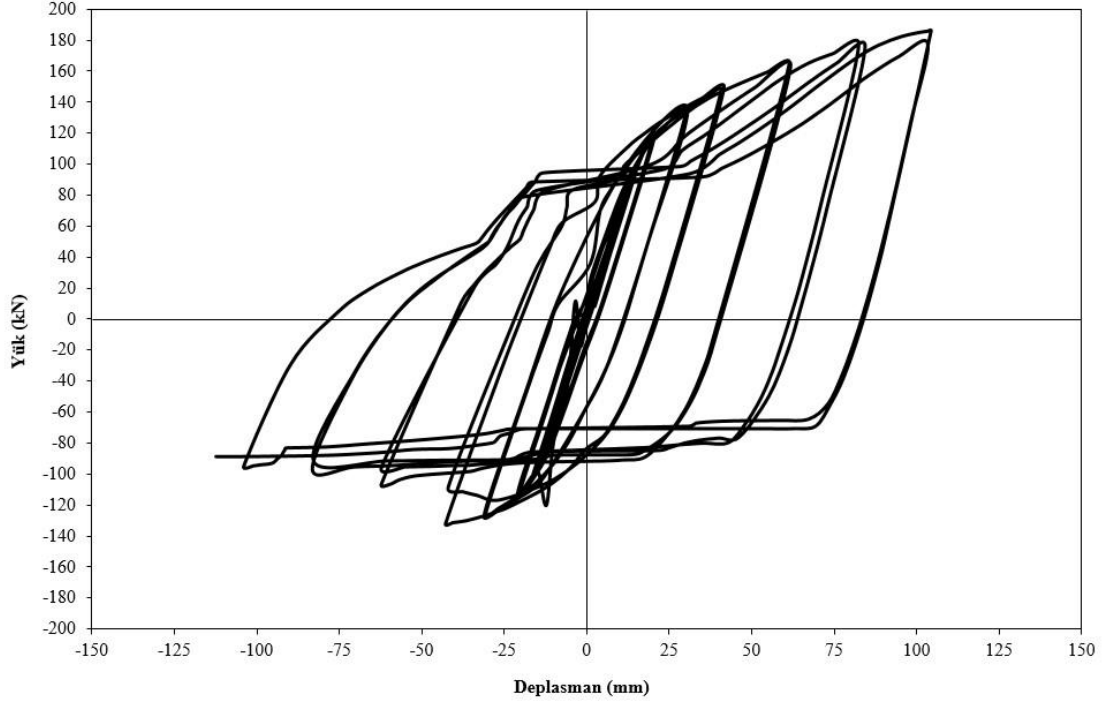


a) EMHF birleşimi Yük – Deplasman grafiği

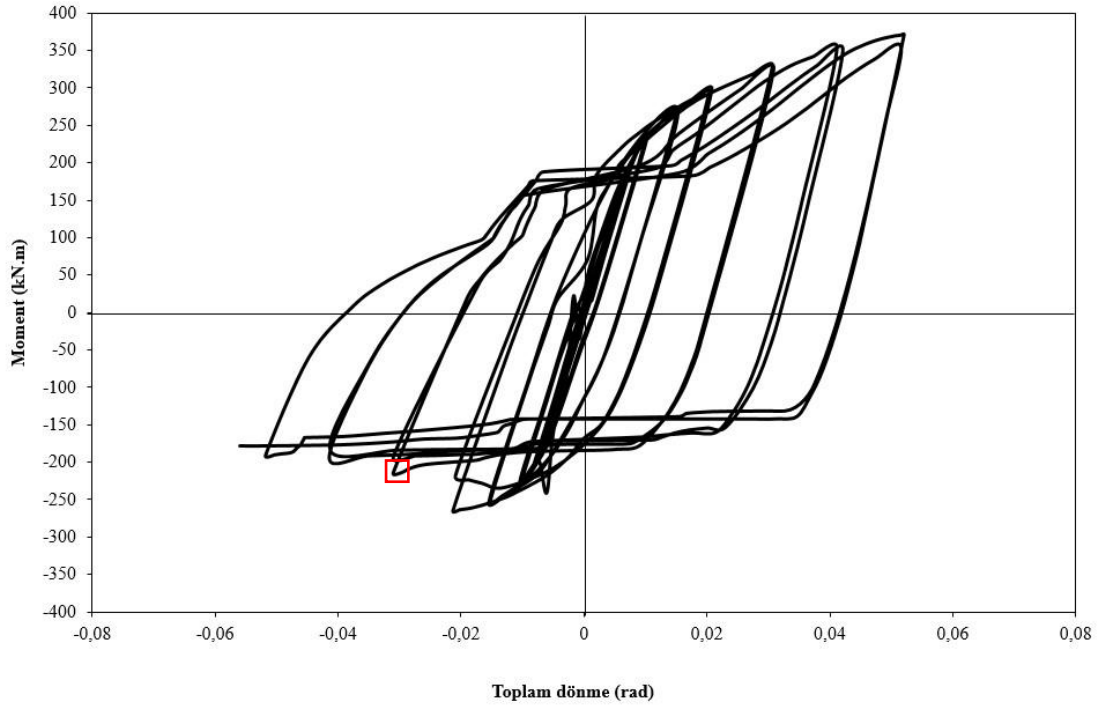


b) EMHF birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.41. EMHF birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.



a) EMTF birleşimi Yük – Deplasman grafiği



b) EMTF birleşimi Moment – Dönme grafiği

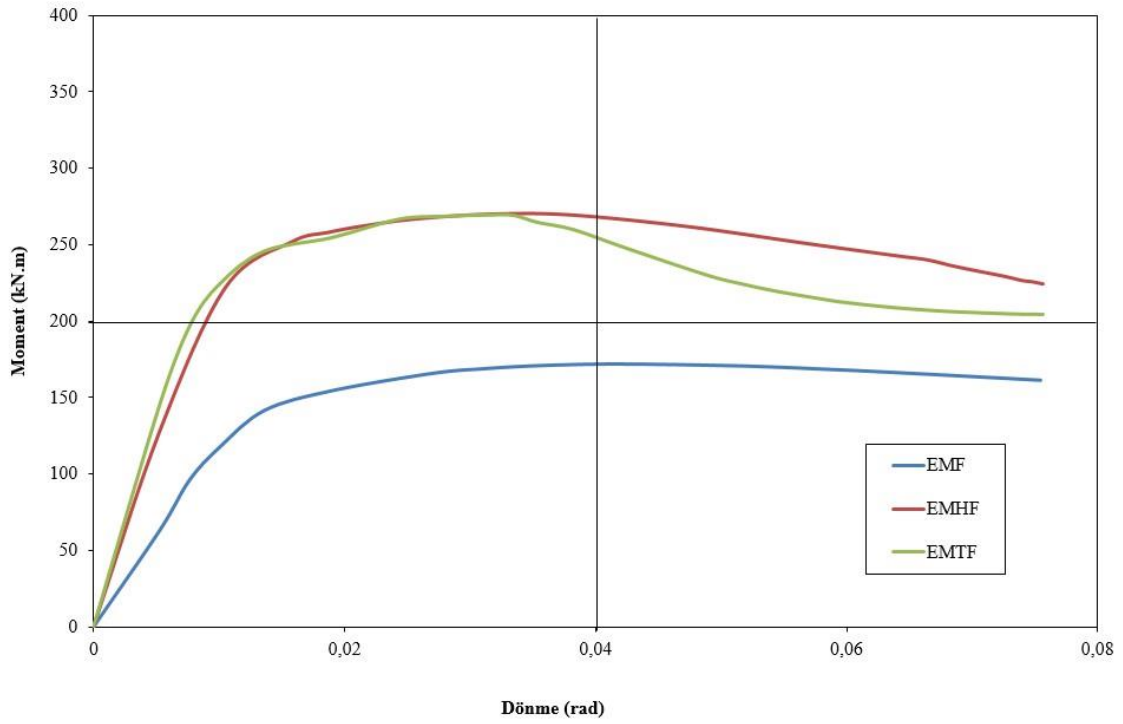
Şekil 5.42. EMTF birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

Çizelge 5.7. Moment aktaran (rijit) birleşimlerde çevrimsel yükleme sonucunda ulaşılan maksimum momentten sonra, okunan moment değerleri

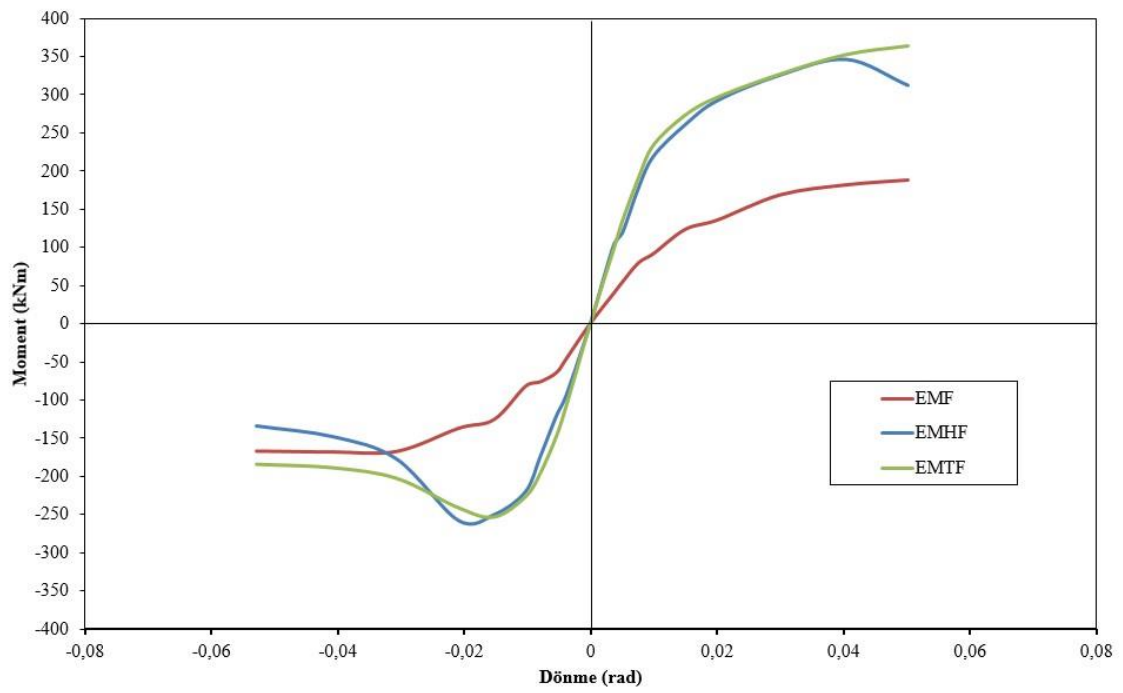
Dönme	EMF birleşimi		EMHF birleşimi		EMTF birleşimi	
	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})
0,04	196,424	100	-	-	-	-
-0,04	167,768	85,411	-	-	-	-
0,05	190,634	97,052	361,38	100	371,92	100
-0,05	168,068	85,564	135,848	37,591	190,82	51,307
0,05	186,418	94,906	262,44	72,622	354,72	95,375
-0,05	166,524	84,778	133,342	36,898	178,152	47,901

Monotonik yükleme altında moment aktaran birleşim örneklerine uygulanan 150 mm'lik düşey yer değiştirme değerine (dönme değeri %7,5) kadar ulaşırken, çevrimsel yükleme altında bu birleşimler 40 adımlık çevrimi tamamlayıp %5 dönme değerine ulaşılmıştır. EMHF ve EMTF birleşim örneklerinin %5 dönme değerinin ilk çevriminde göçme durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. Moment aktaran birleşimlerin birbirlerine göre performanslarını karşılaştırmak için Şekil 5.43.'de birleşim örneklerinin monotonik yükleme altındaki moment – dönme grafikleri ve çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altındaki moment – dönme grafiklerinden elde edilen dayanım zarfı grafikleri verilmektedir.

Monotonik yükleme altında yaklaşık %1 dönme değerinden sonra, EMHF birleşiminin taşıdığı moment değeri, EMTF birleşiminin taşıdığı moment değerine ulaşmış ve bu dönme değerinden sonra yaklaşık %3 dönme değerine kadar aynı seviyede ilerlediği görülmektedir. %3 dönme değerinden sonra EMTF birleşimi örneğinin taşıdığı moment kapasitesinde azalma görülmektedir. EMF birleşiminin, EMHF ve EMTF birleşimlerine göre moment taşıma kapasitesinin daha az olduğu görülmekte ve moment taşıma kapasitesinde ani azalmalar olmadığı görülmüştür. Çevrimsel yükleme altında da EMF birleşiminin, EMHF ve EMTF birleşimlerine göre moment taşıma kapasitesinin daha az olduğu görülmektedir. EMHF ve EMTF birleşimleri başlangıçtan %4 dönme değerine kadar ve başlangıçtan yaklaşık %-2 dönme değerine kadar taşıdıkları moment değerlerinin yaklaşık olarak aynı değerlerde olduğu görülmektedir. %4 ve %-2 dönme değerlerinden sonra EMHF birleşiminin moment değeri, EMTF birleşiminin moment değerlerine göre azalmaya başladığı görülmektedir.



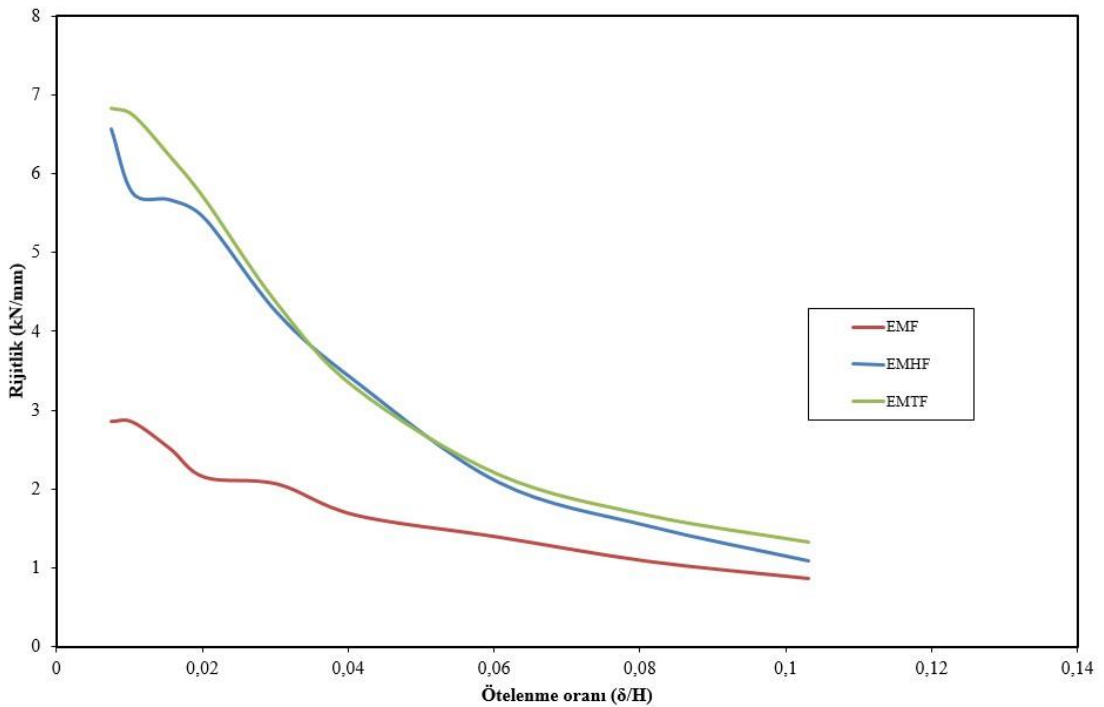
a) Monotonik yük uygulanan moment aktaran (rijit) birleşim örnekleri



b) Çevrimsel yük uygulanan moment aktaran (rijit) birleşim örnekleri

Şekil 5.43. Çevrimsel ve monotonik yükleme altında moment aktaran (rijit) birleşimlerin dayanım zarfı grafikleri.

Moment aktaran (rijit) birleşimlerin çevrimsel yüklemeler altında kuvvet – yer değiştirme değerlerinden elde edilen rijitlik azalım eğrileri Şekil 5.44.’de gösterilmektedir. Birleşimlere uygulanan artan yük çevrim değerlerinin etkimesi ile rijitlik değerlerinde azalmalar meydana geldiği görülmektedir. En büyük rijitliğe sahip olan EMTF birleşimi yaklaşık olarak %4 ötelenme oranı değerinde, EMHF birleşimi ile aynı değer seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yaklaşık olarak %6 ötelenme oranına kadar bu durum aynı seviyelerdedir. %6 ötelenme oranından sonra EMHF birleşim rijitliğinin, EMTF birleşim rijitliğinin altına düştüğü görülmektedir. En az rijitliğe sahip olan birleşim ise EMF birleşimi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.44. Birleşimlerin rijitlik azalım grafikleri.

5.2.2.3. Moment Aktaran Birleşimlerin Değerlendirilmesi

İncelenen üç adet moment aktaran bileşim örneklerinde, EMHF ve EMTF birleşimlerinde oluşan plastik mafsalları ve hasar durumları alın plakasından uzakta, gusenin berkitme plakasının bittiği yerde kiriş başlıklarında ve gövdesinde meydana gelmektedir. EMF birleşim örneğinde ise alın plakasında kiriş başlıkları ile birleşim yerlerinde ve kirişte alın plakasına yakın yerlerde başlık ve gövdesinde meydana gelmektedir. Burada hasar durumlarının kolon – kiriş birleşimlerinden uzakta ve plastik

mafsalın kirişte meydana gelmesi istenen durumdur. EMF birleşimi bu istenen duruma çok uymadığı görülmektedir. EMF birleşimi örneği çevrimsel yüklemeler altında 0,04 radyan dönme değerinin ikinci çevriminde, EMHF ve EMTF birleşimi örneklerinin ise 0,05 radyan dönme değerinin ilk çevriminde göçme durumuna geldiği ve moment taşıma kapasitesinde azalma olduğu görülmektedir.

Birleşimleri moment taşıma kapasiteleri bakımından karşılaştırıldığında, EMHF ve EMTF bileşimlerinin yaklaşık olarak aynı moment taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmekte, EMF birleşiminin moment taşıma kapasitesi ise diğer birleşimlerin moment taşıma kapasitelerinin yaklaşık %54' kadar olduğu görülmektedir.

Birleşimlerin çevrimsel yükleme altında kuvvet – yer değiştirme değerlerinden elde edilen ve başlangıç dönme rijitlik değerleri incelendiğinde, EMTF birleşiminin diğer birleşim örneklerine göre daha fazla rijitliğe sahip olduğu görülmektedir.

Bileşimlerin çevrimsel ve monotonik yüklemeler sonucunda ulaştıkları maksimum moment taşıma kapasiteleri Çizelge 5.8'de verilmiştir. Elde edilen moment taşıma kapasite değerlerine bakıldığında, birleşimlerin çevrimsel (tekrarlı) ve monotonik yüklemeler altındaki moment taşıma kapasitelerinin birbirlerine yakın değerler olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.8. Moment aktaran (rijit) birleşimlere uygulanan yükler altındaki maksimum moment değerleri.

Birleşim	Maksimum moment (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
EMF	171,850	196,424
EMHF	270,320	361,380
EMTF	269,560	371,920

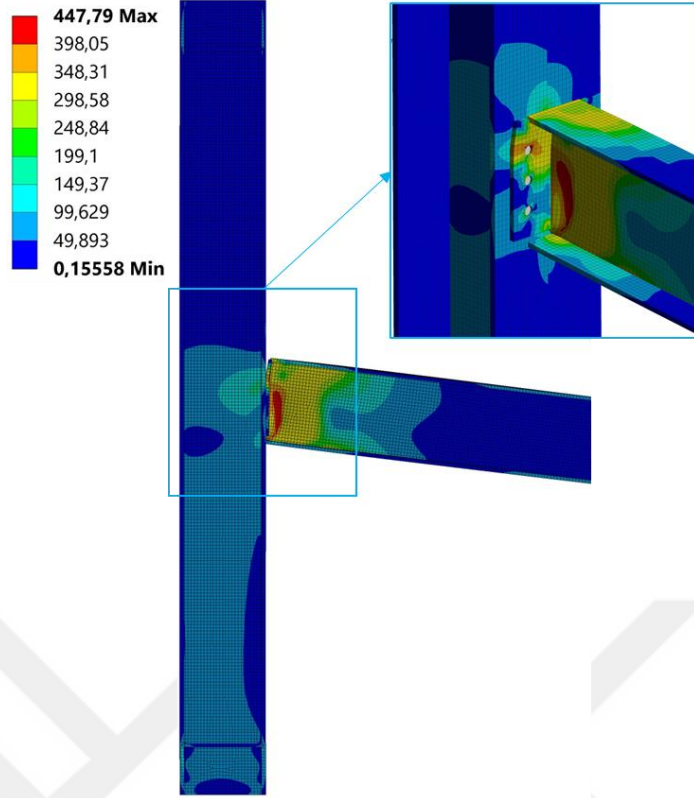
Ele alınan sonuçların çerçevesinde, EMHF ve EMTF moment aktaran birleşim örneklerinin diğer moment aktaran EMF birleşim örneğine göre daha üstün performansa sahip ve güvenilir bir birleşim olduğu söylenebilir.

5.2.3. Yarı – Rijit Birleşimler

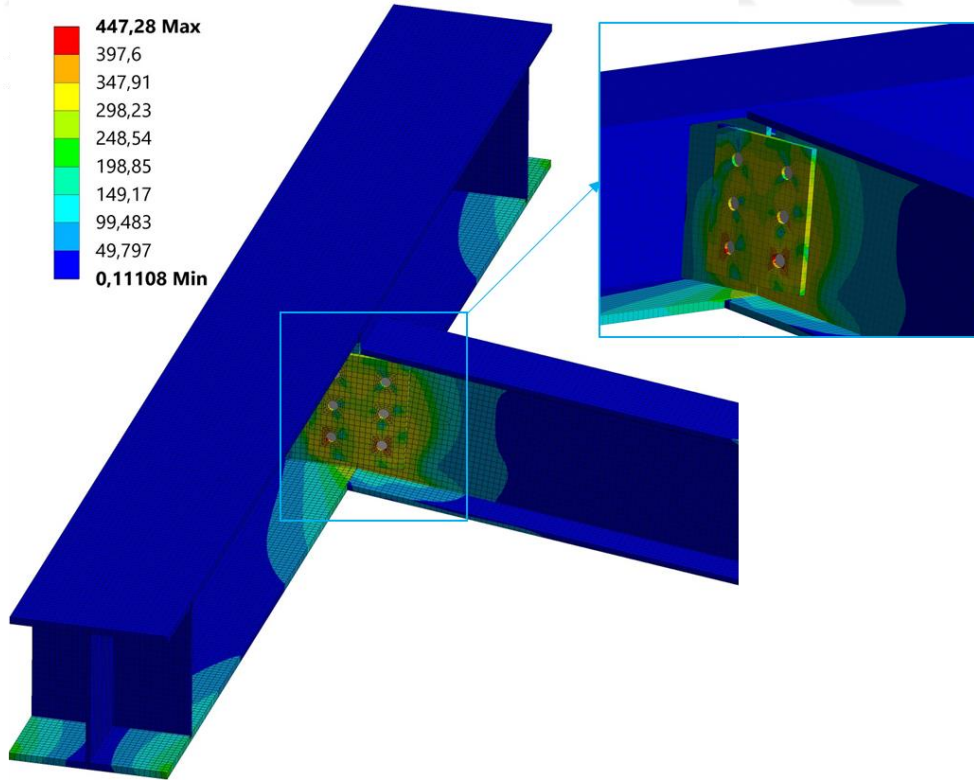
Tezin bu bölümünde yarı – rijit, bulonlu alın levhalı (EP) birleşim örneği, bulonlu bağlantı levhalı (kiriş – kiriş) (DS) birleşim örneği, bulonlu bağlantı levhalı (kolon – kiriş) (DSD) birleşim örneği ve bulonlu alın levhalı h şekilli gövde berkitmeli (EPW) birleşim örneklerinin sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır.

5.2.3.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri

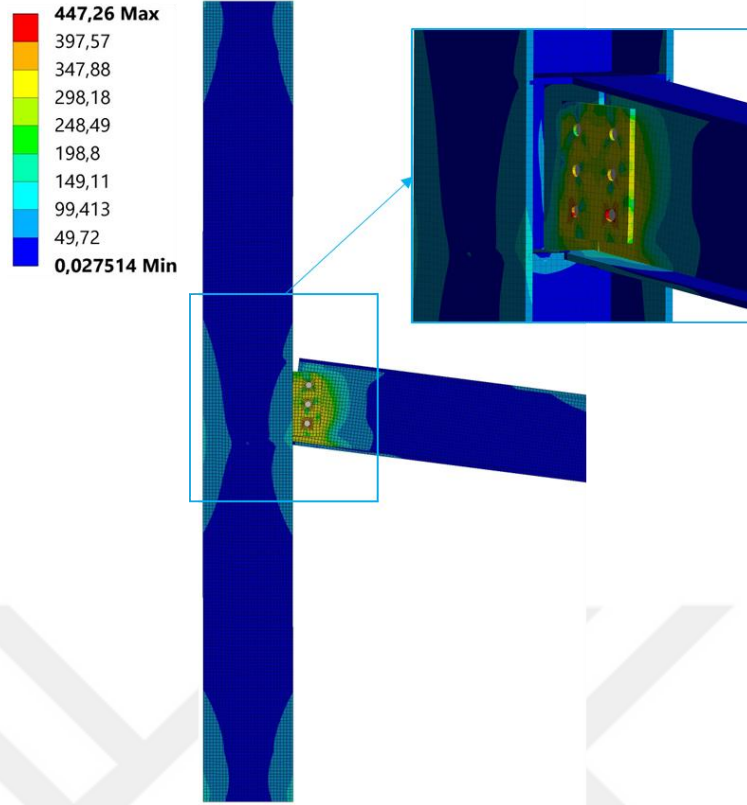
Yarı – rijit bağlantılı her bir birleşimin çevrimsel ve monotonik yüklemeler altında sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Monotonik yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından yer çekimi yönünde düşey doğrultuda 150 mm’lik bir deplasman uygulanmıştır. EP, DS, DSD ve EPW birleşimleri bu 150mm’lik yer değiştirme değerine kadar yükü taşıyabildikleri görülmüştür. Çevrimsel yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından uygulanan 32 adımdan oluşan düşey deplasman yüklemesinin en büyük değeri 60 mm’dir. EP, DS, DSD ve EPW birleşimleri uygulanan çevrimsel yükleme programını tamamlayabildikleri görülmüştür. EP birleşimi kopma gerilmesine ulaştığında oluşan hasar durumu birleşime yakın ve kiriş gövdesinde meydana geldiği görülmüştür. DS ve DSD bileşimleri kopma gerilmesine ulaştıklarında oluşan hasar durumlarına bakıldığında birleşimde kesme plakalarında ve bulon deliklerinde meydana geldiği görülmüştür. EPW birleşim örneğinde ise hasar durumları kesme plakasında bulon deliğinde, kiriş başlık ve gövdelerinde meydana geldiği görülmektedir. Her dört yarı – rijit birleşimde, kiriş gövdelerinde ve kesme plakalarında burkulma, bulon deliklerinin çevrelerinde gerilme yığılması meydana geldiği görülmektedir. EPW birleşiminde kiriş başlıklarında hasar durumu ve burkulma meydana geldiği görülmektedir. Şekil 5.45. – Şekil 5.48.’de yarı – rijit birleşimlerin monotonik yükleme altında, Şekil 5.49. – Şekil 5.52.’de çevrimsel yükleme altında deformasyona uğramış görünüşlerinin üzerinden eş değer gerilme (von-Mises stress) dağılımları verilmektedir.



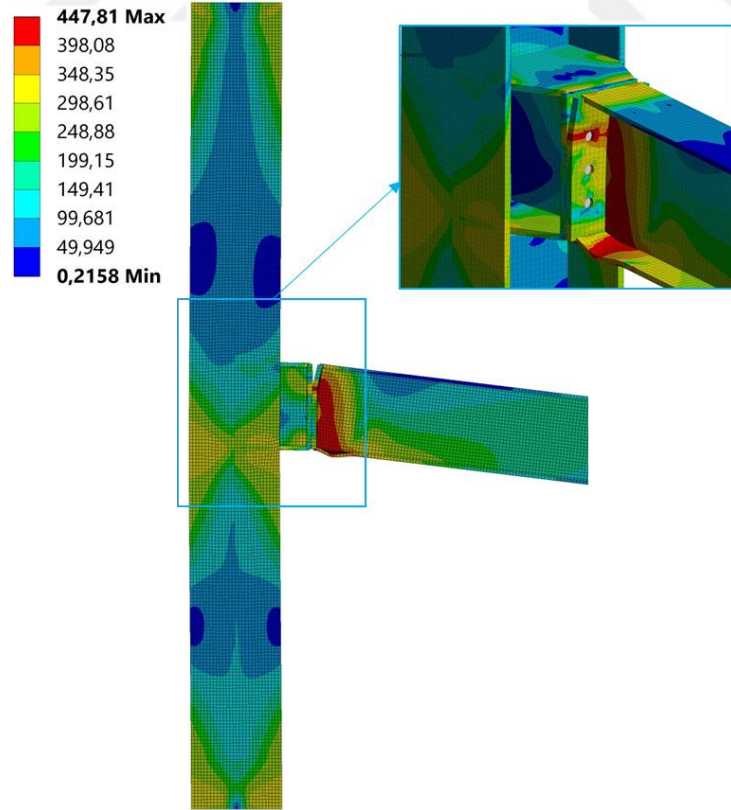
Şekil 5.45. Monotonik yük altında EP birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



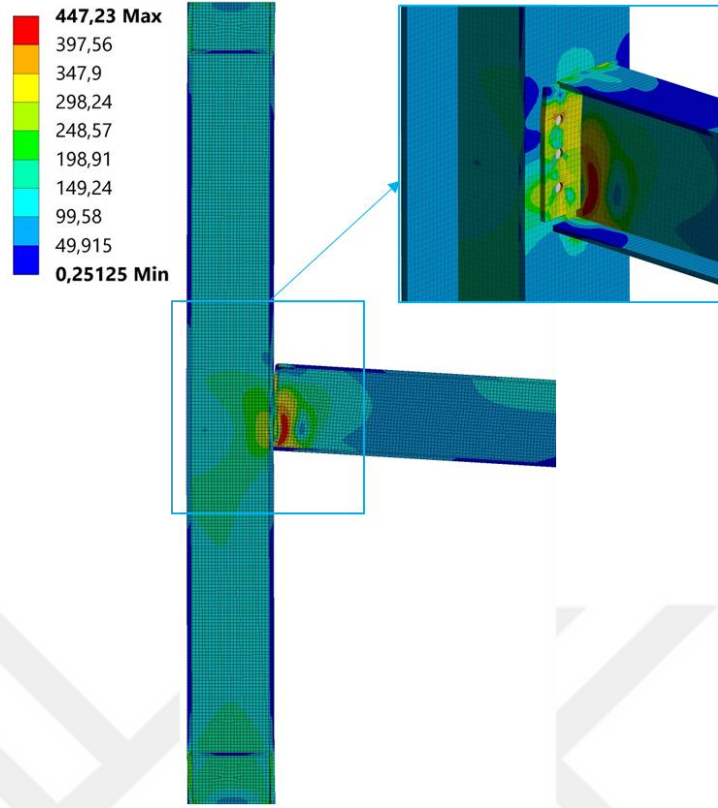
Şekil 5.46. Monotonik yük altında DS birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



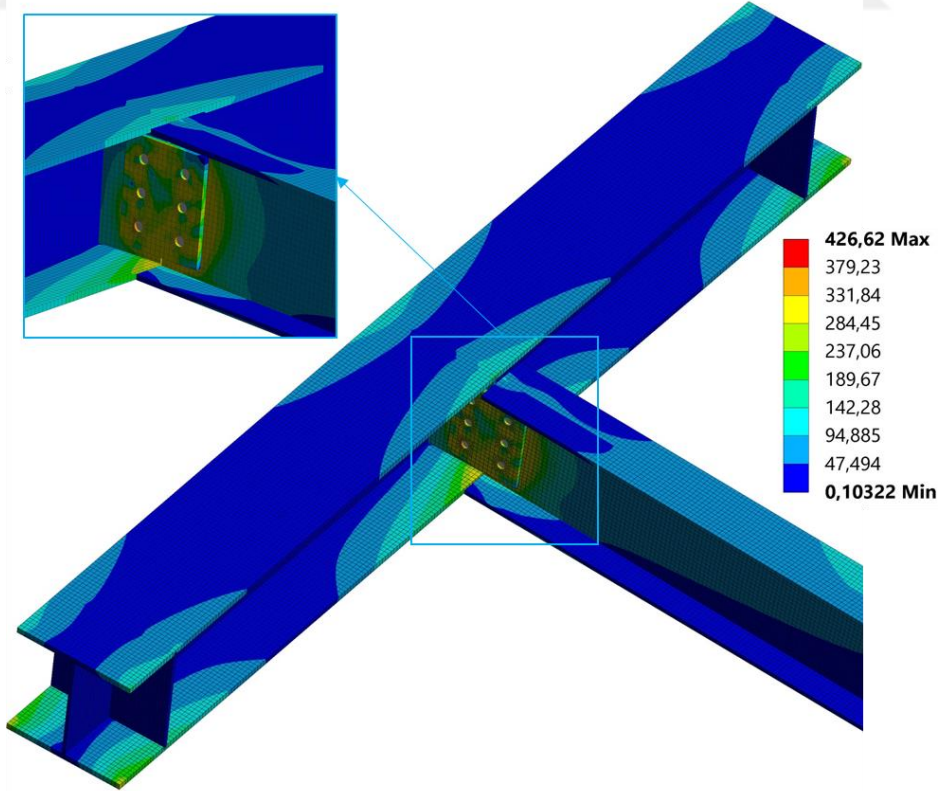
Şekil 5.47. Monotonik yük altında DSD birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



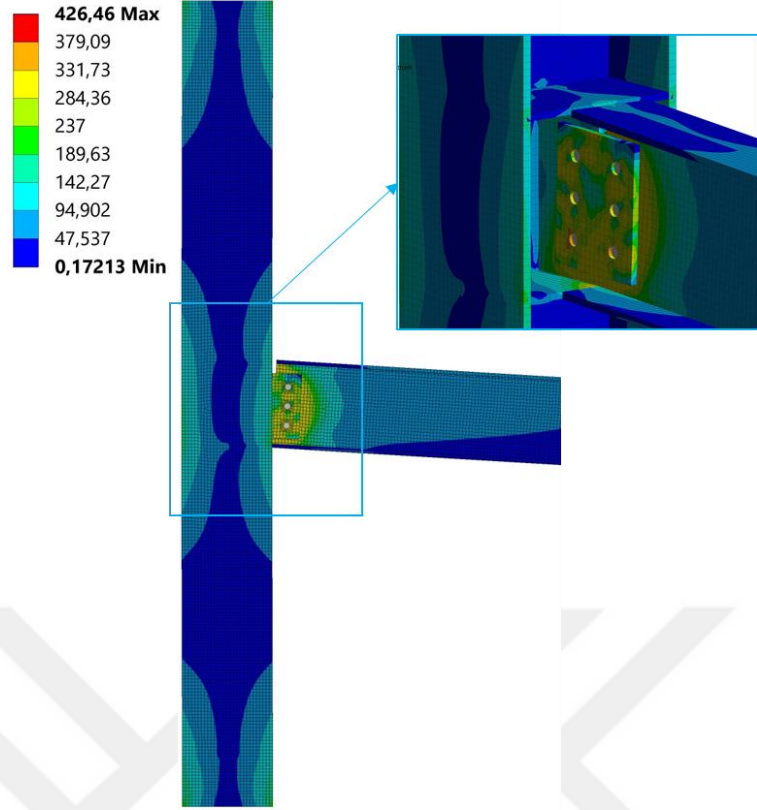
Şekil 5.48. Monotonik yük altında EPW birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



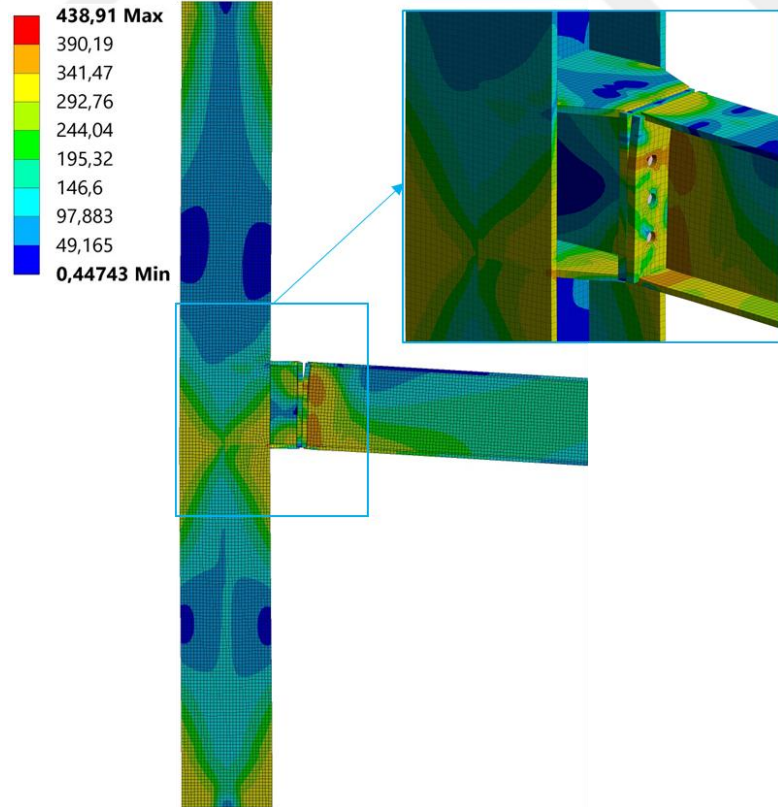
Şekil 5.49. Çevrimsel yük altında EP birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



Şekil 5.50. Çevrimsel yük altında DS birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



Şekil 5.51. Çevrimsel yük altında DSD birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.



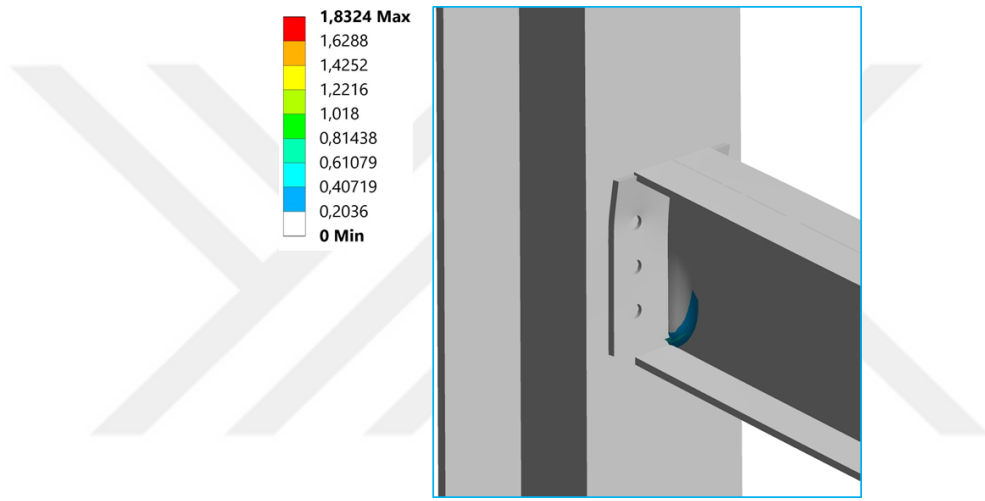
Şekil 5.52. Çevrimsel yük altında EPW birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.

Yarı – rijit birleşimlerin monotonik yükleme altındaki analiz sonuçları, hasar ve plastik mafsallın oluştuğu yerler Şekil 5.45. – Şekil 5.48’de görüldüğü üzere, EP birleşiminde plastik mafsall kiriş gövdesinde meydana gelmesine rağmen alın levhasında da delik çevresinde gerilme yığılmaları ve kalıcı şekil değiştirmeler oluştuğu görülmektedir. Kiriş gövdesinde oluşan plastik mafsall kolon başlığı yüzeyinden yaklaşık olarak 45 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. DS ve DSD birleşimlerinde plastik mafsallın kesme plakasında ve delik çevrelerinde meydana geldiği görülmektedir. EPW birleşiminde ise hasar durumu kiriş başlığında, gövdesinde ve alın levhasında bulon deliklerinin çevresinde burkulma meydana geldiği görülmektedir. Kirişte oluşan plastik mafsall alın levhasından yaklaşık olarak 75 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. Çevrimsel yükleme altındaki analiz sonuçları, hasar ve plastik mafsallın oluştuğu yerler Şekil 5.49. – Şekil 5.52.’de görüldüğü üzere, EP birleşiminde plastik mafsall kiriş gövdesinde oluşmuş fakat alın levhasının da zorlandığı ve kalıcı şekil değiştirmeler oluştuğu görülmektedir. Monotonik yüklemeye göre kiriş gövdesinde oluşan plastik mafsallın daha geniş alanda meydana geldiği görülmüştür. Kirişte oluşan plastik mafsall alın levhasından yaklaşık olarak 50 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. DS ve DSD birleşimlerinde plastik mafsallın kesme plakasında ve delik çevrelerinde meydana geldiği ve bu birleşimlerin monotonik yüklemeye göre kesme plakası ve delik çevrelerinin daha az zorlandığı görülmektedir. EPW birleşiminde ise hasar ve plastik mafsall kiriş başlığında, gövdesinde, alın plakası delik çevrelerinde ve birleşimin alt plakasının kolonla temasta olduğu kolon başlığında olduğu görülmektedir.

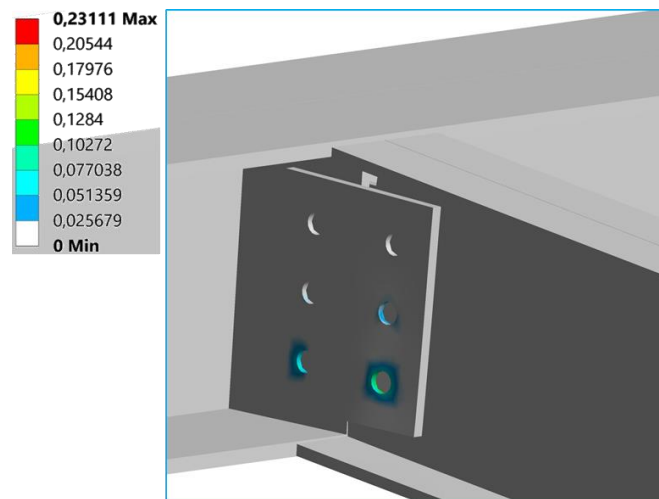
Monotonik yükleme altında EP birleşimli örnekte kiriş gövdesinde meydana gelen burkulmanın, çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında oluşan burkulmanın yaklaşık olarak aynı yerde meydana geldiği ve benzer şekilde hasar durumları olduğu görülmektedir. DS ve DSD birleşim örneklerinde çevrimsel yükleme altındaki bulon delik çevrelerinde meydana gelen hasarın, monotonik yüklemenin sonucunda oluşan hasarlardan daha az olduğu görülmektedir. EPW birleşim örneğinde ise çevrimsel yükleme altında meydana gelen gerilme dağılımı, monotonik yükleme altında oluşan dağılımlara göre daha fazla olduğu ve kolon başlığında da gerilmelerin arttığı görülmüştür.

Birleşimlerde meydana gelen hasar durumlarının ve oluşan plastik mafsalların oluştuğu bölgelerin daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi için eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme durumların değerlendirilmelidir. Yarı – rijit birleşimlerin monotonik yükleme altında oluşan bu dağılımları Şekil 5.53. – Şekil 5.56.’da, çevrimsel yükleme altında oluşan bu dağılımları Şekil 5.57. – Şekil 5.60.’da verilmektedir. EP

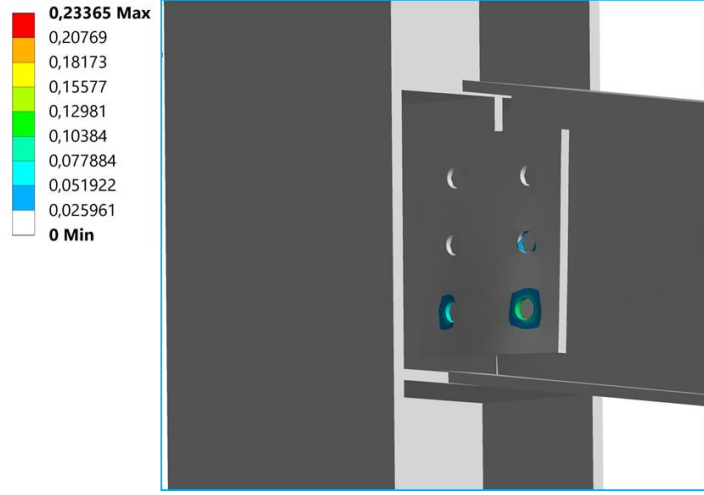
birleşiminde oluşan hasar durumunun benzer olduğu fakat monotonik yükleme altındaki dağılımı kiriş gövdesinde büyük şekil değişiklikleri ile görülürken, aynı birleşimin çevrimsel yükleme altındaki dağılımında bu durum görülmemiştir. DS ve DSD birleşimlerinde monotonik ve çevrimsel her iki yükleme altında da kesme plakalarının bulon delik çevrelerinde bir dağılım görülmekte ve bu dağılım çevrimsel yüklemelerde daha az olduğu görülmektedir. EPW birleşiminde ise çevrimsel yükleme altında oluşan dağılım alın plakasında daha fazla sayıda bulon delikleri etrafında ve kolon başlığında görülürken, aynı birleşimin monotonik yükleme altındaki dağılımında böyle bir durum görülmemiştir.



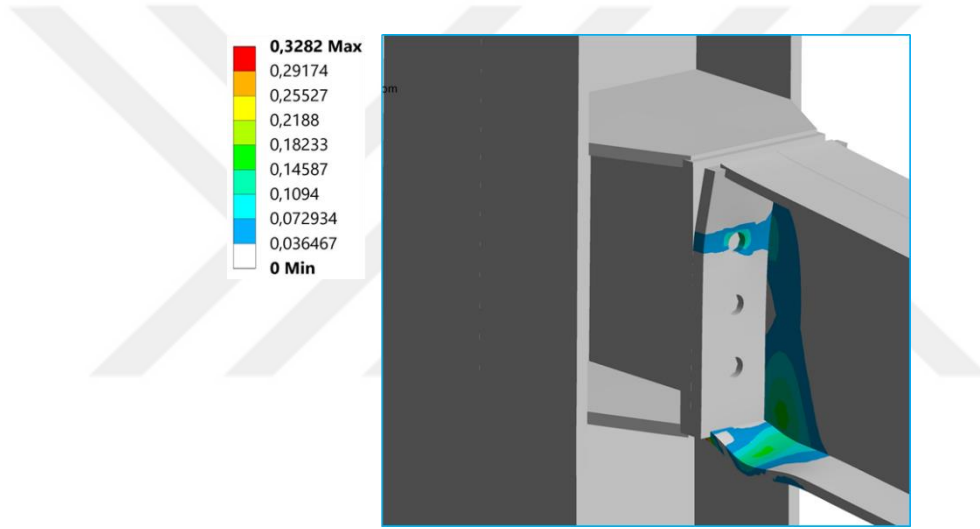
Şekil 5.53. Monotonik yük altında EP birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



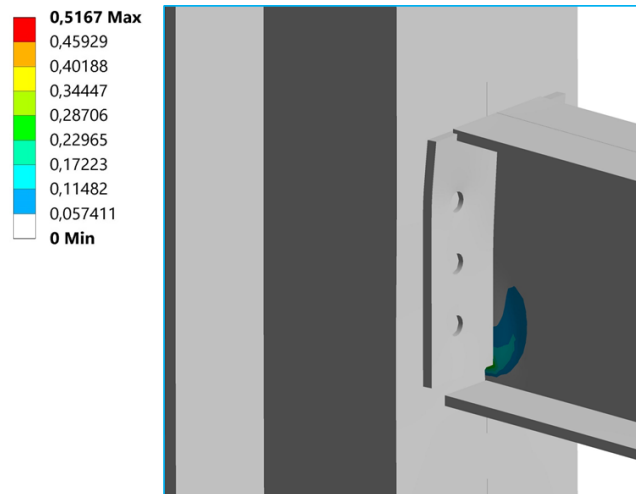
Şekil 5.54. Monotonik yük altında DS birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



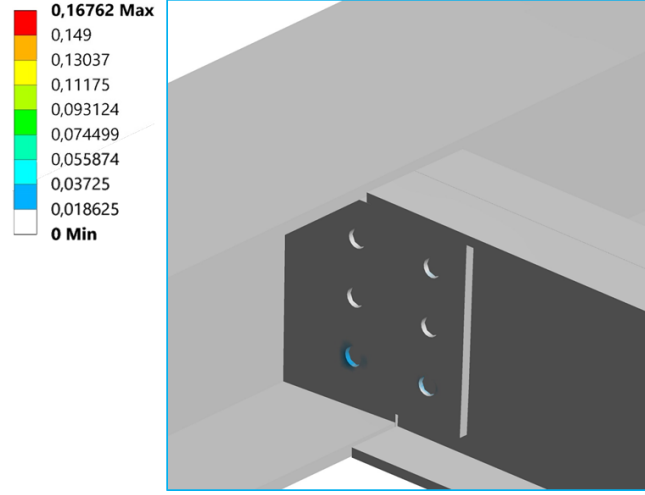
Şekil 5.55. Monotonik yük altında DSD birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



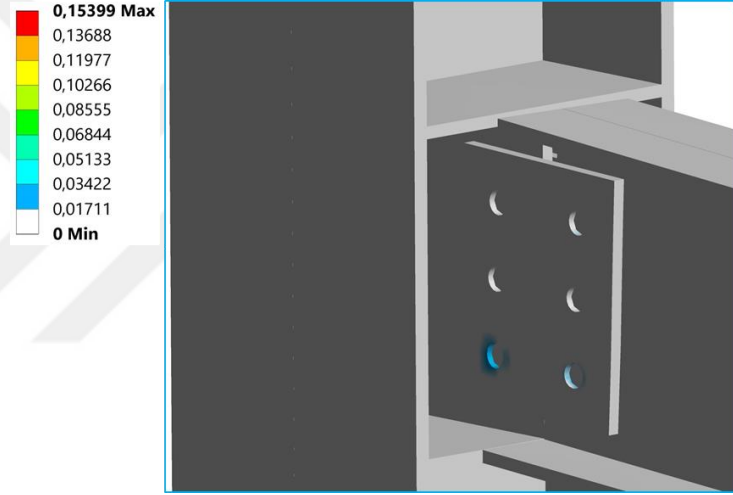
Şekil 5.56. Monotonik yük altında EPW birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



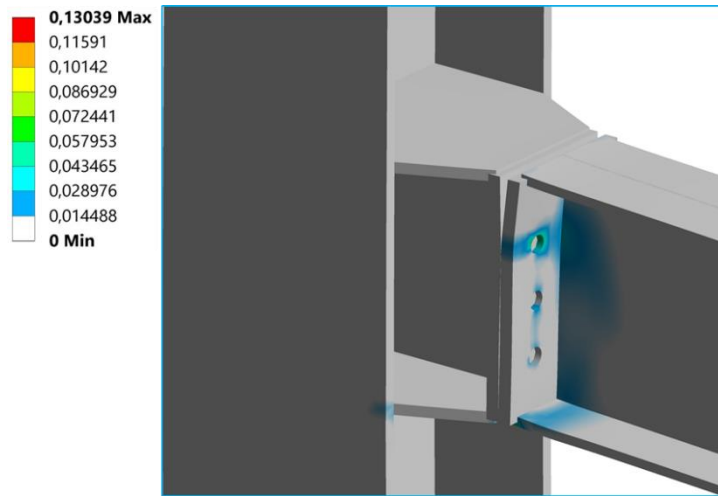
Şekil 5.57. Çevrimsel yük altında EP birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.58. Çevrimsel yük altında DS birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.59. Çevrimsel yük altında DSD birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.60. Çevrimsel yük altında EPW birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.

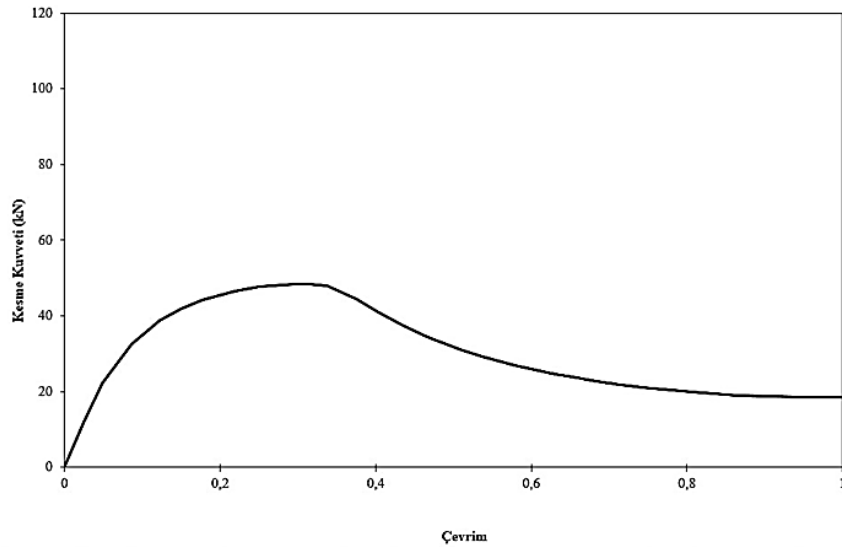
5.2.3.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler

Yarı – rijit birleşimlerin analizinde kiriş yükleme noktasından uygulanan yer değiştirme yüklerinin, aynı yükleme noktasında oluşan tepki kuvvetlerinin monotonik yüklemesi Şekil 5.61.'de çevrimsel (tekrarlı) yüklemesi Şekil 5.62'de gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, birleşimler yaklaşık olarak belirli bir aynı yük adımından sonra taşınan kuvvette azalma olduğu görülmüştür. EP ve EPW birleşim örnekleri çevrimsel yükleme altında aynı yük adımında (15. çevrim) kuvvet taşıma değerlerinde azalmalar görülmeye başlanmış, DS ve DSD birleşim örneklerinde ise çevrimsel yükleme altında kuvvet taşıma değerinin azalmaya başladığı görülmemiştir ve yaklaşık olarak aynı kuvvet taşıma değerlerine sahip oldukları görülmektedir.

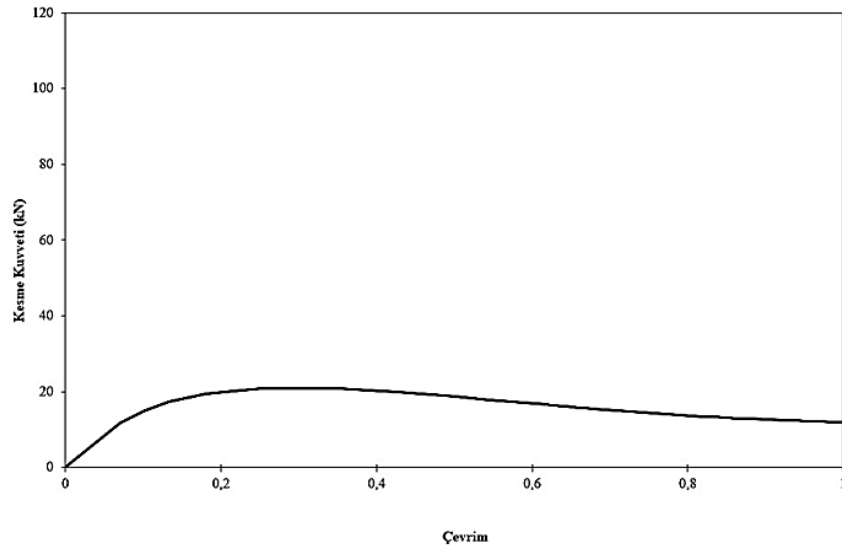
Yarı – rijit birleşim örneklerinin kiriş yükleme noktasında oluşan yük değerleri ile aynı noktada oluşan deplasman değerleri ile elde edilen yük – deplasman grafikleri ve bu grafiklerden elde edilmiş moment – toplam dönme grafikleri, monotonik ve çevrimsel yükler altında meydana gelen durumları EP örnek birleşimi Şekil 5.63.'de, DS örnek birleşimi Şekil 5.64.'de, DSD örnek birleşimi Şekil 5.65'de ve EPW örnek birleşimi için Şekil 5.66.'da gösterilmektedir.

Yarı – rijit elemanlar düğüm noktalarında seçilen birleşim tipine göre birleşimin moment kapasitesi kadar moment aktarırlar. Yarı – rijit birleşimleri hesaplamalarda bir takım kabuller yaparak kolay hesap yapılabilmesi için düğüm noktalarında momentin sıfır olduğu varsayılmaktadır. Yarı – rijit birleşimlerin düğüm noktalarında moment hiçbir zaman sıfır olmaz ama bu moment değerleri küçük değerlerde ve birleşimin moment kapasitesi kadardır. Birleşimlerin tümü uygulanan çevrimsel yükleme altında 0,05 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini tamamlamışlardır. Birleşimler taşıdığı moment değerleri, belli bir adımdan sonra sistem moment taşıma kapasitesine ulaşmış ve geriye kalan çevrimlerde moment değerlerinde azalmaların olduğu görülmüştür. Yarı – rijit birleşimlerde, DS ve DSD birleşim tiplerinin en az moment taşıma kapasitesine sahip yarı – rijit birleşimler olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kiriş başlıklarının serbest gövdesinin ise bulonlu birleşim ile yük aktarıyor olmasıdır. DS ve DSD birleşimlerinin 0,05 radyan dönme değerinin ilk çevrimi olduğu anda maksimum moment taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüş geriye kalan çevrimlerde moment değerlerinde taşıma kapasitesinin altına düştüğü görülmeye başlanmıştır. Kiriş başlıklarının ve gövdesinin alın levhasına kaynaklı olan bulonlu yarı – rijit birleşen EP ve EPW birleşimlerinin moment taşıma kapasitelerinin, DS ve DSD yarı – rijit birleşimlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

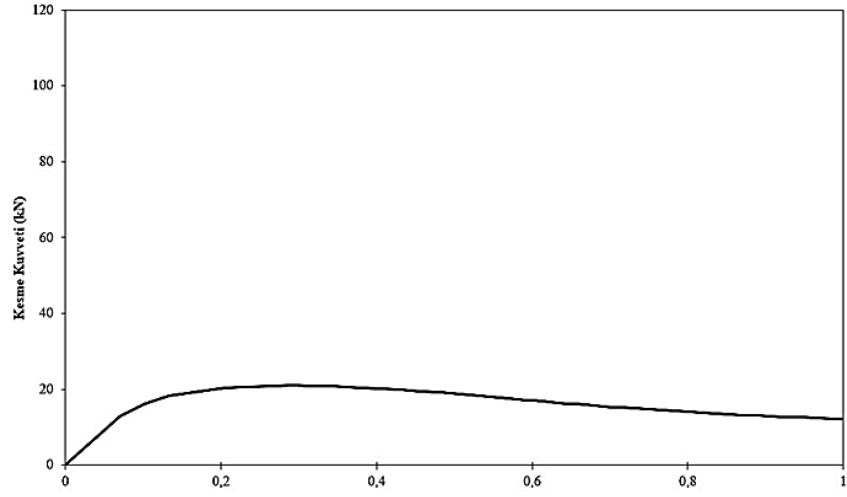
EPW birleşiminin de EP birleşimine göre daha fazla moment taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. EP ve EPW birleşimlerinin 0,05 radyan dönme değerinin ikinci çevrimi olduğu anda maksimum moment taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüş ve geriye kalan çevrimlerde moment taşıma kapasitesi değerlerinin azalmaya başladığı görülmüştür. Birleşimlerin ulaştıkları maksimum momentte sonra çevrimsel yükleme tamamlanana kadar her çevrim sonucunda elde edilen moment değerleri Çizelge 5.9.'da tablo şeklinde verilmiştir.



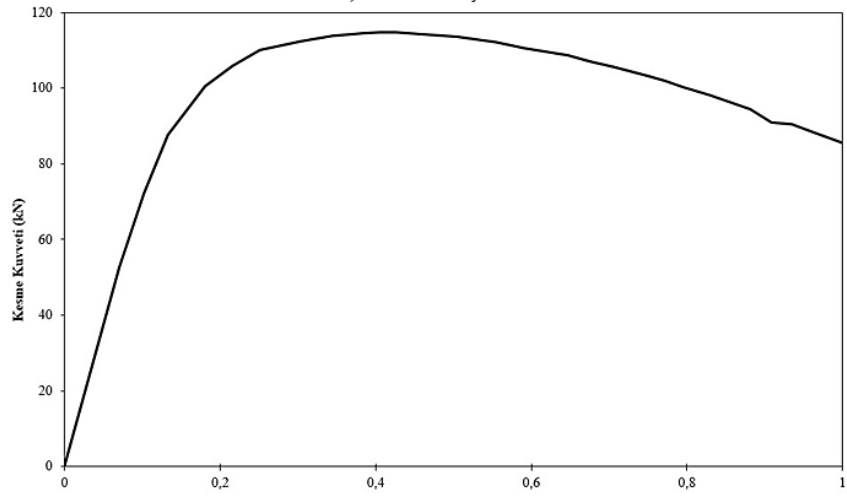
a) EP birleşimi



b) DS birleşimi

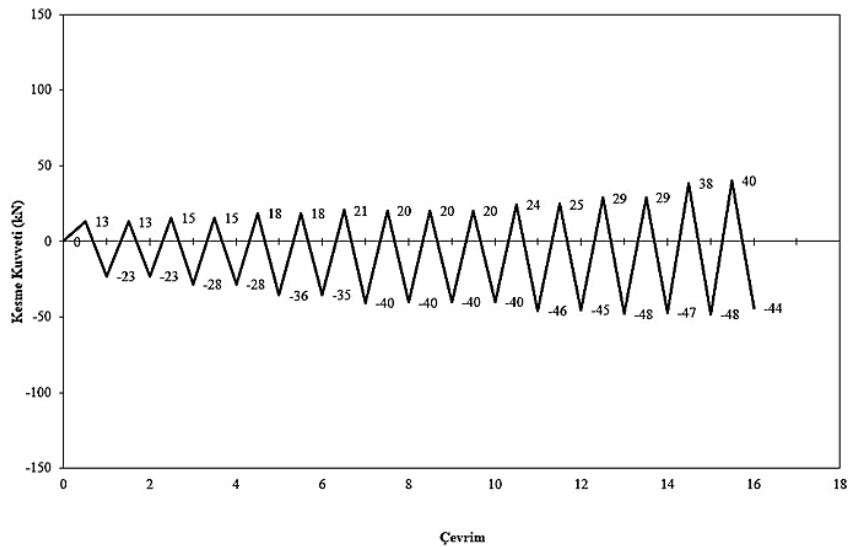


c) DSD birleşimi

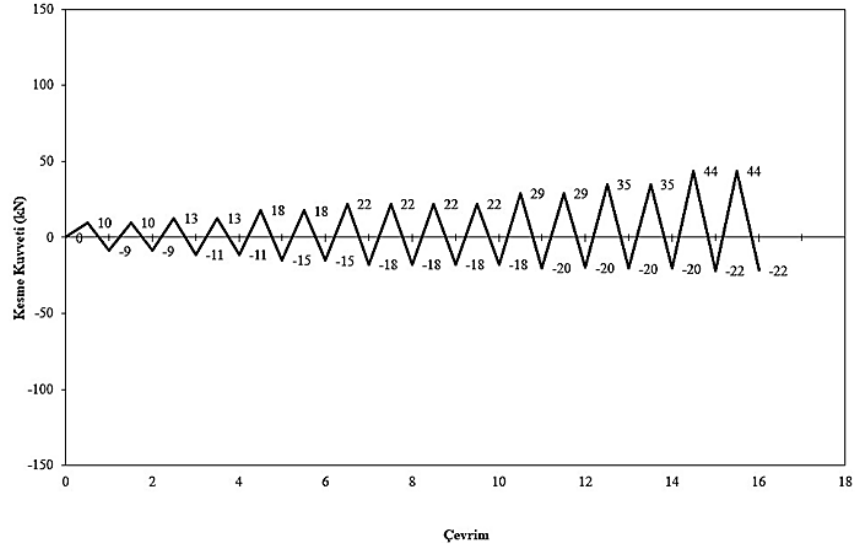


d) EPW birleşimi

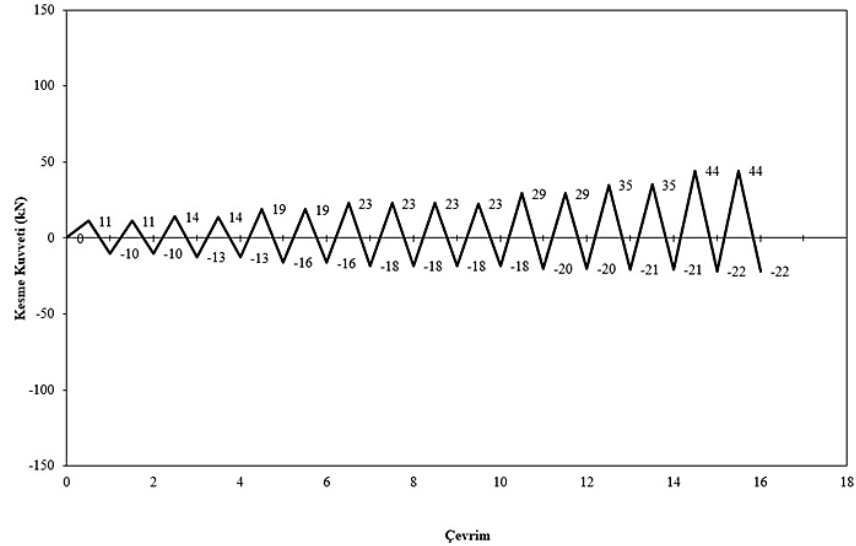
Şekil 5.61. Yarı – rijit birleşimlerin monotonik yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.



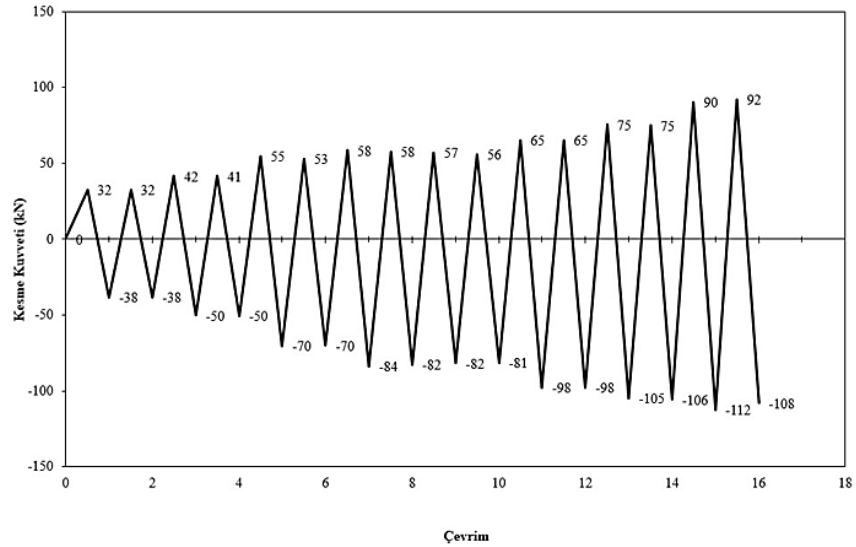
a) EP birleşimi



b) DS birleşimi

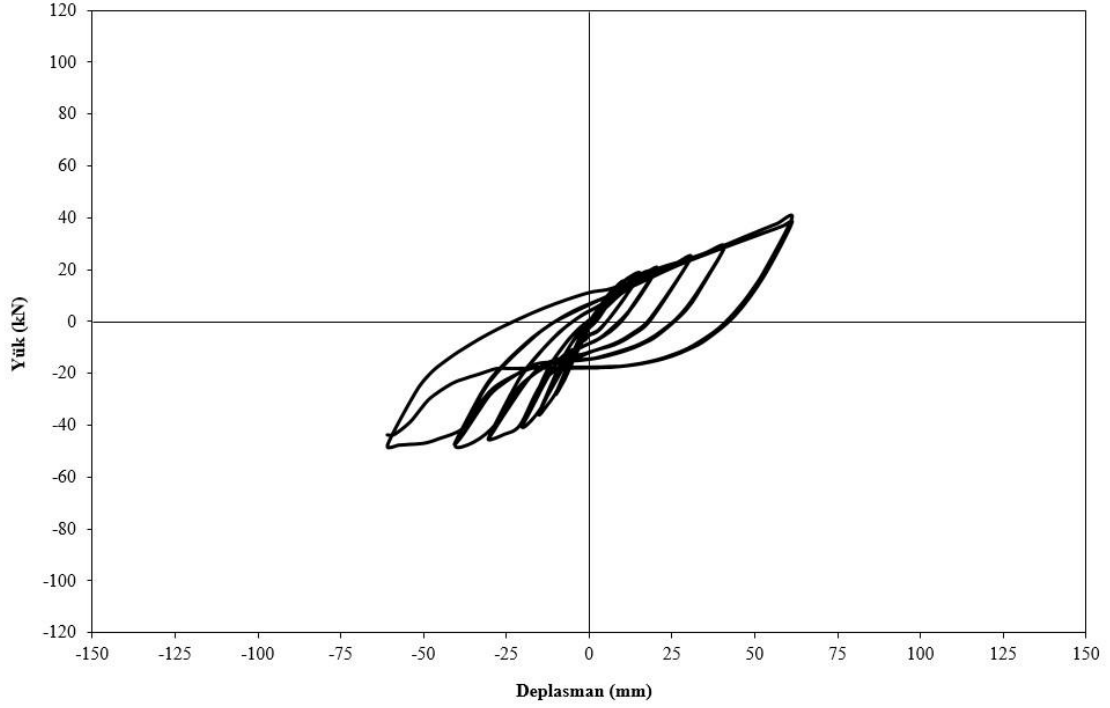


c) DSD birleşimi

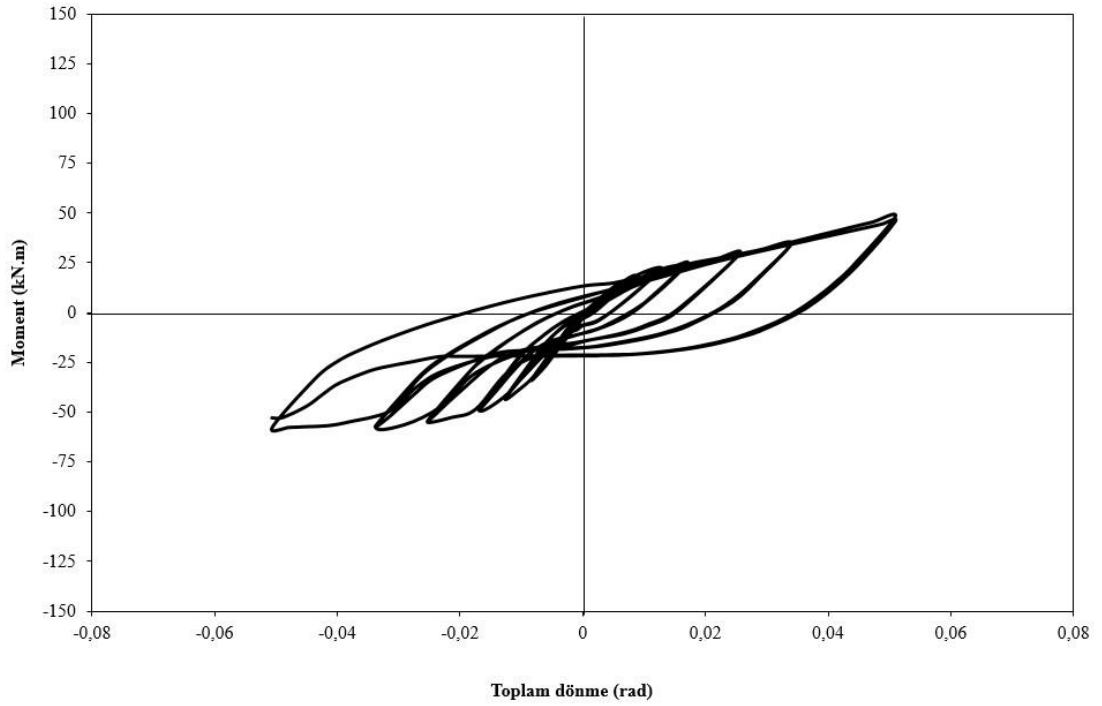


d) EPW birleşimi

Şekil 5.62. Yarı – rijit birleşimlerin çevrimsel yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.

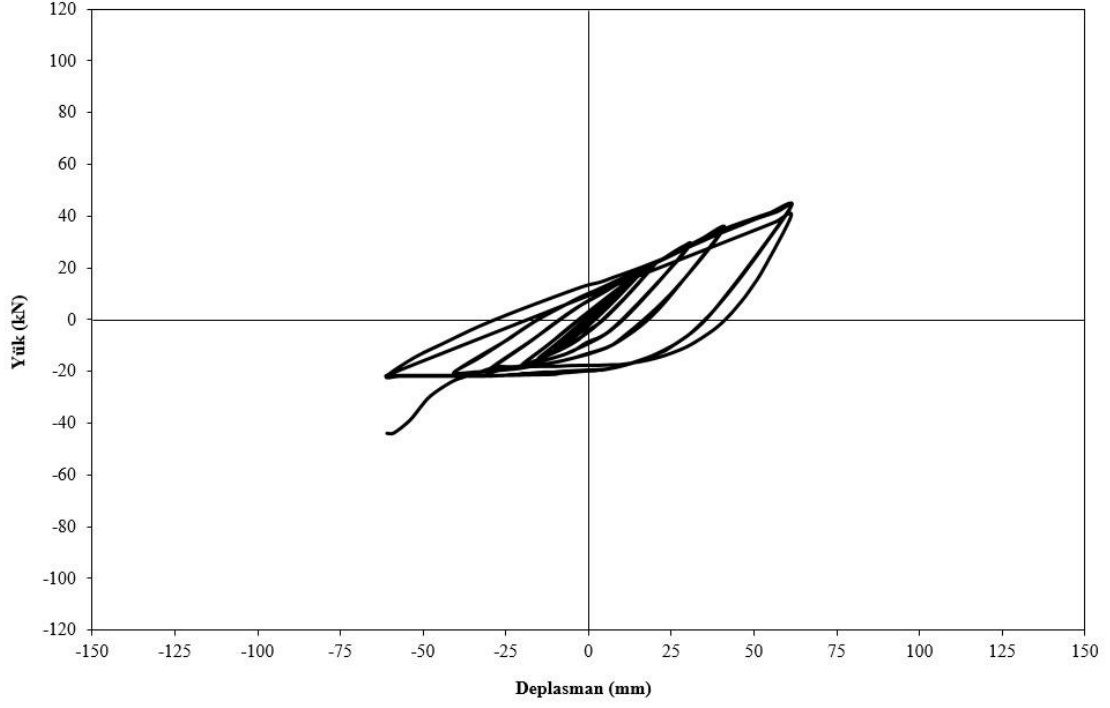


a) EP birleşimi Yük – Deplasman grafiği

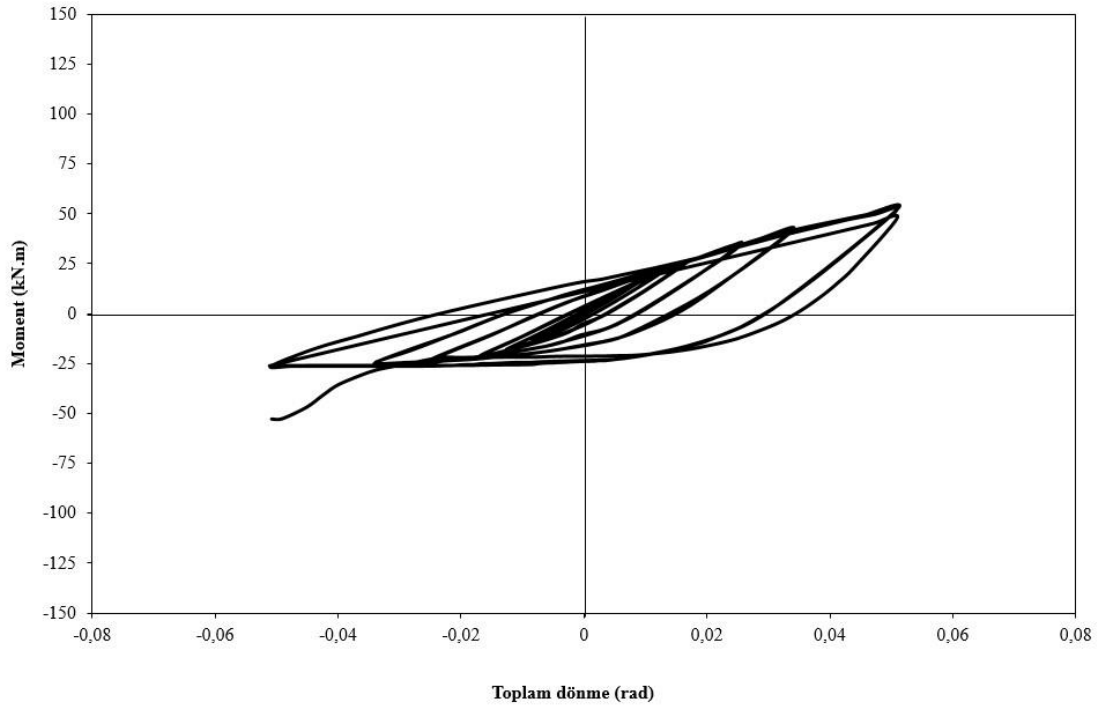


b) EP birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.63. EP birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

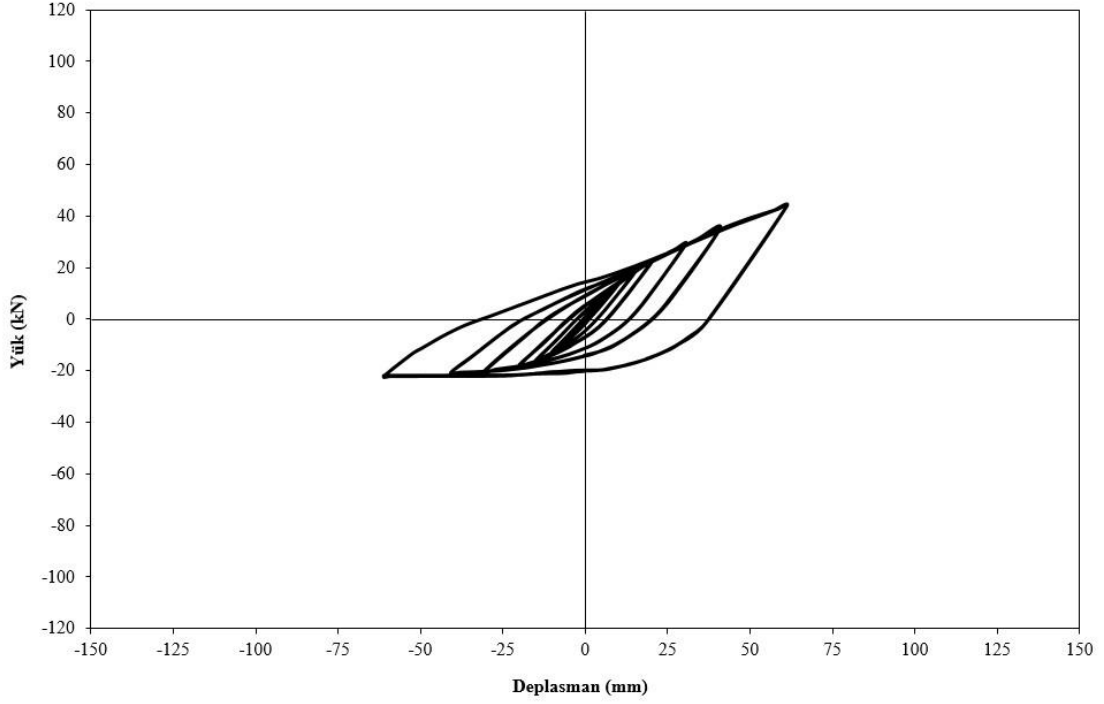


a) DS birleşimi Yük – Deplasman grafiği

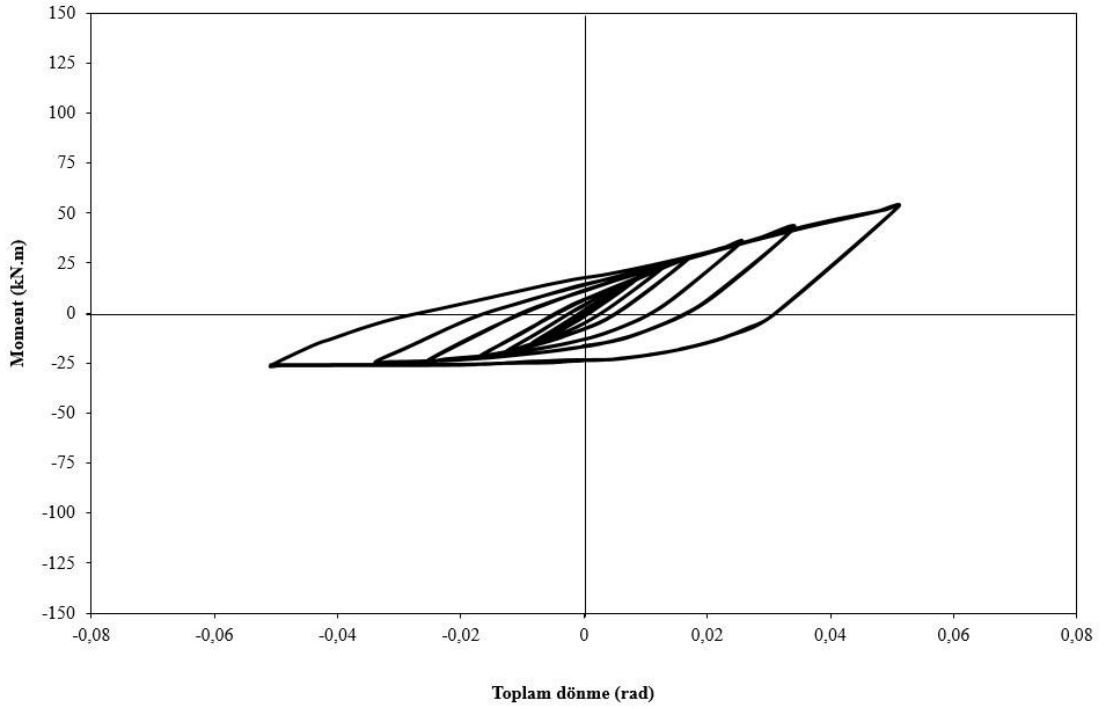


b) DS birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.64. DS birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

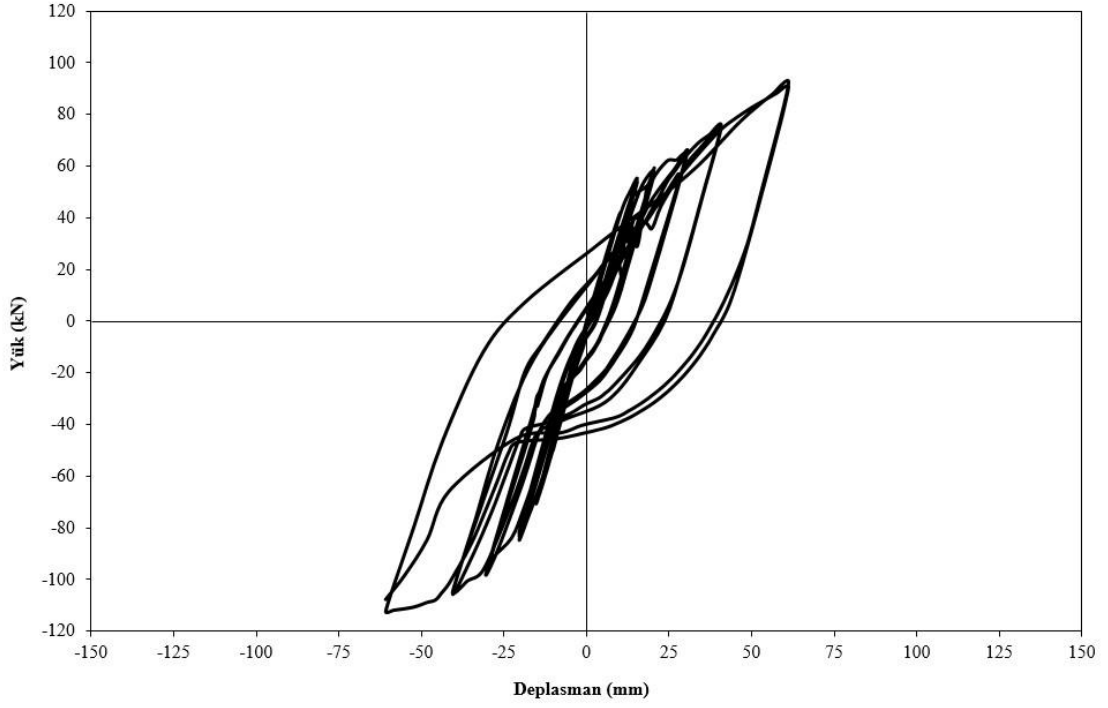


a) DSD birleşimi Yük – Deplasman grafiği

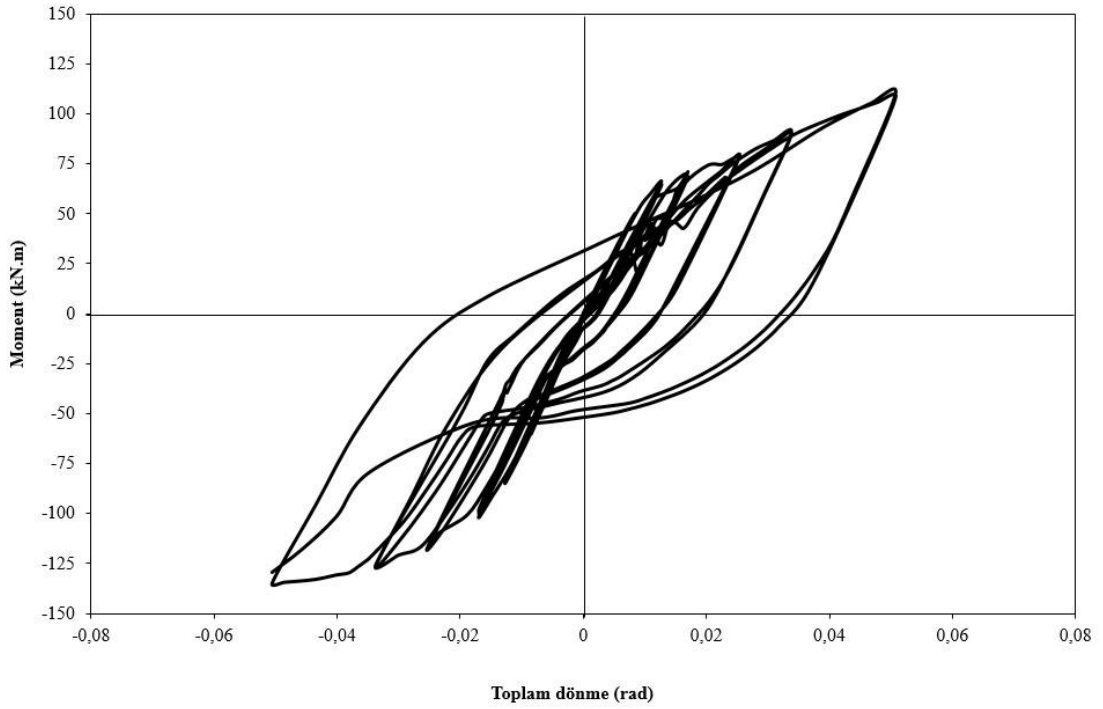


b) DSD birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.65. DSD birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.



a) EPW birleşimi Yük – Deplasman grafiği



b) EPW birleşimi Moment – Dönme grafiği

Şekil 5.65. EPW birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

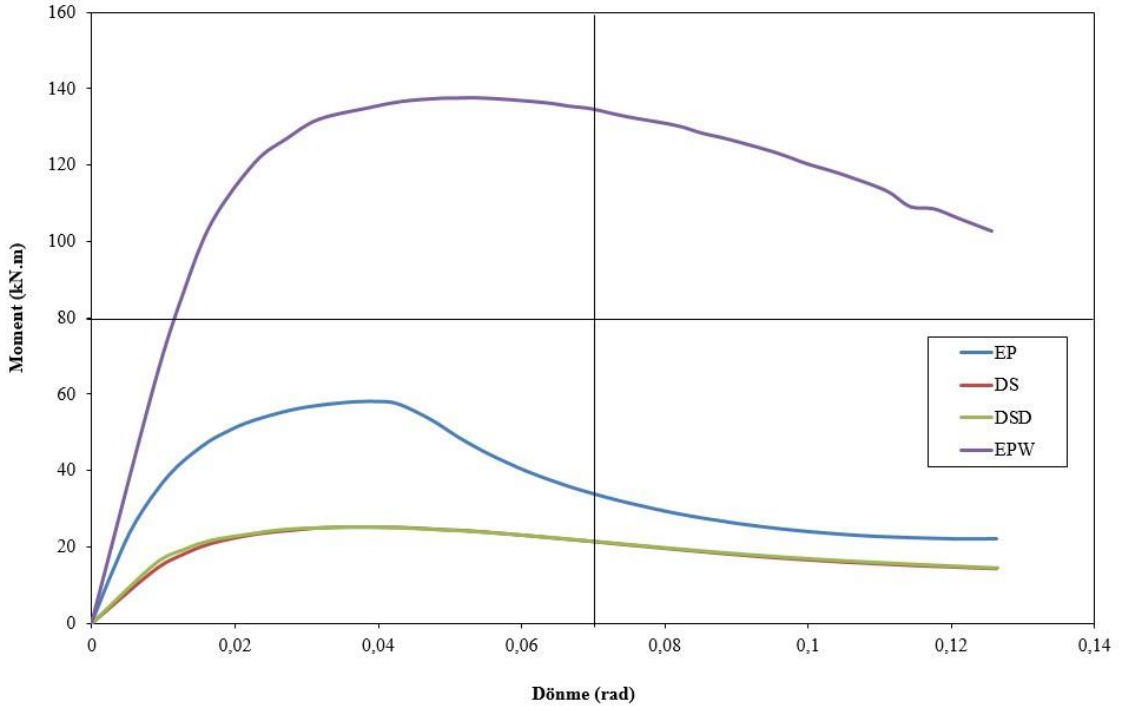
Çizelge 5.9. Yarı - rijit birleşimlerde çevrimsel yükleme sonucunda ulaşılan maksimum momentten sonra, okunan moment değerleri

Dönme	EP birleşimi		DS – DSD birleşimi		EPW birleşimi	
	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})	M _{max} (kNm)	%(M _{max} /M _{kap})
0,05	-	-	52,5 – 52,9	100	-	-
-0,05	57,52	100	26,2 – 26,4	50 – 50	134,92	100
0,05	48,06	83,56	52,5 – 52,9	100 – 100	110,25	81,72
-0,05	52,68	91,58	25,9 – 26,1	50 – 50	129,56	96,03

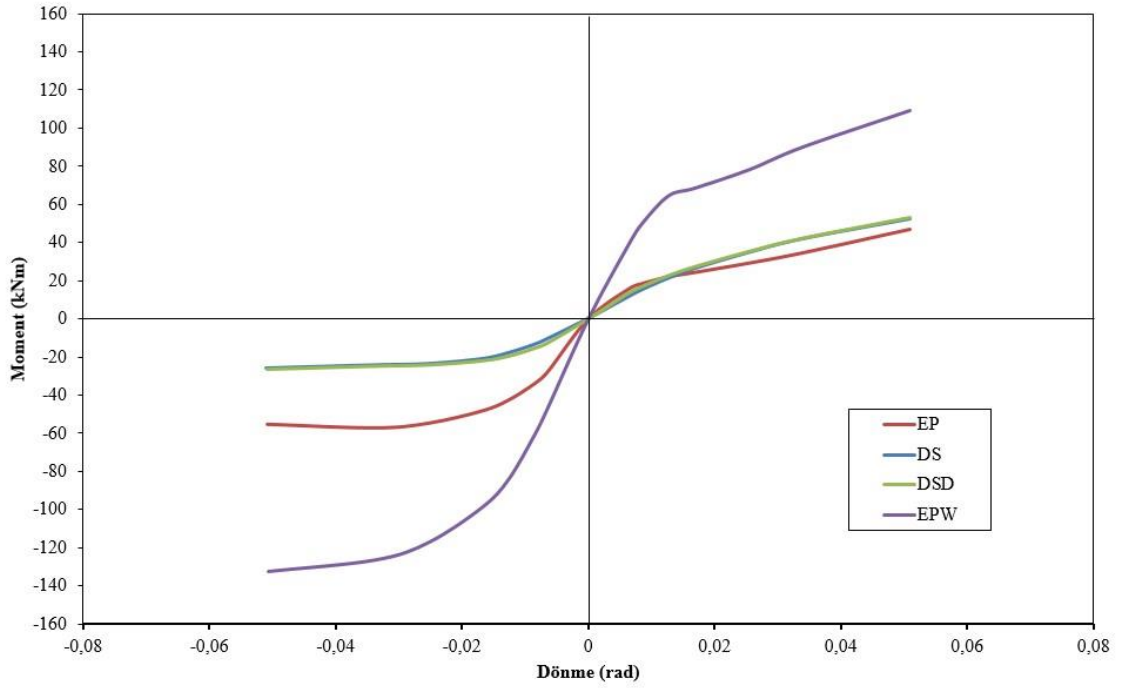
Monotonik yükleme altında yarı – rijit birleşim örneklerinde uygulanan düşey yer değiştirme 150 mm değerine (%12,5 dönme değeri) kadar ulaşırken, bu birleşimler çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında bu birleşimler 32 adımdan oluşan çevrimi tamamlayıp %5 dönme değerine ulaşılmıştır. EP ve EPW birleşim örneklerinin %5 dönme değerinin ikinci çevriminde göçme durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. DS ve DSD birleşimlerinin yaklaşık olarak aynı dönme değerlerine karşılık benzer moment değerlerine sahip oldukları görülmekte ve %5 dönme değerinin ilk çevriminde göçme durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. Yarı – rijit birleşimlerin birbirlerine göre performanslarını karşılaştırmak için Şekil 5.66.'da birleşim örneklerinin monotonik yükleme altındaki moment – dönme grafikleri ve çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altındaki moment – dönme grafiklerinden elde edilen dayanım zarfları gösterilmektedir.

Monotonik yükleme altında yaklaşık %5 dönme değerinden sonra, EP ve EPW birleşimlerinin taşıdığı moment değeri azalmaya başlamıştır. DS ve DSD birleşimleri yaklaşık olarak %2 dönme değerinden sonra %12,5 dönme değerine kadar aynı seviyede ilerledikleri görülmektedir. EP birleşiminin %4 dönme değerinden sonra moment taşıma kapasitesinde ani azalma olduğu görülmektedir. DS ve DSD birleşimlerinin moment taşıma kapasitelerinin düşük değerlerde olduğu görülmektedir. EP birleşiminin moment taşıma kapasitesi, DS ve DSD birleşimlerine göre fazla olmasına rağmen %4 dönme değerinden sonra ani bir azalma görülerek, DS ve DSD birleşimlerinin moment taşıma değerlerine yaklaştığı görülmektedir. EPW birleşimi ise %6 dönme değerinden sonra moment taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş meydana geldiği görülmekte ve diğer birleşimlere göre yüksek değerlerde moment taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Çevrimsel yükleme altında da EP, DS ve DSD birleşimlerinin, EPW birleşimine göre moment taşıma kapasitelerinin oldukça az olduğu görülmektedir. DS ve DSD birleşimleri başlangıçtan %5 dönme değerine kadar ve başlangıçtan %-5 dönme değerine kadar taşıdıkları moment değerlerinin neredeyse aynı değerlerde olduğu

görülmektedir. %5 dönme değerlerinde birleşimlerin maksimum moment taşıma değerlerine ulaştıkları görülmektedir.



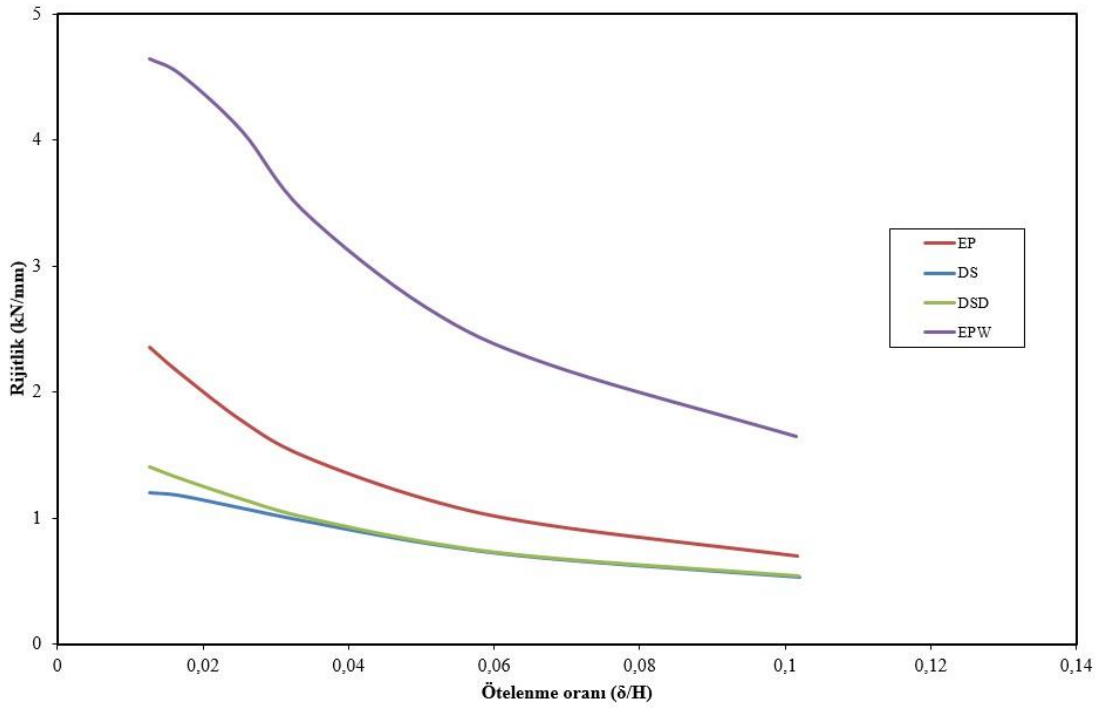
a) Monotonik yük uygulanan yarı – rijit birleşim örnekleri



b) Çevrimsel yük uygulanan yarı – rijit birleşim örnekleri

Şekil 5.66. Çevrimsel ve monotonik yükleme altında yarı – rijit birleşimlerin dayanım zarfı grafikleri.

Yarı – rijit birleşimlerin çevrimsel yükleme altında kuvvet – yer değiştirme değerlerinden elde edilen rijitlik azalım eğrileri Şekil 5.67.’de gösterilmektedir. Birleşimlere uygulanan artan çevrim sayıları ile rijitlik değerlerinde azalmalar meydana geldiği görülmektedir. EPW birleşimi diğer birleşimlere göre en büyük rijitliğe sahip olduğu görülmüştür ve doğrusal bir azalım olduğu görülmektedir. DS ve DSD birleşimleri yaklaşık olarak %3 ötelenme oranından %10 ötelenme oranına kadar aynı değer seviyelerinde olduğu görülmektedir. EP birleşim rijitliğinin, DS ve DSD birleşimlerinin rijitliğine göre fazla, EPW birleşim rijitliğine göre ise daha az rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. En az rijitliğe sahip olan birleşimler DS ve DSD birleşimleri olduğu görülmektedir.



Şekil 5.67. Yarı – rijit birleşimlerin rijitlik azalım grafikleri.

5.2.3.3. Yarı – Rijit Birleşimlerin Değerlendirilmesi

İncelenen dört adet yarı – rijit bileşim örneklerinde, DS ve DSD birleşimlerinde oluşan plastik mafsalları ve hasar durumları kesme plakasında, kiriş gövdesinin birleşime yakın uç kısımlarında meydana gelmektedir. EP birleşim örneğinde alın plakasında delik çevrelerinde ve kirişin gövdesinde alın plakasına yakın yerlerde meydana gelmektedir. EPW birleşim örneğinde ise alın plakasında delik çevrelerinde,

kiriş alt başlık ve gövdesinde alın plakasına yakın yerlerde ve birleşimin hizasında kolonla birleşim yerlerinde kolon başlıklarında meydana geldiği görülmüştür. Burada hasar durumlarının kolon – giriş birleşimlerinden uzakta ve plastik mafsalin girişte meydana gelmesi istenen durumdur. DS ve DSD birleşimleri bu istenen duruma çok uymadığı görülmektedir. EP ve EPW birleşim örneklerinde ise birleşimden uzakta ve girişte meydana geldiği görülmüştür. Bu birleşimler, birleşim tipine göre moment kapasitesi kadar moment aktardığı görülmüştür. DS ve DSD çevrimsel yüklemeler altında 0,05 radyan dönme değerinin ilk çevriminde, EP ve EPW birleşim örneklerinin ise 0,05 radyan negatif dönme değerinin ikinci çevriminde göçme durumuna geldiği ve moment taşıma kapasitelerinde azalma olduğu görülmektedir.

Birleşimleri moment taşıma kapasiteleri bakımından karşılaştırıldığında, DS ve DSD birleşimlerinin yaklaşık olarak aynı moment taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmekte, EPW birleşiminin moment taşıma kapasitesi ise diğer birleşimlerin moment taşıma kapasitelerinin yaklaşık 2,5 katı kadar fazla olduğu görülmektedir.

Birleşimlerin çevrimsel yükleme altında kuvvet – yer değiştirme değerleri dikkate alınarak elde edilen ve başlangıç dönme rijitlik değerleri incelendiğinde, EPW birleşiminin diğer birleşim örneklerine göre daha fazla rijitliğe sahip olduğu görülmüştür.

Birleşimlerin çevrimsel (tekrarlı) ve monotonik yükleme altında ulaşılabildikleri maksimum moment taşıma kapasite değerleri Çizelge 5.10'da verilmektedir. Moment taşıma kapasite değerlerine bakıldığında, EP ve EPW birleşimlerinin çevrimsel (tekrarlı) ve monotonik uygulanan yüklemeler altında elde edilen moment taşıma kapasitelerinin birbirlerine yakın değerler olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.10. Yarı – rijit birleşimlere uygulanan yükler altındaki maksimum moment değerleri.

Birleşim	Maksimum moment (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
EP	58,21	57,52
DS	25,12	52,5
DSD	25,24	52,9
EPW	137,64	134,92

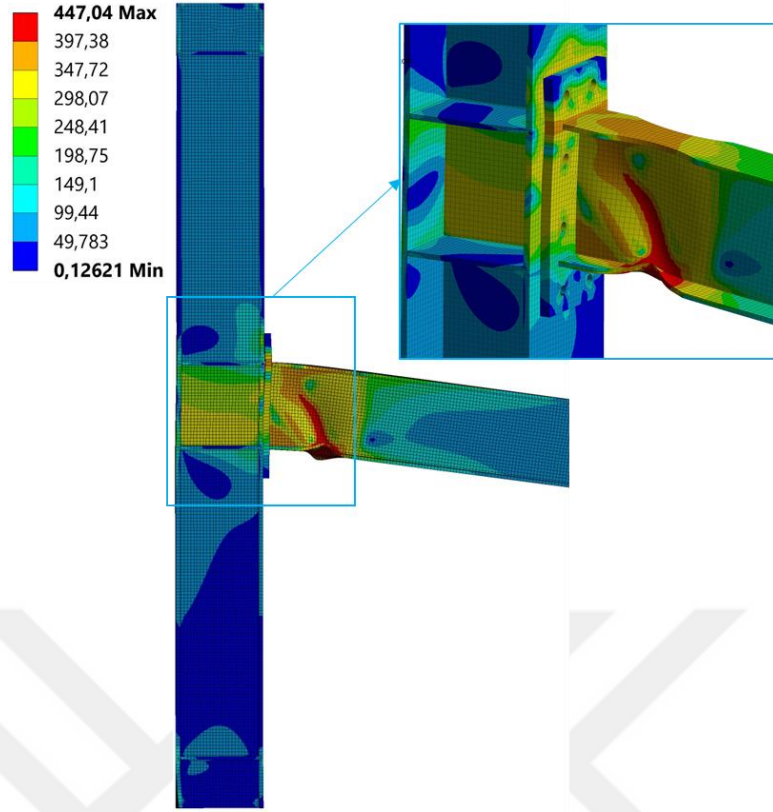
Ele alınan sonuçların çerçevesinde, EP ve EPW birleşim örneklerinin diğer DS ve DSD birleşim örneklerine göre, EPW birleşiminin de EP birleşimine göre daha üstün performansa sahip ve güvenilebilir bir birleşim olduğu görülmektedir.

5.2.4. Kiriş Başlığı Zayıflatılmış Moment Aktaran Birleşim

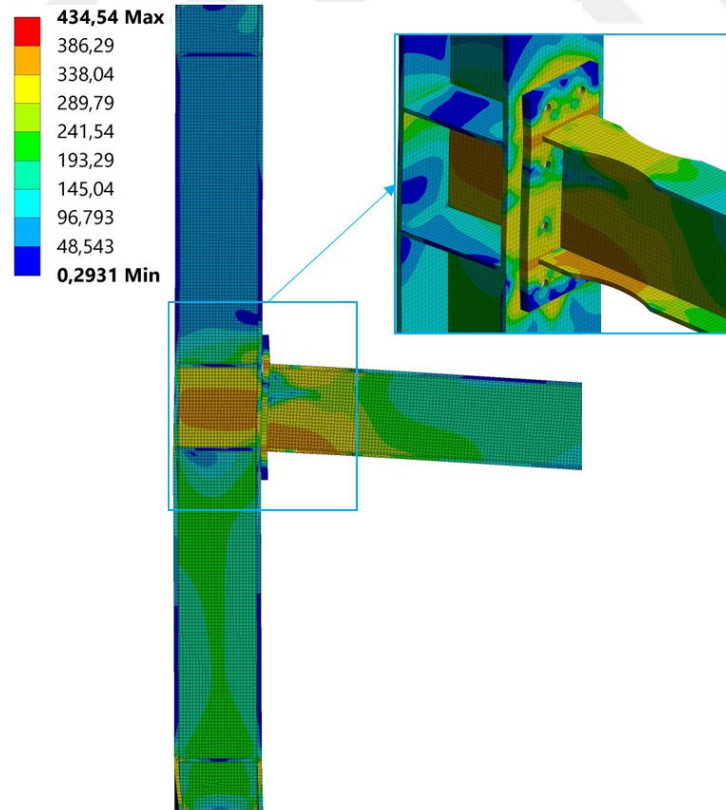
Tezin bu bölümünde kiriş alt ve üst başlığının yaklaşık olarak %40 oranında dairesel zayıflatma yapılarak moment aktaran, zayıflatılmış kiriş enkesiti bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (REMF) birleşim örneğinin sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılacaktır.

5.2.4.1. Gerilme Dağılımları ve Plastik Mafsal Yerleri

REMF birleşiminin monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında sonlu elemanlar analizleri yapılacaktır. Monotonik yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından yer çekimi yönünde düşey doğrultuda 150 mm'lik bir deplasman uygulanmıştır. REMF birleşimi bu 150mm'lik yer değiştirme değerine kadar yükü taşıyabildiği görülmüştür. Çevrimsel yükleme programında kiriş üzerindeki yükleme noktasından uygulanan 32 adımdan oluşan düşey deplasman yüklemesinin ulaştığı en büyük deplasman değeri 60 mm'dir. REMF birleşiminin uygulanan çevrimsel yükleme programını tamamlayabildiği görülmüştür. REMF birleşimi kopma gerilmesine ulaştığında oluşan hasar durumu kiriş alt ve üst başlığının yaklaşık olarak %40 oranında dairesel zayıflatılmış yerlerinden kiriş gövdesine doğru burkulma ve kiriş başlıklarının alın levhalarına kaydacağı yerlerde alın levhasında burkulma meydana geldiği görülmüştür. Kiriş başlıklarında yapılan bu azaltma ile moment taşıma kapasitesinin azaltılarak birleşimde oluşacak olan gerilmeleri azaltarak güçlü kolon – zayıf kiriş ilkesinin sağlanması amaçlanmaktadır. REMF birleşiminin Şekil 5.68.'de monotonik yükleme altında, Şekil 5.69.'da çevrimsel yüklemenin sonucunda deformasyona uğramış görünümlerinin üzerinden eş değer gerilme (von-Mises stress) dağılımları verilmektedir.



Şekil 5.68. Monotonik yük altında REMF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.

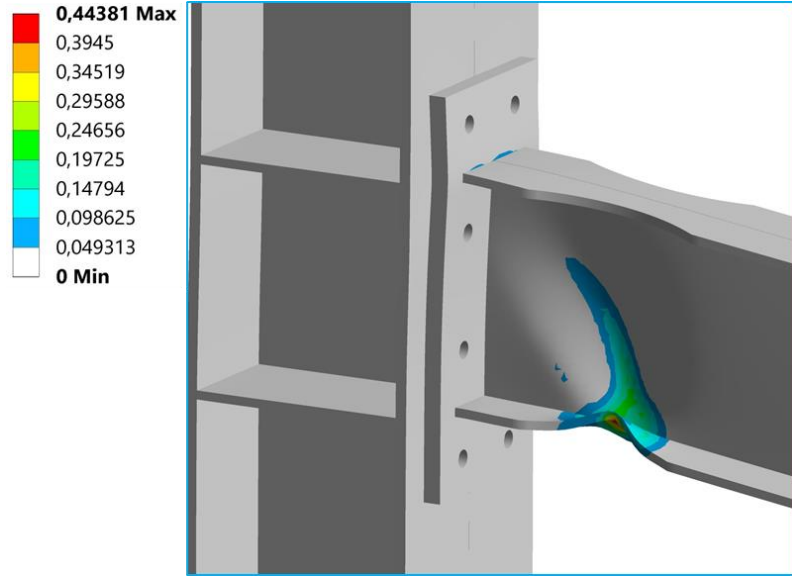


Şekil 5.69. Çevrimsel yük altında REMF birleşim örneğinde oluşan eş değer gerilme (von – Mises stress) dağılımları.

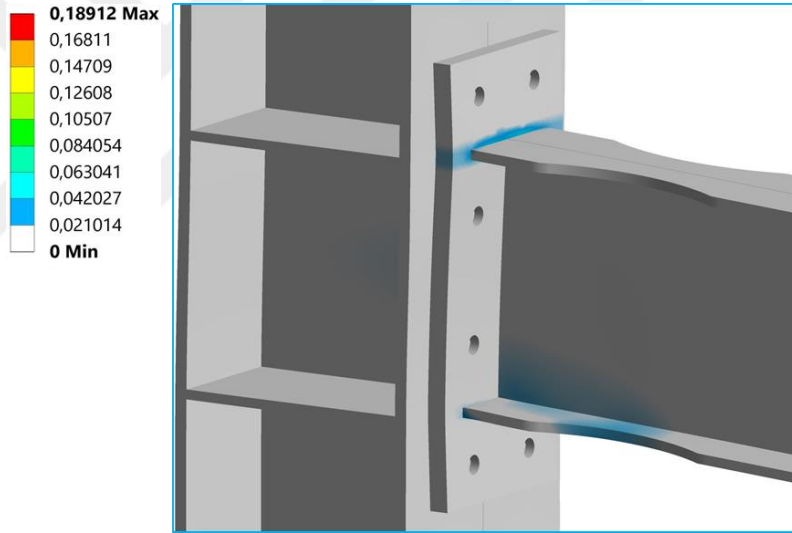
REMF birleşiminin monotonik yükleme altındaki analiz sonucu, hasar ve plastik mafsallın oluştuğu yerler Şekil 5.68'de görüldüğü üzere, birleşimde plastik mafsall kiriş başlık ve gövdesinde meydana gelmiş ve alın levhasında da kiriş başlıkları hizasında gerilme yığılmaları ve kalıcı şekil değiştirmeler oluştuğu görülmektedir. Kirişte oluşan plastik mafsall kolon başlığı yüzeyinden yaklaşık olarak 200 mm uzakta oluştuğu görülmüştür. Çevrimsel yükleme altındaki analiz sonuçları, hasar ve plastik mafsallın oluştuğu yerler Şekil 5.69.'da görüldüğü üzere, uygulanan çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında birleşimde plastik mafsall oluşmadığı fakat kiriş başlığından gövdesine doğru gerilme yığılmalarının oluştuğu, alın levhasının kiriş başlıkları ile kaynaklı birleştiği yerlerin zorlandığı ve kalıcı şekil değiştirmeler oluştuğu görülmektedir. Ayrıca monotonik yükleme göre kolon panel bölgesinin zorlandığı gerilme dağılımlarının fazla olduğu görülmüştür.

REMF birleşim örneğinde monotonik yükleme altında kirişte meydana gelen burkulma hasar durumunun, çevrimsel yükleme altında gerilme yığılmalarının yaklaşık olarak aynı yerde meydana geldiği ve benzer şekilde hasar durumunun gözlenebileceği söylenebilir.

Birleşimde meydana gelen hasar durumlarının ve oluşan plastik mafsalların oluştuğu bölgelerin daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi için eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme durumların değerlendirilmelidir. REMF birleşiminin monotonik yükleme sonucunda elde edilen bu dağılım Şekil 5.70.'de, çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler sonucunda elde edilen bu dağılım Şekil 5.71.'de gösterilmektedir. Birleşimde oluşan hasar durumunun kiriş alt başlığından başladığı benzerlik göstermekte fakat monotonik yükleme altında kiriş başlık ve gövdesinde burkulma görülmüş, kiriş başlıklarının alın levhası ile kaynak ile birleştiği yerlerde dağılımın az olduğu görülmüştür. Çevrimsel yükleme altında uygulanan yükleme adımları ile kirişte plastik mafsall oluşmadığı görülmektedir. Kiriş başlıklarının alın levha ile kaynadığı yerlerde dağılımın fazla olduğu ve monotonik yükleme göre daha çok zorlandığı görülmektedir.



Şekil 5.70. Monotonik yük altında REMF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.



Şekil 5.71. Çevrimsel yük altında REMF birleşim örneğinde oluşan eş değer plastik şekil değiştirme dağılımları.

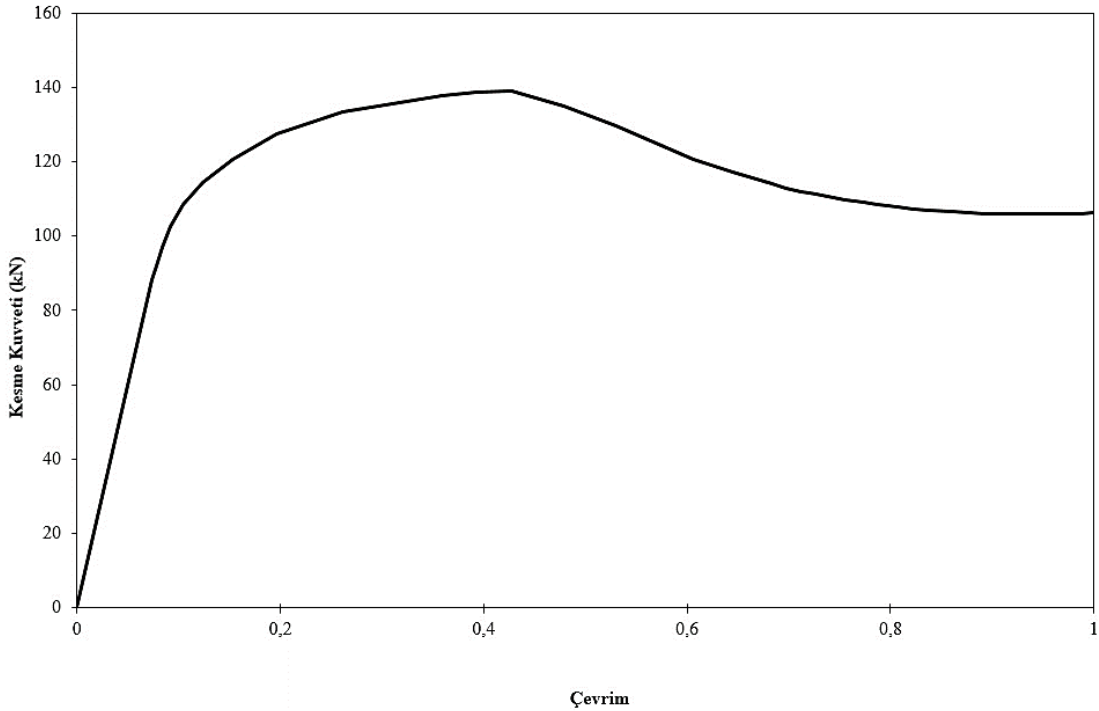
5.2.4.2. Analiz Sonucu Elde Edilen Grafikler

REMF birleşimi analizinde kiriş yükleme noktasından uygulanan yer değiştirme yüklerinin, aynı yükleme noktasında oluşan tepki kuvvetlerinin monotonik yüklemesi için Şekil 5.72.'de çevrimsel yüklemesi için Şekil 5.73'de gösterilmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, birleşimler yaklaşık olarak belirli bir yük adımından sonra taşınan kuvvette azalma olduğu görülmüştür. REMF birleşim örneğine çevrimsel yüklemeye altında uygulanan son yükleme adımında (16. çevrim) kuvvet taşıma değerlerinde

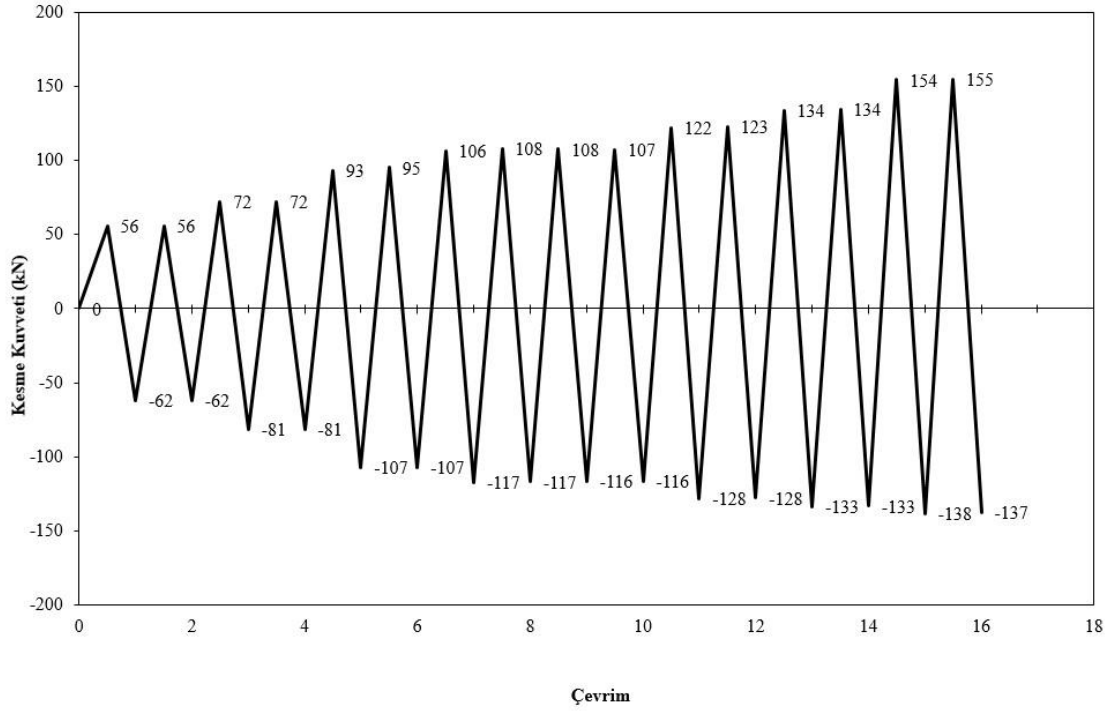
azalmalar görülmeye başlanmamıştır, monotonik yükleme altında uygulanan yüklemede 0,5'inci adımda kuvvet taşıma değeri azalmaya başladığı görülmüştür.

REMF birleşim örneğinin kiriş yükleme noktasında oluşan yük değerleri ile aynı noktada oluşan deplasman değerleri ile elde edilen yük – deplasman grafikleri ve bu grafiklerden elde edilmiş moment – toplam dönme grafikleri, monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki durumları Şekil 5.74.'de gösterilmektedir.

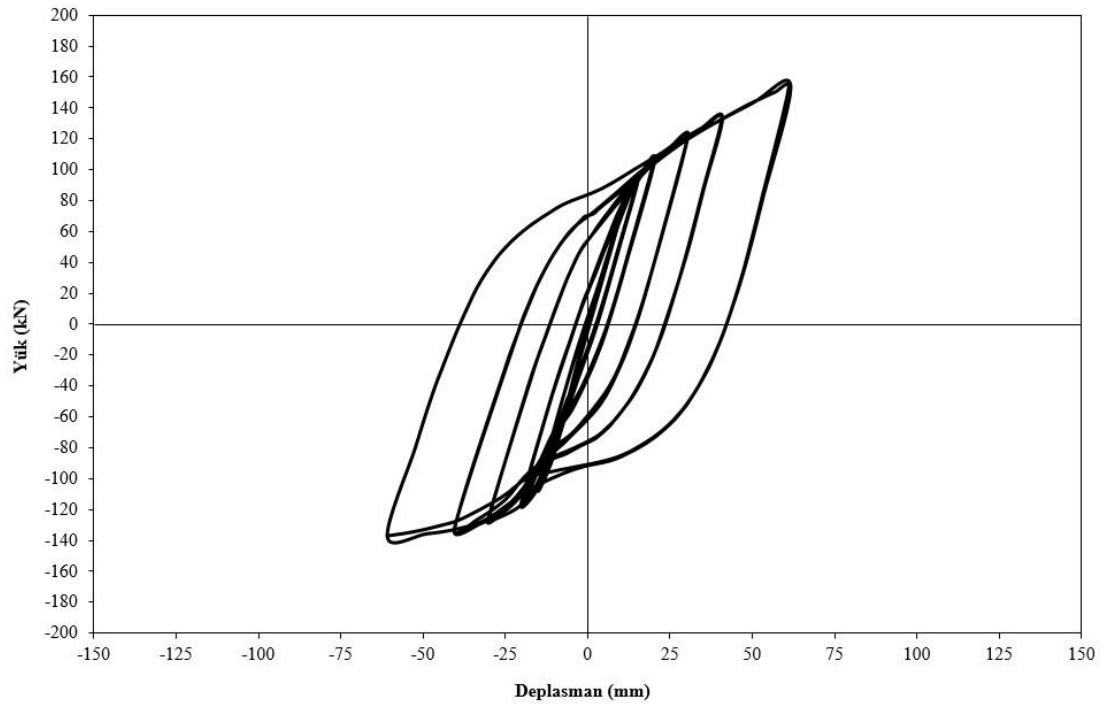
Bu birleşim örneğinde kolon başlığından belirli bir mesafede yapılan, kirişin alt ve üst başlığında belirli bir oranda yapılan azaltmalar sayesinde oluşacak olan plastik şekil değiştirmelerin bu bölgede oluşması sağlanarak kontrol altına alınması amaçlanmaktadır. Bu sayede güçlü kolon – zayıf kiriş ilkesi sağlanmış olunacak. Birleşim uygulanan çevrimsel yükleme altında 0,05 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini tamamlamıştır. Birleşim çevrimsel yüklemede yaklaşık olarak 16. çevrim sonunda moment taşıma kapasitesinde bir önceki çevrime göre azalma olduğu görülmüştür. Birleşimin çevrimsel yükleme tamamlanana kadar 0,05 radyan dönme değerlerinin çevrimi sonucunda elde edilen moment taşıma kapasite değerlerinin, EMF birleşimi ile aynı dönme değerlerine denk gelen moment taşıma kapasitelerinin kıyaslanması Çizelge 5.11.'de tablo şeklinde verilmiştir. REMF ve EMF birleşimlerinin aynı dönme değerleri için yaklaşık olarak aynı moment taşıma kapasitelerine sahip olduğu görülmektedir.



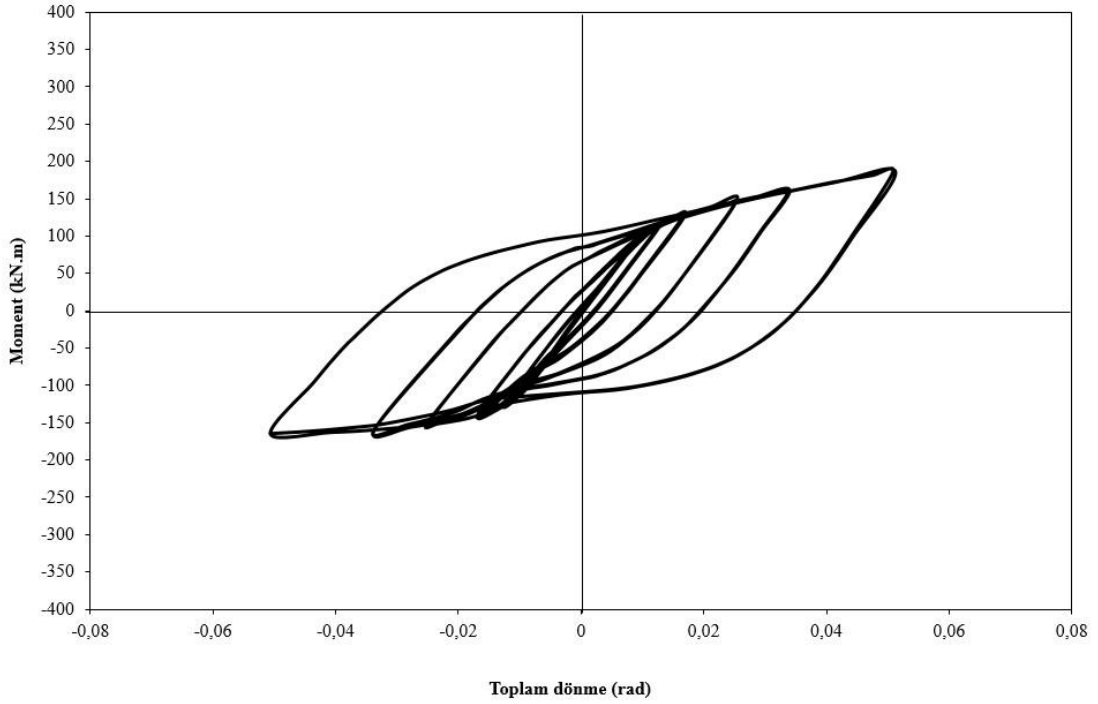
Şekil 5.72. REMF birleşiminin monotonik yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.



Şekil 5.73. REMF birleşiminin çevrimsel yükleme altında kirişte oluşan kuvvet değerleri.



a) Yük – Deplasman



b) Moment – Toplam dönme

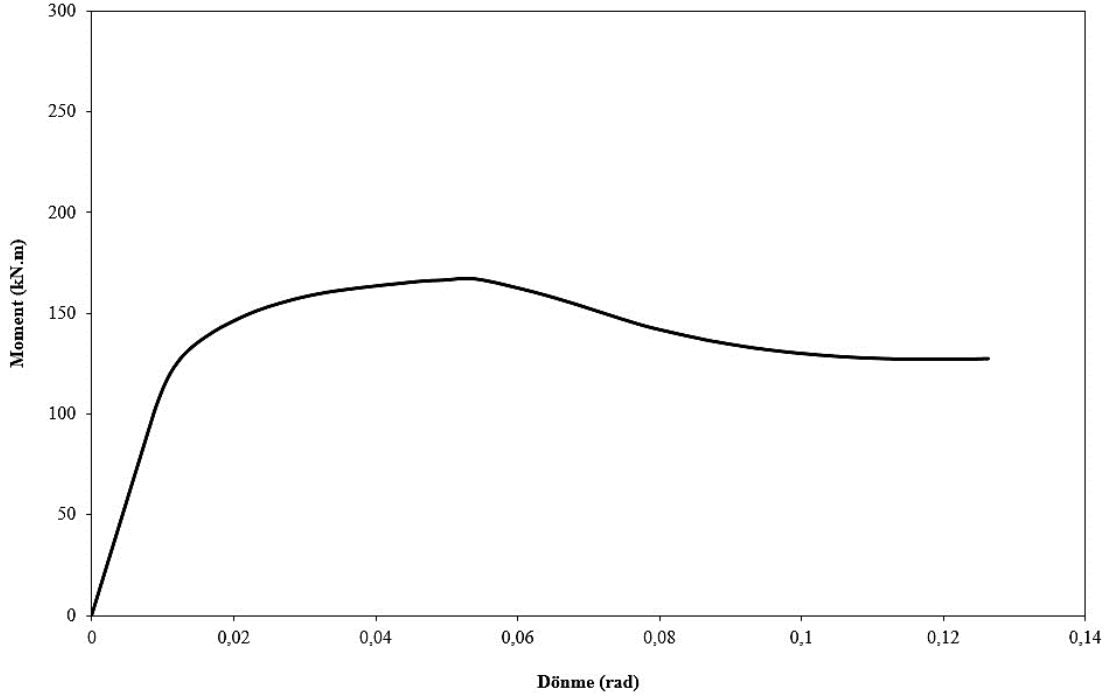
Şekil 5.74. REMF birleşimin örneğinin yük – deplasman ve moment – toplam dönme grafikleri.

Çizelge 5.11. REMF ve EMF birleşimlerinin çevrimsel yükleme altında %5 dönme değerinde okunan moment değerleri

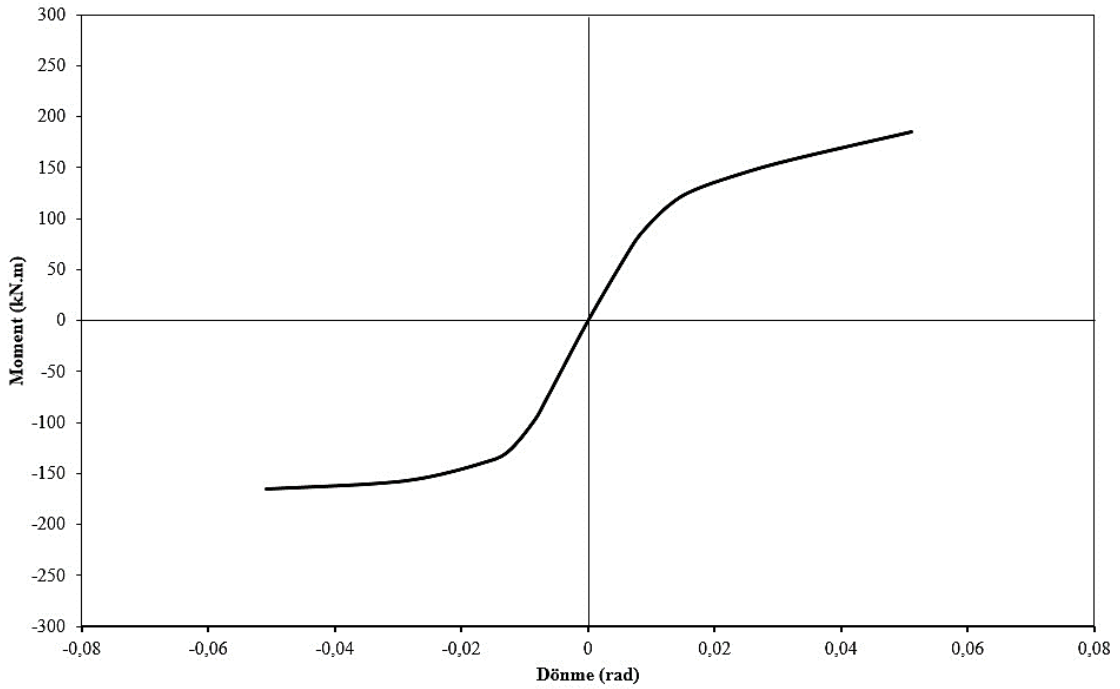
Dönme	REMF birleşimi		EMF birleşimi	
	M_{max} (kNm)	$\% (M_{max}/M_{kap})$	M_{max} (kNm)	$\% (M_{max}/M_{kap})$
0,05	185,27	100	190,63	100
-0,05	165,44	89	168,07	88
0,05	185,86	100	186,42	98
-0,05	164,68	88	166,52	87

Monotonik yükleme altında REMF birleşim örneğinde uygulanan düşey yer değiştirme 150 mm değerine (%12,5 dönme değeri) kadar ulaşırken, bu birleşim çevrimsel (tekrarlı) yüklemeler altında 32 adımdan oluşan çevrimi tamamlayıp %5 dönme değerine ulaşmıştır. REMF birleşim örneğinin %5 dönme değerinin üçüncü çevriminde göçme durumuna ulaştığı kabul edilmektedir. REMF birleşiminin performansını daha iyi anlamak için Şekil 5.75.'de birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki moment – dönme grafiği ve çevrimsel yükleme altındaki moment – dönme grafiğinden elde edilen dayanım zarfları verilmektedir. Monotonik yükleme altında yaklaşık %5 dönme değerinden sonra moment taşıma kapasitesinde ani bir düşüş meydana geldiği görülmekte ve düşüş %10 dönme değerine kadar gerçekleşmiştir. %10 dönme değerinden sonra

azalan moment taşıma kapasite değerinin %12,5 dönme değerine kadar yaklaşık olarak sabit değerlerde kaldığı görülmüştür. Çevrimsel yükleme altında REMF birleşiminin, moment taşıma kapasitesinin çevrimin en son %-5 dönme değerinde moment taşıma kapasitesinin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir.



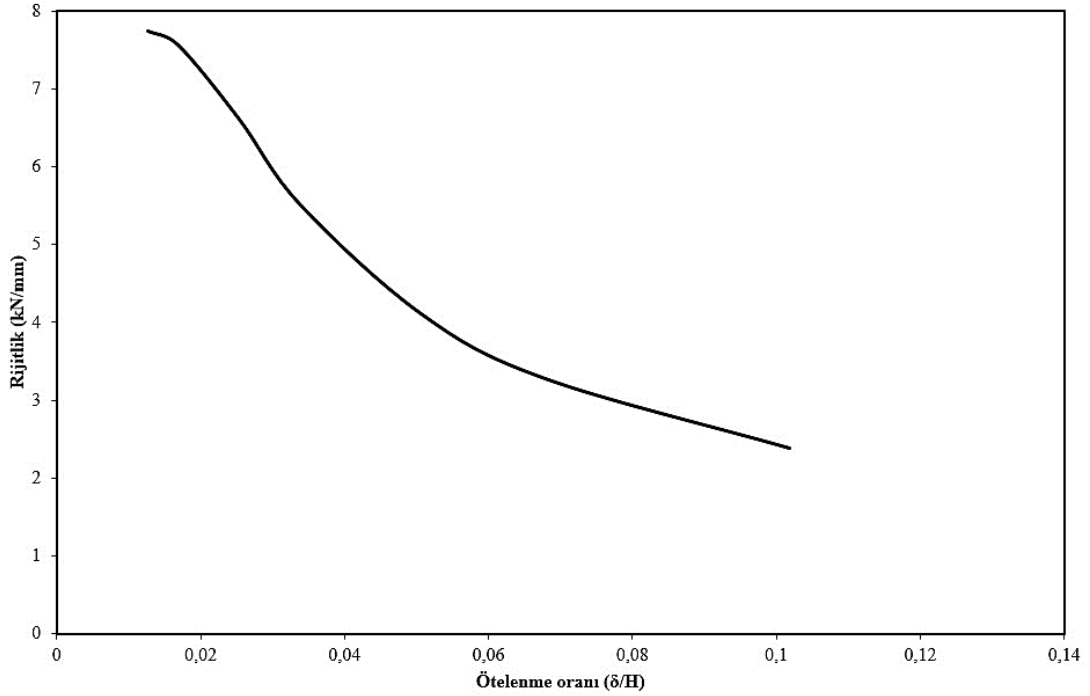
a) Monotonik yük uygulanan REMF birleşim örneği



b) Çevrimsel yük uygulanan REMF birleşim örneği

Şekil 5.75. Çevrimsel ve monotonik yükleme altında REMF örneğinin dayanım zarfı grafikleri.

REMF birleşim örneğinin çevrimsel (tekrarlı) yüklenmesi sonucu ulaşılan kuvvet – yer değiştirme değerleri dikkate alınarak elde edilen rijitlik azalım eğrileri Şekil 5.76.'da verilmektedir. REMF birleşimine uygulanan artan çevrim sayıları ile rijitlik değerlerinin orantılı olarak azalmalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.76. REMF birleşiminin rijitlik azalım grafiği.

5.2.4.3. Kiriş Başlığı Zayıflatılmış Moment Aktaran Birleşiminin Değerlendirilmesi

İncelenen kiriş başlığı zayıflatılmış moment aktaran birleşim (REMF) örneğinde, oluşan plastik mafsal konumları ve hasar durumları zayıflatılmış bölgeye çekilerek kolon yüzeyinden ve birleşim bölgesinden uzakta oluşturup kontrol altında tutulabilmesi amaçlanmıştır. Plastik mafsal ve hasar durumlarına bakıldığında kirişin alt başlığında ve gövdesinde meydana geldiği yüklemeye devam edildiğinde ise alın levhasının kiriş başlıkları ile kaynaklı birleşen yerlerinde burkulmaların meydana geldiği görülmüştür. REMF birleşimi, EMF birleşimi ile aynı dönme değerlerindeki moment taşıma ve şekil değiştirmeleri kıyaslandığında yaklaşık olarak aynı moment taşıma kapasitelerine sahip oldukları görülmüştür. Oluşan şekil değiştirme hasar durumlarında ise REMF birleşiminde alın plakası fazla zorlanmaz iken EMF birleşiminde kiriş yük aktarımını düzgün bir şekilde sağladığı için alın plakasının daha fazla zorlandığı görülmüştür. Rijitlik azalımı kirişte akma gerçekleştikten sonra burkulmalar şeklinde hasar durumu

meydana gelmektedir ve kiriş başlığında başlayan burkulma ileri yükleme durumlarında kiriş gövdesine doğru ilerlemektedir. Yüklemeye devam edildiğinde kiriş başlıklarının alın levhası ile olan kaynaklı birleşiminde zorlanmalar oluşuyor ve kaynaklarda hasar oluşumuna sebep vermektedir. REMF çevrimsel yüklemeler altında 0,05 radyan dönme değerinin yaklaşık üçüncü çevriminde göçme durumuna geldiği ve moment taşıma kapasitesinde azalma olduğu görülmektedir.

Analizleri yapılan birleşimlerin tekrarlı yüklemeler altında kuvvet – yer değiştirme değerlerinden elde edilen ve başlangıç dönme rijitlik değerleri incelendiğinde, REMF birleşiminin diğer birleşim örneklerine göre daha fazla rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi birleşimde kullanılan profil kesitleri ve eleman boy farklılıklarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Birleşim örneğinin çevrimsel ve monotonik yüklemeler altında ulaşabildiği maksimum moment taşıma kapasite değerleri Çizelge 5.12.'de verilmiştir. Moment taşıma kapasite değerlerine bakıldığında, monotonik yükleme değerinin büyük olması ve bir adımda uygulanmasından dolayı plastik mafsallara, çevrimsel yüklemeye göre daha erken yükleme adımında meydana gelmesinden dolayı moment taşıma değerinde %11 gibi bir fark ortaya çıktığı söylenebilir.

Çizelge 5.12. REMF birleşiminin uygulanan yükler altındaki maksimum moment değerleri.

Birleşim	Maksimum moment (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
REMF	166,85	185,86

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, uygulamalarda sıklıkla tercih edilen moment aktaran (rijit) ve yarı – rijit çelik kolon – kiriş birleşimlere uygulanan monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında sonlu elemanlar analizleri (SEA) yapılmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan büyük geometri değişimleri, doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin kullanılması ve doğrusal olmayan birleşim temas durumlarının kullanımı ile çelik bağlantıların doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Tez kapsamında analizleri yapılacak olan birleşimlerin sonlu elemanlar analizini yapmadan önce, sonlu elemanlar modellemelerini doğrulamak amacıyla, analitik olarak hesaplanan yapı elemanlarının analizi ve literatürden deneysel analizi yapılmış çelik kolon – kiriş birleşiminin alın levhalı bulonlu birleşim modelinin SEA analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerin ve çalışmaların sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi açıklanabilir:

- Literatürden örnek model olarak alınan deneysel çalışmadaki sonuçlar ile sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen bulonlu alın levhalı başlık berkitmeli (EMF) birleşim örneğinin, kesme kuvveti kapasiteleri, yük – deplasman, moment – toplam dönme, dayanım zarfı, rijitlik azalımı ve göçme modu karşılaştırmaları çok az farklılıklar olmasına rağmen birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Karşılaşılan uyumsuzlukların nedeninin, uygulamadaki kaynak işçiliğinden kaynaklanabilecek kusurlar, bulonlara uygulanan öngerilme kuvvetlerinin farklılıklarından oluşabilecek kusurlar, birleşim düzeneğinde kullanılan potansiyometrik cetveller ve hidrolik krikonun kalibrasyon sorunları, sonlu elemanlar metodunun mesh yoğunluğu, uygulanan sonlu eleman mesh tipi ve birleşim parçaları arasındaki temas durumunun tipi gibi nedenlerden dolayı olabileceği düşünülmektedir.
- Moment aktaran birleşimlerde EMF birleşimi dışındaki diğer birleşim örneklerin, kiriş başlıkları ve gövdesinin burkulmasıyla göçme mekanizmaları ulaştığı yani, plastik mafsalların birleşim bölgelerinden ve kolon yüzeyinden uzakta kiriş üzerinde meydana geldiği görülmüştür. EMF birleşiminde ise plastik mafsalları oluşumu birleşime yakın kiriş başlık ve gövdesinde meydana geldiği görülmüş ve yüklemeye devam edildiğinde kiriş başlık kaynaklarında gerilme yığılmaları meydana geldiği görülmüştür.

- Moment aktaran birleşimlerden EMHF ve EMTF birleşim örneklerinin analiz sonucunda elde edilen moment taşıma kapasitelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüş, EMF birleşim örneğinde ise moment taşıma kapasitesinin, moment aktaran diğer birleşimlere göre daha az olduğu görülmüştür. EMF tarzı birleşim tiplerinin çok yüksek moment kapasitesine sahip olmadıkları yorumu yapılabilir.
- Analizi yapılan birleşimlere uygulanan yüklemelerde, çevrimsel yük olarak en fazla %5 radyan dönme değeri kadar tekrarlı düşey yer değiştirme ve monotonik yüklemelerde ise 150 mm yer çekimi doğrultusunda düşey yönde yükleme uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi yapılan tüm birleşimler her iki yüklemeyi tamamlamıştır. EMF birleşimi %4 radyan dönme değerinin üçüncü çevriminde, EMHF ve EMTF birleşimleri %5 radyan dönme değerinin ilk çevriminde, EP ve EPW birleşimleri ise %5 radyan dönme değerinin ikinci çevriminde göçme mekanizmalarına ulaşarak moment taşıma kapasite değerlerinin azalmaya başladığı söylenebilir.
- İncelenen çelik kolon – kiriş bağlantılarından, moment aktaran (rijit) birleşimlerinden EMHF ve EMTF birleşim tiplerinin, yarı – rijit birleşimlerinden EPW birleşim tipi örneğinin rijitlik değerleri ve moment taşıma kapasiteleri bakımından kıyas edildiğinde diğer birleşim tiplerine göre daha üstün performans ve güvenilebilir birleşimler olduğu görülmüştür.
- REMF birleşim örneğinde kolon başlığında belirli bir mesafede, kirişin alt ve üst başlığında belirli bir oranda yapılan azaltmalar sayesinde oluşacak olan plastik şekil değiştirmelerin bu bölgede oluşması sağlanarak kontrol altına alınması amacı taşımaktadır. Bu sayede güçlü kolon – zayıf kiriş ilkesi sağlanmış olmaktadır. REMF birleşimi uygulanan çevrimsel yükleme altında 0,05 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini ve monotonik 150 mm düşey yer değiştirme yüklemelerini tamamlamıştır. Birleşim yükleme sonunda kopma gerilmesine ulaştığında oluşan hasar durumu kiriş alt ve üst başlığının yaklaşık olarak %40 oranında dairesel zayıflatılmış yerlerinden kiriş gövdesine doğru burkulma ve kiriş başlıklarının alın levhalarına kaydığı yerlerden alın levhasında burkulma meydana geldiği ve göçme mekanizmasının olduğu görülmüştür. Kiriş başlıklarında yapılan bu azaltma ile güçlü kolon – zayıf kiriş ilkesinin sağlandığı görülmüştür.

- Sonlu eleman analizleri paket programlar yardımıyla, deneysel çalışmalar ile kıyaslanıp doğruluğu saptanarak, parametrik çalışmalar yapmaya ve yeni tasarım metotları geliştirmeye imkân tanıdığı düşünülmektedir. Farklı fikir ve geliştirilebilir düşüncelerin de rahatlıkla analizlerinin yapılabilirliğine olanak tanımaktadır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar ile sistemlerin analizleri yapılarak, gerçek dünyadaki davranışlarının simülasyonları ile gerçeğe uygun sonuçlar elde edilip gözlemlenebileceği ve deneysel çalışmada tespit edilmesi zor olan bölgelerde sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar ile sistemlerin sonuçlarının incelenmesine / yorumlanmasına olanak sağlayabilir.



KAYNAKLAR

- Abaqus version 16.3, (2019). Mesh convergence [online], <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEGSARefMap/simagsa-c-ctmmeshconverg.htm> [Ziyaret Tarihi: 28 Ekim 2019].
- Aghayere, A.O., ve Vigil, J., (2018). Çelik Yapı Tasarımı Uygulamaya Yönelik Bir Yaklaşım, 2. Baskı, (Çev.: B. Akbaş, O.Ö. Eğilmez), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- Akgönen, A.İ., Güneş, B., (2017-08). Alın Levhalı Moment Birleşimlerin Sonlu Elemanlar ile Analizi, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 17 (2017): 646-657.
- ANSYS version 19.1, (2018). Incorporated programmers manual for ANSYS, ANSYS Inc.
- Aydın, M.R., ve Günaydın, A., (2016). Çelik Yapılar, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Azap M.N., (2013-07). Modeling Of Nonlinear Behavior Of Steel Beam To Column Semi-Rigid Connections With 3-D Solid Finite Elements. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bahaz, A., Amara, S., Jaspert, J.P., Demonceau, J.F., (2018). “Analysis of the Behaviour of Semi Rigid Steel End Plate Connections”. MATEC Web of Conferences 149, 02058 (2018).
- Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F., ve Çağlayan, Ö., (2012). Çelik Yapılar, 4. Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T., Abou-Elfath, H., Al Nasra, M., (2012). “Finite Element Analysis of Large Capacity Endplate Steel Connections”. Journal of Computer Science 8 (4): 482-493, 2012.
- El-Hewity, M., Mashaly, E., Abou-Elfath, H., Osman, M., (2011-03). “Behavior of four-bolt extended end-plate connection subjected to lateral loading”. Alexandria Engineering Journal (2011) 50, 79–90.
- Frei, W., (2013). Meshing Considerations for Linear Static Problems [online], <https://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems/> [Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2020].
- Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V., Daryan, A.S., (2011-04). “Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts”. Journal of Constructional Steel Research, 67 (4): 690-705.
- Ghassemieh, M., Baei, M., Kari, A., Goudarzi, A. ve Laefer, D. F., (2015-05). “Adopting flexibility of the end-plate connections in steel moment frames”. Steel and Composite Structures, 18 (5): 1215-1237.

- Ghassemieh, M., Jalalpour, M., Gholampour, A., (2014) “Numerical Evaluation of the Extended Endplate Moment Connection Subjected to Cyclic Loading”, *Current Advances in Civil Engineering* 2 (1): 35-43.
- Gök, K., ve Gök, A., (2018). *Abaküs ANSYS WORKBENCH*, 1. Baskı, Abaküs Kitap Yayın Pazarlama, İstanbul.
- Han, S.W., Kwon, G.U., ve Moon, K.H., (2007). “Cyclic Behaviour of Post- Northridge WUF-B Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 63:365–374.
- Hatipoğlu E.T., (2011). *Zayıflatılmış ve Güçlendirilmiş Tipteki Çelik Kolon-Kiriş Birleşimlerinin Deprem Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi*. Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Hedayat, A.A., ve Celikag, M., (2009). “Post-Northridge Connection with Modified Beam End Configuration to Enhance Strength and Ductility”, *Journal of Constructional Steel Research*, 65:1413–1430.
- Karabörk M.Ç., (2019). Birleşim Elemanları [online], http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/75/files/Gokhan/Celik_Yapilar_2019/Celik_Yap_lar_2019_Sunum-3_v7.pdf [Ziyaret Tarihi: 26 Ağustos 2020].
- Karasu A., ve Vatanserver C., (2017). “Kısa Alın Levhalı Bulonlu Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Tek Doğrultuda Artan Yük Altında Doğrusal Olmayan Davranışı”, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu, İMO*, 337–344.
- Kutay, M.G., (2009). Mukavemet Değerleri [online], <http://www.guven-kutay.ch/> [Ziyaret Tarihi: 21 Ekim 2019].
- Lengvarský, P., Bocko, J., ve Hagara, M., (2013). “Modal Analysis of Titan Cantilever Beam Using ANSYS and SolidWorks”, *American Journal of Mechanical Engineering*, 1 (7), 271-275.
- Lecture 2: Introduction to ANSYS Workbench, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.
- Lecture 3: Introduction to ANSYS Meshing, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.
- Lecture 4: Meshing Methods, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.
- Lecture 5: Global Mesh Controls, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.
- Lecture 6: Local Mesh Controls, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.

- Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics, (2015). Introduction to ANSYS Meshing, (12 Şubat 2015). ANSYS Inc.
- Moaveni, S., (2015). Sonlu Elemanlar Analizi Teori ve ANSYS ile Uygulamalar, 4. Baskı, (Çev.: A.O. Ayhan), Palme Yayıncılık, Ankara.
- Ovalı, İ., ve Esen, C., (2018). Kodlab ANSYS WORKBENCH, 3. Baskı, Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım ve Eğitim Hizmetleri, İstanbul.
- Sharaf, T., ElSabbagh, A., Naguy, S., ElGhandour, M., (2019-04). “Behavior of extended end-plate bolted connections subjected to monotonic and cyclic loads”. Engineering Structures 190 (2019): 142–159
- T.C. Resmi Gazete, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (30364), 18.03.2018
- Uslu, H.C., (2009-07). 3-D Finite Element Analysis Of Semi-Rigid Steel Connections. Yüksek lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yang, R., ve Zhou, X., (2019-03). “Analysis of the Mechanical Behavior of Bolted Beam-Column Connections with Different Structural Forms”. Advances in Civil Engineering, 1967253.
- Yeh, C., Lai, C., Chang. Y., Chang, H., (2018-08). “Finite element analysis of steel moment connections with the details of shear tabs and high strength bolts”. The 2018 Structures Congress (Structures18). Songdo Convensia, Incheon, Korea, August 27 - 31, 2018.
- Yıldız, A.R., (2015). Makine Elemanları-1, Bölüm 2 – statik mukavemet sınırları, değişken zorlamalar ve yorulma sunumu, (06 Aralık 2015), Bursa: Bursa Teknik Üniversitesi.
- Yılmaz, O., (2015). DBYBHY – 2007’deki Moment Aktaran Çelik Birleşimlerin Sonlu Eleman Analizleri. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, O., Bekiroğlu, S., Alemdar, F., Arslan, G., Sevim, B., Ayvaz, Y., (2019-01). “Experimental investigation of bolted stiffened end-plate and bolted flange-plate connections”. Latin American Journal of Solids and Structures, 16 (3): 1679-7825.
- Yılmaz, O., ve Bekiroğlu, S., (2016). “Alın Levhalı Bulonlu Kolon Kiriş Birleşimlerinde Panel Bölgesi Güçlendirmesinin Etkisi”. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2): 241-253.
- Yılmaz, O., ve Bekiroğlu, S., (2014). “Behavior of pretensioned bolted steel column beam connections subjected to monotonic loading”, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering, 21-25 Ekim 2014, İstanbul.
- Yorgun, C., (2001-11). “Evaluation of Innovative Extended End-Plate Moment Connections Under Cyclic Loading”. Turkish J. Eng. Env. Sci. 26 (2002), 483-492.