

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MOMENT AKTARAN I-ENKESİTLİ KİRİŞ – ZAYIF EKSEN H-ENKESİTLİ
KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL
OLMAYAN DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Kutay KUTSAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

TEMMUZ 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MOMENT AKTARAN I-ENKESİTLİ KİRİŞ – ZAYIF EKSEN H-ENKESİTLİ
KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL
OLMAYAN DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

**Kutay KUTSAL
(501172014)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

TEMMUZ 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**NONLINEAR BEHAVIOR OF MOMENT-RESISTING I-BEAM – TO – WEAK
AXIS H-COLUMN CONNECTIONS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING**



Ph.D. THESIS

**Kutay KUTSAL
(501172014)**

Department of Civil Engineering

Structure Engineering Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Cüneyt VATANSEVER

JULY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501172014 numaralı Doktora Öğrencisi Kutay KUTSAL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MOMENT AKTARAN İ-ENKESİTLİ KİRİŞ – ZAYIF EKSEN H-ENKESİTLİ KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Cavidan YORGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN
İstanbul Kültür Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Haluk Emre ALÇİÇEK
İstanbul Kültür Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10 Haziran 2025
Savunma Tarihi : 23 Temmuz 2025



Eşim, hayat arkadaşım Seda EFE KUTSAL,
Sevgili annem Nesrin NAMAL
Ve kıymetli anneannem Cumhuriyet Gülseren NAMAL'a,



ÖNSÖZ

Bu doktora tezi kapsamında, moment aktaran I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tiplerinin, çevrimsel yükler altındaki doğrusal olmayan davranışları; moment-dönme ilişkisi, rijitlik değişimi, enerji sönümleme kapasitesi ve göçme durumları açısından ileri düzey sonlu eleman modelleri kullanılmak suretiyle nümerik olarak incelenmiş ve elde edilen bulgular doğrultusunda bu birleşim türlerine yönelik tasarım esasları belirlenmiştir. Lisans, yüksek lisans ve doktora öğrenimim boyunca engin bilgi ve tecrübelerinden faydalanma ayrıcalığını yaşadığım, bu çalışmanın şekillenmesinde her zaman yol gösterici olan, değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca bana koşulsuz destek veren, varlıklarıyla güç bulduğum sevgili annem Nesrin NAMAL'a ve kıymetli anneannem Cumhuriyet Gülseren NAMAL'a saygılarımı ve sonsuz şükranlarımı sunarım. Özellikle doktora sürecinde her zaman yanımda olan, sabrı, anlayışı ve desteğiyle motivasyonumu daima yüksek tutmamı sağlayan sevgili eşim Seda EFE KUTSAL'a en derin sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2025

Kutay Kutsal
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xxi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxv
ÖZET.....	xxxvii
SUMMARY	xli
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Kapsamı.....	2
1.3 Özgün Değer	3
1.4 Yaygın Etki	4
1.5 Tez Çalışmasının Düzeni	4
2. MOMENT AKTARAN ÇELİK ÇERÇEVELER.....	7
2.1 Genel Bakış	7
2.2 Moment Aktaran Çelik Çerçevelerin Kiriş-Kolon Birleşimleri.....	8
2.2.1 Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi.....	8
2.2.2 Bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimi.....	10
2.2.3 Bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimi	12
2.2.4 Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimi	14
2.2.5 Tam penetrasyonlu küt kaynaklı kiriş-kolon birleşimi	16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	19
3.1 Giriş	19
3.2 Driscoll ve Beedle (1982)	20
3.3 Driscoll ve diğ. (1983)	21
3.4 Shim ve diğ. (2014).....	22
3.5 Oh ve diğ. (2015)	23
3.6 Yılmaz ve diğ. (2016).....	23
3.7 Lee ve diğ. (2019)	24
4. BİRLEŞİM MODELLERİ VE TASARIMI.....	25
4.1 Plastik Mafsalda Beklenen Etkilerin Belirlenmesi.....	28
4.2 Birleşim Tasarımındaki Genel Koşullar.....	29
4.3 Dayanım Katsayıları.....	34
4.4 Kaynak Detayları.....	34
4.5 Birleşimlerin Tasarım Esasları ve Uygulama Detayları.....	34
4.5.1 Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi.....	34
4.5.2 Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi	47

4.5.3 Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi.....	61
4.5.4 Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi.....	72
4.5.5 Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi.....	98
4.5.6 Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi.....	122
5. SONLU ELEMAN MODELLERİ İÇİN TEMEL ESASLAR.....	133
5.1 Malzeme Modeli.....	133
5.2 Doğrusal Olmayan Analiz	134
5.3 Katı Eleman Özellikleri.....	135
5.3.1 Katı eleman tipi	135
5.3.2 İntegrasyon yöntemi.....	136
5.4 Elemanlar Arasındaki Temas Etkileşimi Modeli	139
5.5 Temas Eden Yüzeyler Arasındaki Etkileşimin Tanımlanması.....	140
5.6 Sonlu Eleman Noktaları Arasında Yer Değiştirmelerin Sınırlandırılması	141
5.7 Hasar ve Dayanım Kaybının Modellenmesi.....	141
5.7.1 Modellemeye genel bakış.....	141
5.7.2 Sünek metaller için hasar modeli	142
6. SONLU ELEMAN MODELLEME ESASLARININ DOĞRULANMASI..	149
6.1 Bulonlu T-Parçalı Birleşim Modellerinin Doğrulanması	149
6.1.1 Esas alınan deneysel çalışma.....	149
6.1.2 Birleşimin sonlu eleman modeli.....	150
6.1.3 Mesnetlerin modellenmesi	151
6.1.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli.....	152
6.1.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar	173
6.1.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli.....	173
6.1.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim.....	173
6.1.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması	173
6.1.9 Analiz yöntemi	174
6.1.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı	175
6.1.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	176
6.2 Bulonlu Alın Levhali Birleşim Modelinin Doğrulanması.....	182
6.2.1 Esas alınan deneysel çalışma.....	182
6.2.2 Birleşimin sonlu eleman modeli.....	184
6.2.3 Birleşim modelinin mesnet koşulları.....	184
6.2.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli.....	185
6.2.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar	197
6.2.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli.....	197
6.2.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim.....	197
6.2.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması	197
6.2.9 Analiz yöntemi	198
6.2.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı	199
6.2.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	200
6.3 Kaynaklı Zayıflatılmış ve Tam Penetrasyonlu Küt Kaynaklı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi Modelinin Doğrulanması	207
6.3.1 Esas alınan deneysel çalışma.....	207

6.3.2 Birleşimin sonlu eleman modeli	208
6.3.3 Mesnetlerin modellenmesi	209
6.3.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli.....	210
6.3.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar	221
6.3.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli.....	221
6.3.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim.....	221
6.3.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması	222
6.3.9 Analiz yöntemi	222
6.3.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı	223
6.3.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	224
6.4 Bulonlu Başlık Levhali I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi Modelinin Doğrulanması	229
6.4.1 Esas alınan deneysel çalışma	229
6.4.2 Birleşimin sonlu eleman modeli	231
6.4.3 Birleşim modelinin mesnet koşulları	231
6.4.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli.....	232
6.4.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar	246
6.4.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli.....	246
6.4.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim.....	246
6.4.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması	246
6.4.9 Analiz yöntemi	247
6.4.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı	248
6.4.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi	249
7. BİRLEŞİM PROTOTİPLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ	255
7.1 Birleşimlerin Sonlu Eleman Modelleri	255
7.2 Eleman ve Sonlu Eleman Ağı Tanımları.....	274
7.3 Malzeme Özellikleri ve Malzeme Modeli.....	275
7.4 Elemanlar Arasındaki Temas Etkileşimi Modeli	288
7.5 Temas Eden Yüzeyler Arasındaki Etkileşimin Tanımlanması.....	289
7.6 Kaynaklı Birleşimler için Sonlu Eleman Noktaları Arasında Bağlantının Sağlanması.....	291
7.7 Mesnetlerin Modellenmesi	291
7.8 Ön Çekme Kuvvetinin Uygulanması	293
7.9 Tekrarlı Yük Protokolü	294
7.10 Analiz Adımları.....	295
7.11 Çevrimsel Eğriler	296
7.12 Kritik Bölgelerde Gerilme Dağılımları ve Yığılmaları	296
7.13 Çatlama ve Kırılma Durumları için Belirleyici İndisler.....	297
8. SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 301	301
8.1 Tam Dayanımlı Bulonlu Alın Levhali I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H- Enkesitli Kolon Birleşimi	301
8.1.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı	301
8.1.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	306
8.1.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	307
8.1.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	310

8.2 Kaynaklı Azaltılmış I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi	319
8.2.1 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	320
8.2.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	324
8.2.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	325
8.2.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	327
8.2.5 Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi hakkında bilimsel makale çalışması	332
8.3 Bulonlu T-parçalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi	345
8.3.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı.....	345
8.3.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	349
8.3.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	350
8.3.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	352
8.4 Kaynaklı T-parçalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi	356
8.4.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı.....	356
8.4.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	361
8.4.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	362
8.4.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	363
8.5 Tam Penetrasyonlu Küt Kaynaklı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi	367
8.5.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı.....	367
8.5.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	372
8.5.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	374
8.5.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	375
8.6 Bulonlu Başlık Levhalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi	380
8.6.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı.....	380
8.6.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi	383
8.6.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi	384
8.6.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi	386
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	391
9.1 Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar	391
9.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler	395
EKLER.....	403
ÖZGEÇMİŞ.....	491

KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction
ÇYTHYE	: Çelik Yapıların Tasarımı, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar Yönetmeliği
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
PEEQ	: Equivalent Plastic Strain (Eşdeğer Plastik Şekil Değiştirme)
PEEQI	: Equivalent Plastic Strain Index (Eşdeğer Plastik Şekil Değiştirme İndisi)
RI	: Rupture Index (Kırılma İndisi)
SDEG	: Hasar Değişkeni
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği



SEMBOLLER

- A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm^2 .
 A_e : Etkin net enkesit alanı, mm^2 .
 A_g : Kayıpsız enkesit alanı, mm^2 .
 A_{gv} : Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı, mm^2 .
 A_{nt} : Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm^2 .
 A_{nv} : Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm^2 .
 A_{tb} : Çekme kuvveti etkisi altındaki bulonların kayıpsız enkesit alanı, mm^2 .
 A_{vb} : Kiriş başlığındaki birleşimde kullanılan bulonların diş açılmamış gövdelerinin karakteristik enkesit alanları, mm^2 .
 A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm^2 .
 C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.
 C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı.
 D : Hasar değişkeni.
 E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.
 F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.
 F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.
 F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.
 F_u : Kiriş veya T-parça malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_u : T-parça malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_{ub} : Kiriş malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_{up} : Başlık levhası malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_{ut} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.
 F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yc} : Kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yp} : Alın levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yp} : Başlık levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yt} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 F_{yu} : Uç levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.
 G : Yapısal çelik malzemesinin kayma modülü, MPa.
 $I_{kiriş}$: Kirişin kuvvetli ekseni etrafında atalet momenti, mm^4 .
 I_x : Profilin kuvvetli ekseni etrafındaki atalet momenti, mm^4 .
 I_y : Profilin zayıf ekseni etrafındaki atalet momenti, mm^4 .

K	: Denklem sabiti.
KL	: Burkulma boyu, mm.
L	: Sonlu eleman karakteristik uzunluğu, mm.
L_b	: Kiriş başlıkları ile alın levhaları arasındaki rijitleştirici levhaların genişliği, mm.
L_o	: Kirişin kolonların merkezleri arasındaki teorik açıklığı, mm.
L_{stem}	: Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde uzunluğu, mm.
L_{vb}	: Kiriş başlığındaki bağlantıda kullanılan ilk ve son bulonların arasındaki uzaklık, mm.
L_w	: Kiriş başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi arasındaki bağlantıda kullanılan etkin köşe kaynak uzunluğu, mm.
M_f	: Alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.
M_f	: Kolon başlık levhaları arasına kaynaklanan alın levhası dış yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.
M_f	: Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.
M_f	: Kiriş ucunda gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.
M_{pc}	: Kiriş başlık hizasındaki kolon eğilme momenti dayanımı, kNm.
M_{pr}	: Plastik mafsallarda beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm.
M_{uv}	: Kiriş uçlarında olası plastik mafsallardaki kesme kuvveti nedeniyle kolon ekseninde meydana gelen ek eğilme momenti, kNm.
P	: Kiriş üzerindeki sabit tekilli yük, kN.
R_t	: Beklenen çekme dayanımının karakteristik çekme dayanımına oranı.
R_y	: Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.
T_{req}	: Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının gerekli dayanımı, kN.
U_{bs}	: Çekme gerilmeleri yayılımını göz önüne alan bir katsayı.
V_h	: Plastik mafsallardaki gerekli kesme kuvveti dayanımı, kNm.
W	: Kiriş üzerindeki sabit yayılı yük, kN/m.
W_T	: T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği; daralan bir enkesite sahip ise ilk bulonların hizasında T-parçanın gövde genişliği.
W_p	: Kirişin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm ³ .
W_{pb}	: Kirişin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm ³ .
W_{pc}	: Kolon zayıf eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm ³ .
W_{whit}	: Whitmore genişliği, mm.
W_x	: Profilin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm ³ .
W_y	: Profilin zayıf eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm ³ .
Y_p	: Alın levhasının akma çizgisi mekanizması parametresi, mm.
a	: Kiriş ucundan azaltılmış kiriş enkesitinin başlangıcına olan yatay mesafe, mm.
a_w	: Köşe kaynak etkin kalınlığı, mm.
b	: Azaltılmış kiriş enkesitinin uzunluğu, mm.
b	: Başlık genişliği, mm.
b	: T-parçanın başlığındaki bulonların merkezi ile gövdesindeki eğri bölgenin başlangıcı arasındaki uzaklık, mm.
b_{bf}	: Kiriş başlık genişliği, mm.

b_{fb}	: Kiriş başlık genişliği, mm.
b_{fc}	: Kolon başlık genişliği, mm.
b_{fp}	: Başlık levhasının genişliği, mm.
c	: Azaltılmış kiriş enkesitinin ortasındaki kesim derinliği, mm.
d	: Enkesit yüksekliği, mm.
d	: Kiriş enkesit yüksekliği, mm.
d_b	: Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.
d_b	: Kiriş enkesit yüksekliği, mm.
d_c	: Kolon enkesit yüksekliği, mm.
d_{tht}	: Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığındaki çekme kuvveti etkisindeki bulonların delik çapları, mm
d_{tb}	: Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın birleşiminde kullanılacak bulonların çapı, mm.
d_{vb}	: Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak bulonların çapı, mm.
g_{tb}	: T-parçanın başlığindeki bulonların merkezleri arasındaki yatay uzaklık, mm.
g_{vb}	: Kiriş başlığında yer alan bulonlar arasındaki yatay uzaklık, mm.
h	: Köşe bölgelerdeki yarıçap çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliği, mm.
i	: Atalet yarıçapı, mm.
l_c	: Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki uzaklık, mm.
l_n	: Plastik mafsallar arasındaki mesafe, mm.
n	: Pekleşmeyi dikkate alan malzeme sabiti.
n_b	: Basınç başlığindeki bulon sayısı.
n_b	: Kirişin bir başlığında kullanılan toplam bulon sayısı.
n_{tb}	: Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.
n_{vb}	: Kiriş başlığindeki bağlantıda kullanılan bulon sayısı.
n_w	: Köşe kaynak sayısı.
p	: Basınç gerilmesi, MPa.
q	: Eşdeğer von Mises gerilmesi, MPa.
r	: Köşe bölgelerdeki yarıçap, mm.
s_1	: Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyine en yakın bulon sırası ile bu yüzey arasındaki uzaklık, mm.
s_2	: Kiriş ucu ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.
s_e	: Kolon başlıkları arasına kaynaklanan alın levhasına en yakın bulon sırası ile bu levhanın yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.
s_i	: Ardışık iki bulon deliğinin merkezleri arasındaki uzaklık, mm.
s_{vb}	: Kiriş başlığindeki bulon deliklerinin merkezleri arasındaki uzaklık, mm.
t	: Alın levhasının kalınlığı, mm.
t	: Kiriş başlığı veya T-parça gövdesinin kalınlığı, mm.
t	: T-parçanın başlık kalınlığı, mm.
t_{bf}	: Kiriş başlık kalınlığı, mm.
t_{bw}	: Kiriş gövde kalınlığı, mm.
t_f	: Başlık kalınlığı, mm.
t_f	: Kiriş başlık kalınlığı, mm.
t_{fb}	: Kiriş başlık kalınlığı, mm.

- t_{fc} : Kolon başlık kalınlığı, mm.
 t_{ft} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.
 t_p : Alın levhası kalınlığı, mm.
 t_p : Başlık levhasının kalınlığı, mm.
 t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.
 t_{sf} : Kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.
 t_{st} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.
 t_{sw} : Kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.
 t_{tcf} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.
 t_{tcw} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.
 t_{tfb} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.
 t_w : Gövde kalınlığı, mm.
 t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.
 t_{wc} : Kolon gövde kalınlığı, mm.
 ε : Toplam şekil değiştirme.
 ε_0^{pl} : Deney sonucunda elde edilen hasarın başladığı andaki plastik şekil değiştirme.
 ε_{eng} : Mühendislik şekil değiştirmesi.
 ε_{ij}^p : Plastik şekil değiştirme bileşenleri.
 ε_p : Plastik eşdeğer şekil değiştirme değeri (PEEQ).
 ε_{true} : Gerçek şekil değiştirme.
 ε_y : Malzemenin akma şekil değiştirme değeri.
 η : Gerilme üç eksenliliği.
 σ : Hasarsız (etkin) gerilme tensörü.
 $\bar{\sigma}$: Hasarın dikkate alındığı gerilme tensörü.
 σ_{eff} : Eşdeğer (von Mises) gerilme değeri, MPa.
 σ_{eng} : Mühendislik gerilme değeri, MPa.
 σ_m : İzotropik basınç, MPa.
 σ_{true} : Gerçek gerilme değeri, MPa.
 ω_D : Plastik şekil değiştirme ile birlikte artan durum değişkeni.
 ΣM^*_{pb} : Kiriş-kolon birleşim bölgesinde, birleşen kirişlerin her biri için olası (beklenen) plastik moment dayanımları ile kiriş ucundaki olası plastik mafsalda oluşan kesme kuvvetinin kolon eksenine göre hesaplanan eğilme momenti katkısının toplamı, kNm.
 ΣM^*_{pc} : Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri göz önüne alınarak kiriş boyuna eksenini hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı, kNm.
 ΣM_{pr} : Plastik mafsal bölgesindeki beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm.

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Profillerin enkesit özellikleri.	25
Çizelge 4.2 : Profillerin atalet ve plastik mukavemet momentleri.	26
Çizelge 4.3 : S275 ve S355 yapı çeliği malzeme özellikleri.	26
Çizelge 4.4 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.	46
Çizelge 4.5 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	47
Çizelge 4.6 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.	61
Çizelge 4.7 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	61
Çizelge 4.8 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.	72
Çizelge 4.9 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	72
Çizelge 4.10 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş, kolon ve T-parça.	98
Çizelge 4.11 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	98
Çizelge 4.12 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş, kolon ve T-parça.	122
Çizelge 4.13 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	122
Çizelge 4.14 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.	132
Çizelge 4.15 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.	132
Çizelge 6.1 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların malzeme özellikleri.	152
Çizelge 6.2 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş ve kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi ve çekme dayanımları.	153
Çizelge 6.3 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş ve kolon malzemesinin birim şekil değiştirme değerleri.	153
Çizelge 6.4 : TS-CYC 04 numunesindeki birleşimde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.	153
Çizelge 6.5 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçalar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.	157
Çizelge 6.6 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısı olarak etkilenmiş bölgesi için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.	159
Çizelge 6.7 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.	162

Çizelge 6.8 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.	164
Çizelge 6.9 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.	167
Çizelge 6.10 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).....	169
Çizelge 6.11 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).	171
Çizelge 6.12 : P3 numunesindeki malzemesinin özellikleri.	186
Çizelge 6.13 : P3 numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.....	186
Çizelge 6.14 : Birleşimde kullanılan bulonların malzemesinin özellikleri.....	186
Çizelge 6.15 : P3 numunesindeki alın levhası için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.....	188
Çizelge 6.16 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.	190
Çizelge 6.17 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	193
Çizelge 6.18 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).....	195
Çizelge 6.19 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).	195
Çizelge 6.20 : CT-RBS numunesindeki elemanların malzeme özellikleri.	210
Çizelge 6.21 : CT-RBS numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.....	211
Çizelge 6.22 : Birleşimde kullanılan bulonların malzemesinin özellikleri.....	211
Çizelge 6.23 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.	212
Çizelge 6.24 : CT-RBS numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.....	214
Çizelge 6.25 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	216
Çizelge 6.26 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).....	219
Çizelge 6.27 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).	220
Çizelge 6.28 : BFP-1 numunesinde kullanılan malzemenin özellikleri.....	232
Çizelge 6.29 : BFP-1 numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.....	232
Çizelge 6.30 : Birleşimde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.	233
Çizelge 6.31 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanları için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.	234
Çizelge 6.32 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.	237
Çizelge 6.33 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	239
Çizelge 6.34 : 8.8 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	242
Çizelge 6.35 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).....	244

Çizelge 6.36 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).	244
Çizelge 7.1: Birleşimlerde kullanılan profillerin ve levhaların malzeme özellikleri.	276
Çizelge 7.2: Birleşimlerde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.	277
Çizelge 7.3: Kiriş için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.	278
Çizelge 7.4: Kolon ve çelik levhalar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.	280
Çizelge 7.5: 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.....	283
Çizelge 7.6: Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).	285
Çizelge 7.7: Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).	286





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi.	9
Şekil 2.2 : Bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimi.	10
Şekil 2.3 : Bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimi.	12
Şekil 2.4 : Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimi.	15
Şekil 2.5 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı kiriş-kolon birleşimi.	17
Şekil 3.1 : Deneylerde elde edilen gerilme yayılımı (Driscoll ve diğ, 1982).	21
Şekil 4.1 : Kiriş-kolon birleşimlerinin bulunduğu yapısal sistem.	27
Şekil 4.2 : Kesme kuvvetinin hesaplanması.	28
Şekil 4.3 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.	35
Şekil 4.4 : Başlık levhası, alın levhası, kayma levhası ve rijitleştirici levhanın görünüşleri.	36
Şekil 4.5 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüş.	45
Şekil 4.6 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	45
Şekil 4.7 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.	46
Şekil 4.8 : Alın levhalı bulonlu I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.	48
Şekil 4.9 : Alın levhası, uç levhası, bağlantı levhaları ve rijitlik levhaları.	49
Şekil 4.10 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.	51
Şekil 4.11 : Rijitleştirici levhanın kolon yüzünden 50 mm geride sonlandırılması... ..	52
Şekil 4.12 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.	59
Şekil 4.13 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	60
Şekil 4.14 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.	60
Şekil 4.15 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.	62
Şekil 4.16 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki bağlantı levhaları ve azaltılmış kiriş enkesiti.	63
Şekil 4.17 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.	65
Şekil 4.18 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yan ve kesit görünüşleri.	70
Şekil 4.19 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	70
Şekil 4.20 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.	71

Şekil 4.21 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.	73
Şekil 4.22 : Birleşimdeki rijitlik levhası ve T-parçalar.	74
Şekil 4.23 : T-parçaların başlıklarının yatay kenarları arasındaki minimum mesafe.	76
Şekil 4.24 : T-parçaların başlık iç yüzeyi ile kolon gövdesi yüzeyi arasındaki minimum mesafe.	76
Şekil 4.25 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.	96
Şekil 4.26 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	97
Şekil 4.27 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A enkesiti.	97
Şekil 4.28 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin elemanları.	99
Şekil 4.29 : Birleşimdeki rijitlik levhası ve T-parçalar.	100
Şekil 4.30 : T-parçaların başlıklarının yatay kenarları arasındaki minimum mesafe.	102
Şekil 4.31 : T-parçaların başlık iç yüzeyi ile kolon gövdesi yüzeyi arasındaki minimum mesafe.	102
Şekil 4.32 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.	120
Şekil 4.33 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	121
Şekil 4.34 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi F-F enkesiti.	121
Şekil 4.35 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.	123
Şekil 4.36 : Birleşimdeki bağlantı levhaları.	124
Şekil 4.37 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.	125
Şekil 4.38 : Kaynak ulaşım delikleri.	126
Şekil 4.39 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.	130
Şekil 4.40 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.	130
Şekil 4.41 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.	131
Şekil 5.1 : İzotropik, kinematik ve birleşik pekleşme.	134
Şekil 5.2 : Newton Raphson yöntemi.	135
Şekil 5.3 : ABAQUS katı elemanlardan örnekler.	136
Şekil 5.4 : C3D8 katı elemanı.	137
Şekil 5.5 : Tam integrasyon yönteminde eleman davranışı.	137
Şekil 5.6 : C3D8R (linear brick element) integrasyon noktası.	138
Şekil 5.7 : Azaltılmış integrasyon yönteminde eleman davranışı.	138
Şekil 5.8 : Esas ve tamamlayıcı yüzeyler.	139
Şekil 5.9 : Temas yüzeyinin normal bileşeni için kabuller.	140
Şekil 5.10 : Çekme testi sırasında tipik bir metal numunesinin davranışı.	141
Şekil 5.11 : Yapısal çeliğin gerilme - şekil değiştirme davranışı.	144
Şekil 5.12 : Hasar değişkeninin görelî plastik yer değiştirmeye bağlı değişimi.	145
Şekil 6.1 : TS-CYC 04 numunesinin geometrisi.	150

Şekil 6.2 : TS-CYC 04 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.	151
Şekil 6.3 : TS-CYC 04 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları. ...	152
Şekil 6.4 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrisi.	158
Şekil 6.5 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.	158
Şekil 6.6 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısı olarak etkilenmiş bölgesi için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrileri.	160
Şekil 6.7 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısı olarak etkilenmiş ve etkilenmemiş kısımları için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.	161
Şekil 6.8 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	163
Şekil 6.9 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş için elde edilen gerçek gerilme –plastik şekil değiştirme eğrisi.	163
Şekil 6.10 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	165
Şekil 6.11 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	166
Şekil 6.12 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	168
Şekil 6.13 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	168
Şekil 6.14 : Hasar değişkeni ile plastik yer değiştirmenin doğrusal ilişkisi.	172
Şekil 6.15 : Yük protokolü.	174
Şekil 6.16 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.	176
Şekil 6.17 : %1 görel kat öteleme açısında T-parçanın başlığının orta bölgesinde akma davranışının başlangıcı.	177
Şekil 6.18 : Plastik deformasyonların ilerleyen adımlarda yayılışı.	177
Şekil 6.19 : %4 görel kat öteleme açısında kalıcı eğilme deformasyonlarının oluşumu.	178
Şekil 6.20 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumunun başlangıcı.	178
Şekil 6.21 : Çatlağın levha kenarlarına doğru ilerlemesi.	179
Şekil 6.22 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.	180
Şekil 6.23 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.	181
Şekil 6.24 : Birleşim numunelerinin geometrisi.	183
Şekil 6.25 : P3 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.	184
Şekil 6.26 : P3 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları.	185
Şekil 6.27 : P3 numunesindeki alın levhasının gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.	189
Şekil 6.28 : P3 numunesindeki alın levhasının gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.	189
Şekil 6.29 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	191
Şekil 6.30 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	192

Şekil 6.31 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	194
Şekil 6.32 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	194
Şekil 6.33 : AISC 358-22’de tanımlanan yük protokolü.	198
Şekil 6.34 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.	200
Şekil 6.35 : %0,75 görelî kat öteleme açısında kiriş başlıklarında akma davranışı.	201
Şekil 6.36 : %2 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonların yayılışı.	201
Şekil 6.37 : %4 görelî kat öteleme açısında kiriş başlığı yerel burkulması.	202
Şekil 6.38 : %5 görelî kat öteleme açısında kiriş başlıkları ve gövdesinde yerel burkulma deformasyonu.	202
Şekil 6.39 : %6 görelî kat öteleme açısında kiriş ucu enkesitinde çatlak oluşumu.	203
Şekil 6.40 : %6 görelî kat öteleme açısında kiriş başlıklarında çatlakların oluştuğu ikinci bölge.	203
Şekil 6.41 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.	205
Şekil 6.42 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.	206
Şekil 6.43 : CT-RBS numunesinin çizimleri.	208
Şekil 6.44 : CT-RBS birleşiminin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.	209
Şekil 6.45 : Mesnetlerin ve yük uygulama noktasının model üzerindeki görünüşleri	210
Şekil 6.46 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolonun gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.	213
Şekil 6.47 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolonun gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.	214
Şekil 6.48 : CT-RBS numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	215
Şekil 6.49 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	216
Şekil 6.50 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	218
Şekil 6.51 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	218
Şekil 6.52 : AISC 358-22’de tanımlanan yük protokolü.	222
Şekil 6.53 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.	224
Şekil 6.54 : %1 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.	225
Şekil 6.55 : %4 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonların kiriş başlığından diğer bölgelere yayılışı.	226
Şekil 6.56 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.	226
Şekil 6.57 : Analiz sonucunda elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımı.	228
Şekil 6.58 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.	228
Şekil 6.59 : BFP-1 numunesinin geometrisi.	230
Şekil 6.60 : BFP-1 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.	231
Şekil 6.61 : BFP-1 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları.	232
Şekil 6.62 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanlarının gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.	235

Şekil 6.63 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanlarının gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.	236
Şekil 6.64 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	238
Şekil 6.65 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	238
Şekil 6.66 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	240
Şekil 6.67 : 10.9 bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	241
Şekil 6.68 : 8.8 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	243
Şekil 6.69 : 8.8 bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	243
Şekil 6.70 : AISC 358-22’de tanımlanan yük protokolü.	247
Şekil 6.71 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.	249
Şekil 6.72 : %2 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.	249
Şekil 6.73 : %4 görelî kat öteleme açısında yerel burkulma başlangıcı.	250
Şekil 6.74 : %4 görelî kat öteleme açısında panel bölgesinde plastik deformasyonlar.	250
Şekil 6.75 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.	251
Şekil 6.76 : Deney sonucunda ve %50 önçekme uygulamasının yapıldığı sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması. ...	253
Şekil 7.1 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi izometrik görünüşü.	256
Şekil 7.2 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	257
Şekil 7.3 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	257
Şekil 7.4 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	258
Şekil 7.5 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	258
Şekil 7.6 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.	259
Şekil 7.7 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	260
Şekil 7.8 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	260
Şekil 7.9 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	261
Şekil 7.10 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	261
Şekil 7.11 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.	262
Şekil 7.12 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	263
Şekil 7.13 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	263

Şekil 7.14 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	264
Şekil 7.15 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	264
Şekil 7.16 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.	265
Şekil 7.17 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	266
Şekil 7.18 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	266
Şekil 7.19 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	267
Şekil 7.20 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	267
Şekil 7.21 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.	268
Şekil 7.22 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	269
Şekil 7.23 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	269
Şekil 7.24 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	270
Şekil 7.25 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	270
Şekil 7.26 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.	271
Şekil 7.27 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.	272
Şekil 7.28 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.	272
Şekil 7.29 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.	273
Şekil 7.30 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.	273
Şekil 7.31 : Kalınlık boyunca dört katman eleman ağı kullanımı.	274
Şekil 7.32 : ABAQUS yazılımında eleman tanımı.	275
Şekil 7.33 : ABAQUS yazılımında sonlu eleman ağı özellikleri penceresi.	275
Şekil 7.34 : ABAQUS yazılımında malzeme tanımlama penceresi - elastik malzeme özellikleri.	276
Şekil 7.35 : Kirişin mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrileri.	279
Şekil 7.36 : Kirişin gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.	279
Şekil 7.37 : Kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.	281
Şekil 7.38 : Kolon ve çelik levhalar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	282
Şekil 7.39 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.	284
Şekil 7.40 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.	284
Şekil 7.41 : Başlık levhası ile bulonlar arasındaki temas yüzeyleri.	288

Şekil 7.42 : Temas yüzeylerinde normal bileşen davranış modeli.	290
Şekil 7.43 : Temas yüzeylerinde teğetsel davranış modeli.	290
Şekil 7.44 : Kiriş-kolon birleşiminde tie constraint tanımı.	291
Şekil 7.45 : Rigid body tanımının uygulanması.	292
Şekil 7.46 : Mesnetlerin ve yük uygulama noktasının model üzerindeki görünüşleri.	292
Şekil 7.47 : ABAQUS yazılımında kirişin yanal olarak desteklenmesi.	293
Şekil 7.48 : Bulonların merkez enkesitine çekme kuvvetinin uygulanması.	294
Şekil 7.49 : AISC 341-22 Bölüm K2b.4'te tanımlanan yük protokolü ve yüklemenin uygulanması.	294
Şekil 7.50 : Modellerdeki analiz adımları.	295
Şekil 7.51 : Gerilme bileşenleri.	297
Şekil 8.1 : %1 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.	301
Şekil 8.2 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	302
Şekil 8.3 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	302
Şekil 8.4 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	303
Şekil 8.5 : %6 görel kat öteleme açısında başlık yerel burkulması.	303
Şekil 8.6 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.	304
Şekil 8.7 : Analiz sonundaki plastik deformasyon dağılımı.	304
Şekil 8.8 : Rijitleştirici levha ve bağlantı levhalarında plastik deformasyonlar.	305
Şekil 8.9 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.	305
Şekil 8.10 : Çevrimsel eğri.	306
Şekil 8.11 : A-A enkesiti.	307
Şekil 8.12 : B-B enkesiti.	308
Şekil 8.13 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.	308
Şekil 8.14 : B çizgisi üzerinde PEEQI ve RI indisleri.	309
Şekil 8.15 : Gerilme dağılımının inceleneceği enkesitler.	311
Şekil 8.16 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	312
Şekil 8.17 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	312
Şekil 8.18 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	313
Şekil 8.19 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	313
Şekil 8.20 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	314
Şekil 8.21 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	314
Şekil 8.22 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	315
Şekil 8.23 : B-B enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	316
Şekil 8.24 : B-B enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	316
Şekil 8.25 : B-B enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	317
Şekil 8.26 : B-B enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	317
Şekil 8.27 : B-B enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	318
Şekil 8.28 : B-B enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	318
Şekil 8.29 : B-B enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	319
Şekil 8.30 : %1 görel kat öteleme açısında model görünüşü.	320
Şekil 8.31 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	320
Şekil 8.32 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	321
Şekil 8.33 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	321
Şekil 8.34 : %6 görel kat öteleme açısında başlık yerel burkulma deformasyonu.	322
Şekil 8.35 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.	322
Şekil 8.36 : %6 görel kat öteleme plastik deformasyonları.	323
Şekil 8.37 : Başlık bağlantı levhalarında plastik deformasyonlar.	323
Şekil 8.38 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.	324

Şekil 8.39 : Çevrimsel eğri.	325
Şekil 8.40 : A-A enkesiti.....	326
Şekil 8.41 : A-A enkesitinde PEEQI ve RI indisleri.....	326
Şekil 8.42 : Gerilme dağılımının inceleneceği A-A enkesiti.	327
Şekil 8.43 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	328
Şekil 8.44 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	329
Şekil 8.45 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	329
Şekil 8.46 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	330
Şekil 8.47 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	330
Şekil 8.48 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	331
Şekil 8.49 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	331
Şekil 8.50 : RBS-A, RBS-B, RBS-C ve RBS-D kiriş-kolon birleşimlerinin çizimleri.	333
Şekil 8.51 : Kiriş başlıklarının kesim geometrisi.....	334
Şekil 8.52 : RBS-A, RBS-B, RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin sonlu eleman modeli görünüşleri.....	335
Şekil 8.53 : RBS-A, RBS-AA, RBS-B, ve RBS-C birleşimlerinde %5 dönme değerinde plastik şekil değiştirmeler.	336
Şekil 8.54 : RBS-A, RBS-AA, RBS-B, ve RBS-C birleşimlerinde %5 dönme değerinde kiriş ucundaki plastik şekil değiştirmeler.	337
Şekil 8.55 : RBS-D birleşiminde %5 dönme değerinde plastik şekil değiştirmeler.....	338
Şekil 8.56 : RBS-D birleşiminde kiriş ucundaki plastik şekil değiştirmeler.	339
Şekil 8.57 : Kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarında PEEQ dağılımları.	340
Şekil 8.58 : Tüm birleşimlerinin çevrimsel eğrileri.	341
Şekil 8.59 : Tüm birleşimlerin çevrimsel eğrilerinin karşılaştırması.....	342
Şekil 8.60 : RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin çevrimsel eğrileri.	342
Şekil 8.61 : PEEQI ve RI indislerinin elde edileceği A-A enkesiti.	343
Şekil 8.62 : A çizgisi boyunca elde edilen PEEQI ve RI indisleri.....	343
Şekil 8.63 : RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin PEEQI ve RI indisleri.	344
Şekil 8.64 : RBS-A ve RBS-AA birleşimlerinin PEEQI ve RI indisleri	345
Şekil 8.65 : %1 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.	345
Şekil 8.66 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.	346
Şekil 8.67 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve kiriş başlığında yerel burkulma başlangıcı.	346
Şekil 8.68 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.	347
Şekil 8.69 : T-parçalarda plastik deformasyonlar.	347
Şekil 8.70 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.	348
Şekil 8.71 : Analiz sonucunda elde edilen S23 kayma gerilme dağılımı.	349
Şekil 8.72 : Çevrimsel eğri.	349
Şekil 8.73 : A-A enkesiti.....	350
Şekil 8.74 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.	351
Şekil 8.75 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	352
Şekil 8.76 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	353
Şekil 8.77 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	353
Şekil 8.78 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	354
Şekil 8.79 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	354
Şekil 8.80 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	355
Şekil 8.81 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	355
Şekil 8.82 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.	356

Şekil 8.83 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar	357
Şekil 8.84 : %6 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve giriş	
başlığında yerel burkulma başlangıcı.....	357
Şekil 8.85 : %7 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve girişte yanıl	
burulmalı burkulma davranışı.	358
Şekil 8.86 : %7 görel kat öteleme açısında yerel burkulma davranışı ve çatlak	
oluşumu.....	358
Şekil 8.87 : T-parçalarda plastik deformasyonlar.....	359
Şekil 8.88 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.....	360
Şekil 8.89 : Analiz sonucunda elde edilen S23 kayma gerilme dağılımı.	360
Şekil 8.90 : Çevrimsel eğri.	361
Şekil 8.91 : A-A enkesiti.	362
Şekil 8.92 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.	363
Şekil 8.93 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	364
Şekil 8.94 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	364
Şekil 8.95 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	365
Şekil 8.96 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	365
Şekil 8.97 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	366
Şekil 8.98 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	366
Şekil 8.99 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	367
Şekil 8.100 : %1 görel kat öteleme açısında kaynak ulaşım deliklerinin etrafında	
plastik deformasyon başlangıcı.	368
Şekil 8.101 : %2 görel kat öteleme açısında giriş ucu enkesitinde plastik	
deformasyonlar.....	368
Şekil 8.102 : %4 görel kat öteleme açısında giriş ucu enkesitinde plastik	
deformasyonlar.....	369
Şekil 8.103 : %5 görel kat öteleme açısında giriş başlığında yerel burkulma	
oluşumu.....	369
Şekil 8.104 : %6 görel kat öteleme açısında yerel burkulma deformasyonu.	370
Şekil 8.105 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.	370
Şekil 8.106 : Başlık bağlantı levhalarında plastik deformasyonları.	371
Şekil 8.107 : Kaynak ulaşım deliklerinin etrafında plastik deformasyonlar.	372
Şekil 8.108 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.....	372
Şekil 8.109 : Çevrimsel eğri.	373
Şekil 8.110 : A-A enkesiti.	374
Şekil 8.111 : A-A enkesitinde PEEQI ve RI indisleri.	375
Şekil 8.112 : Gerilme dağılımının inceleneceği A-A enkesiti.....	376
Şekil 8.113 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.	376
Şekil 8.114 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.	377
Şekil 8.115 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.	377
Şekil 8.116 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.	378
Şekil 8.117 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.	378
Şekil 8.118 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.	379
Şekil 8.119 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.	379
Şekil 8.120 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.....	380
Şekil 8.121 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.....	381
Şekil 8.122 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve giriş	
başlığında yerel burkulma başlangıcı.....	381
Şekil 8.123 : %5 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.	382

Şekil 8.124 : %5 görelî kat öteleme açısında başlık levhasında plastik deformasyonlar.....	382
Şekil 8.125 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.....	383
Şekil 8.126 : Çevrimsel eğri.	384
Şekil 8.127 : A-A enkesiti.....	385
Şekil 8.128 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.	385
Şekil 8.129 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiğı.	387
Şekil 8.130 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiğı.	387
Şekil 8.131 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiğı.	388
Şekil 8.132 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiğı.	388
Şekil 8.133 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiğı.	389
Şekil 8.134 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiğı.	389
Şekil 8.135 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiğı.	390
Şekil A.1 : Kiriş enine doğrultuda bulon yerleşimi.	406
Şekil A.2 : Plastik mafsallın yeri.	407
Şekil A.3 : Başlık levhasında 1.blok kırılma modu.	409
Şekil A.4 : Başlık levhasında 2.blok kırılma modu.	411
Şekil A.5 : Kiriş başlığındaki blok kırılma modu.	413
Şekil A.6 : Birleşimde bulonlar arasındaki ve bulonlar ile levha kenarları arasındaki uzaklıklar.....	417
Şekil A.7 : Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı.	420
Şekil A.8 : Birleşimdeki kaynak detayları.	421
Şekil B.1: Birleşim değişkenleri.	424
Şekil B.2: Plastik mafsallın yeri.....	424
Şekil B.3: Çekme etkisindeki bulon sıraları ile basınç başlığı merkezi arasındaki uzaklıklar.....	426
Şekil B.4: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.	431
Şekil B.5: Plastik mafsallın ile kolon merkezi arasındaki uzaklık.....	432
Şekil B.6: Birleşimdeki kaynak detayları.	434
Şekil C.1: Azaltılmış kiriş enkesiti geometrisi.	435
Şekil C.2: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.	438
Şekil C.3: Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı.	439
Şekil C.4: Birleşimdeki kaynak detayları.	440
Şekil D.1: Plastik mafsallın yeri.	443
Şekil D.2: Whitmore genişliğı ve ilk bulon hizasındaki genişlik.	444
Şekil D.3: T-parçanın başlık genişliğı.	446
Şekil D.4: T-parçanın gövdesindeki bulonların yerleşimi.	452
Şekil D.5: T-parçada birinci blok kırılma modu.....	454
Şekil D.6: T-parçada ikinci blok kırılma modu.	456
Şekil D.7: Kiriş başlığında blok kırılma modu.	458
Şekil D.8: T-parçanın başlıklarında bulon yerleşimi.	461
Şekil D.9: Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı.	463
Şekil D.10: Birleşimdeki kaynak detayları.	464
Şekil E.1: Plastik mafsallın yeri.....	467
Şekil E.2: Whitmore genişliğı ve kaynak başlangıcında T-parçanın gövdesinin genişliğı.	469
Şekil E.3: T-parçanın başlık genişliğı.....	471
Şekil E.4: T-parçanın gövdesinde blok kırılma durumu.....	476
Şekil E.5: T-parçanın başlıklarında bulon yerleşimi.	479
Şekil E.6: Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı.	481

Şekil E.7: Birleşimdeki kaynak detayları.	483
Şekil F.1: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.	487
Şekil F.2: Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı.	488
Şekil F.3: Birleşimdeki kaynak detayları.	489





MOMENT AKTARAN I-ENKESİTLİ KİRİŞ – ZAYIF EKSEN H-ENKESİTLİ KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

ÖZET

Çelik binalarda deprem yüklerinin karşılanabilmesi için çeşitli yatay yük taşıyıcı sistemlerden yararlanılmaktadır. Bu taşıyıcı sistemlerden biri olan moment aktaran çelik çerçevelerde kiriş-kolon birleşimleri önemli bir rol oynamaktadır. Kirişlerin kolonlara moment aktaracak şekilde rijit ve tam dayanımlı olarak bağlanmasıyla teşkil edilen bu birleşimler, yapının deprem performansını doğrudan etkileyen temel bileşenlerdir. Moment aktaran çelik çerçevelerin tasarımında, ön yeterliliği deneysel ve/veya nümerik çalışmalarla gösterilmiş birleşim tiplerinden faydalanılmaktadır. Bu tür birleşimlerde genellikle kirişlerin kolon başlıklarına, başka bir deyişle, kolon enkesitinin kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimler tercih edilmektedir. Buna karşın, kirişlerin kolon gövdelerine (kolon enkesitinin zayıf eksenine dik doğrultuda) bağlandığı birleşimler ise genellikle moment aktarmayan (mafsallı) şekilde tasarlanmaktadır. Söz konusu birleşimlerin tam dayanımlı olarak teşkil edilmesi, sistemin yatay yük taşıma kapasitesini artırmanın yanı sıra yanal rijitliğini arttırarak ikinci mertebe etkilerin sınırlandırılmasını sağlayabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, hiperstatiklik derecesinin artırılması, yapının deprem yükleri altındaki davranışını olumlu yönde etkileyeceğinden, yapı mühendisleri tarafından daha ekonomik taşıyıcı sistem tasarımlarının yapılmasına da olanak sağlayacaktır. Özellikle kullanım amacı ya da mimari kısıtlamalar nedeniyle yatay yük taşıyıcı sistemin yalnızca moment aktaran çelik çerçevelerden oluştuğu binalarda, bina yüksekliği 20 metreyi aştığında, taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılmasında yer değiştirme sınırları belirleyici bir faktör haline gelmektedir. Bu gibi durumlarda, taşıyıcı sistemde çelik-beton/betonarme kompozit enkesitli kolonlar ile yüksek gövdeli kirişlerin kullanımı tercih edilebilir. Ancak, kompozit kolonların uygulamadaki zorlukları ve yüksek gövdeli kirişlerin kat yüksekliklerini sınırlaması, bu çözümlerin yerine alternatif yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu noktada, alternatif bir uygulama olarak; I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran kiriş – zayıf eksen kolon birleşimlerinin kullanılması öngörülebilir. Böylece binalarda hem yanal rijitliğin hem de dayanımın artmasında etkili olacak bir alternatifi geliştirilmesi sağlanacaktır.

Mevcut standartlarda, deprem dayanımı ve rijitlik gereksinimlerini karşılayan birleşim tipleri, genellikle kirişlerin kolon başlıklarına bağlandığı moment aktaran birleşimlerden oluşmaktadır. Buna karşın, I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran birleşim türleri için yeterliliği deneysel veya analitik olarak gösterilmiş ve standartlarda yer alan bir tasarım yaklaşımı bulunmamaktadır. Ancak, prensip olarak I-enkesitli bir kirişin, H-enkesitli bir kolonun gövdesine rijit ve eğilme momenti aktarabilecek bir şekilde bağlanması uygun bağlantı elemanları vasıtasıyla sağlanabilir. Bu nedenle, söz konusu birleşimlerin

davranışlarının kapsamlı bir şekilde anlaşılması, tasarım esaslarının belirlenmesi ve performanslarının analitik ve/veya deneysel yöntemlerle ortaya konulması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda bu çalışma, davranışı deneysel yöntemlerle belirlenmiş mevcut birleşim tiplerinden yararlanılarak ve uygun bağlantı elemanları vasıtasıyla oluşturulan, moment aktaran I-enkesitli kiriş - H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşimlerinin çevrimsel (tersinir tekrarlı) yükler altında doğrusal olmayan davranışlarının; moment-dönme ilişkisi, rijitlik değişimi, enerji sönümleme kapasitesi ve göçme durumları incelenerek araştırılmasını ve buna bağlı olarak birleşimlerin tasarım esaslarının oluşturulmasını amaçlamaktadır.

Çalışma kapsamında, bulonlu başlık levhali, tam dayanımlı bulonlu alın levhali, tam penetrasyonlu küt kaynaklı, kaynaklı azaltılmış I-enkesitli, bulonlu T-parçalı birleşim ve kaynaklı T-parçalı birleşim olmak üzere 6 (altı) adet moment aktaran I-enkesitli kiriş-H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tipi geliştirilmiştir. Geliştirilen birleşimlerin tasarım esasları AISC 358-22 şartnamesi ve TBDY 2018 yönetmeliğinde ön yeterliliği deneysel olarak gösterilen mevcut birleşim tiplerinden ve literatürdeki benzer birleşim türleri ile ilgili yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak oluşturulmuştur. Birleşimler, belirlenen tasarım esasları izlenerek boyutlandırılmıştır. Birleşimlerde kirişlerin kolonlara bağlantısı, kolon gövdesine ve başlıklarının iç kısmına kaynaklanan bağlantı levhaları ve birleşim tipine göre, gerekli olan diğer elemanlar vasıtasıyla yapılmaktadır.

Geliştirilen birleşimlerin çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan davranışları; moment-dönme ilişkisi, rijitlik değişimi, enerji sönümleme kapasitesi ve göçme durumları ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak incelenecektir. Öngörülen tasarım esaslarının uygunluğunun bilimsel olarak değerlendirilebilmesi için en uygun modelleme esaslarının belirlenmesi ve uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, sonlu eleman modellerinde kullanılacak; eleman ve malzeme modelleri, katı eleman tipleri, yüzey etkileşimleri ve hasar tanımları gibi modelleme esaslarının doğruluğunun gösterilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, tez kapsamında geliştirilen kiriş-kolon birleşimlerine benzer birleşimlerin deney sonuçları esas alınarak birleşim tipleri için doğrulama çalışması yapılmıştır.

Birleşimlerin doğrulama modelleri, C3D8R doğrusal sekiz düğüm noktalı tek integrasyon noktasına sahip hegzagonal katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmıştır. Elemanların yüzeylerinin birbirleriyle olan etkileşimleri için bileşen özellikleri, normal ve teğetsel bileşen olarak tanımlanmıştır. Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması sağlanmıştır. Çevrimsel yükleme altındaki malzeme davranışını temsil edebilmek için malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediği doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilen Ramberg-Osgood denkleminin akma gerilmesini doğrudan denkleme dahil edildiği versiyonu kullanılmıştır. Çelik malzemesinin tekrarlı yükler altında pekleşme modeli olarak, kinematik ve izotropik pekleşmenin birlikte dikkate alındığı, Bauschinger etkisini temsil edebilen ve yük yönünün etkisini göz önünde bulunduran birleşik pekleşme modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman modelindeki hasar oluşması durumu, sünek hasar tanımı (ductile damage) kullanılarak değerlendirilmiştir. Birleşim modelleri, çalışmalarda belirtilen çevrimsel yük protokolü uygulanarak analiz edilmiştir. Sonlu eleman analizi ve deney sonucunda elde edilen çevrimsel eğriler karşılaştırıldığında sonuçların yeterince benzer olduğu ve yeterli uyumun sağlandığı gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar,

modellemede kullanılan yöntem ve prensiplerin uygunluğunu ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda, izlenen modelleme yaklaşımı ve uygulanan tanımların benzer birleşimlerde de kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Ayrıca, hasarın gözlenip rapor edildiği deneysel çalışmalarda, hasarın oluşum şekli ve meydana geldiği bölge ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, aralarında yüksek düzeyde benzerlik olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, doğrulama modellerinde kullanılan hasar modeli tanımları ve parametrelerinin, tez kapsamında geliştirilen birleşim modellerinin analizlerinde de kullanılmasının uygun olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşim modelleri, doğruluğu gösterilen yöntem ve esaslara dayandırılarak oluşturulmuştur. Modellerde kolon yüksekliği, ardışık iki katın orta noktaları arasında kalan yükseklik olarak, kiriş uzunluğu ise açıklık ortasına kadar olan uzunluk olarak alınmıştır. Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak, zaman tanım alanında dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, AISC 341-22 şartnamesinde tanımlanan yükleme protokolüne uygun şekilde, tekrarlı yüklerin kiriş ucundaki enkesitin tamamına yer değiştirme kontrollü olarak uygulanması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, plastik deformasyonların kirişte oluşan plastik mafsallarda yoğunlaştığı, birleşimlerin diğer kısımlarında ise oldukça sınırlı düzeyde plastik deformasyonların oluştuğunu gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda, tekrarlı yükler altında birleşimlerin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, eğilme momenti – görel kat öteleme açısı çevrimsel eğrileri oluşturulmuştur. Çevrimsel eğriler değerlendirildiğinde, modellenen tüm birleşimlerin, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)’da belirtilen, 0.04 rad görel kat öteleme açısında, kolon başlıklarının ucunda oluşan eğilme momenti dayanımının, kirişin plastik eğilme momenti kapasitesinin %80’inden ($0.80M_p$) daha az olmadığı görülmüştür. Bazı birleşimlerin analizleri sırasında plastik deformasyonların hasar tanımı için yapılan değere ulaşip toplam hasar değişkeninin 1 (bir) değerine eşit olmasıyla, en yüksek plastik deformasyonların olduğu bölgede sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, o bölgelerde çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir. Bağlantı levhalarındaki plastik şekil değiştirme değerlerinin plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında, mertebe olarak çok küçük olduğu bu nedenle bu bölgelerde çatlak oluşma riskinin çok düşük olduğu değerlendirilmiştir.

Çalışmanın kapsamını genişletmek için, en etkili I-enkesitli kiriş zayıf eksen H-enkesitli kiriş-kolon birleşim tipini belirlemeye yönelik bir çalışma da gerçekleştirilmiştir. Referans olarak belirlenen birleşimin davranışı genel olarak değerlendirildikten sonra, kiriş-kolon bağlantı geometrisinin ve azaltılmış kiriş bölgesinin konumunun birleşim davranışı üzerindeki etkisi de ek olarak geliştirilen 4 (dört) birleşim ile incelenmiştir. Ayrıca, kolonların başlıkları arasına kaynaklanan, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının kalınlıklarının plastik şekil değiştirmelerin yayılımına etkisi araştırılmıştır. Tüm I-enkesitli azaltılmış kiriş-zayıf eksen H-kolon birleşimleri, AISC 341-22 şartnamesinde süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin birleşimleri için belirtilen şartları sağlamıştır. Bununla birlikte, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının ucundan dışarıya doğru eğrisel olarak azalan bir formda uzatılmasının, gerilme yığılmalarını azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca, bağlantı levhalarının kalınlıklarının kiriş başlıkları ve gövdesinin kalınlıklarıyla uyumlu hale getirilmesinin, iki bölge arasındaki çatlak oluşma riskini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.



NONLINEAR BEHAVIOR OF MOMENT-RESISTING I-BEAM – TO – WEAK AXIS H-COLUMN CONNECTIONS SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

SUMMARY

In steel buildings, various lateral load-resisting systems are employed to withstand seismic forces. Among these systems, moment-resisting steel frames play a critical role, with beam-to-column connections serving as key components. These connections, formed by rigid and fully restrained joints that allow moment transfer between beams and columns, are fundamental elements that directly influence the seismic performance of the structure. In the design of moment-resisting frames, prequalified connection types, whose adequacy has been demonstrated through experimental studies, are commonly utilized. In such connections, beams are typically connected to the column flanges, that is, perpendicular to the strong axis of the column cross-section. Common examples of widely used, experimentally validated prequalified connections include fully restrained bolted end-plate, bolted flange plate, complete joint penetration welded, bolted T-stub, and welded reduced beam section connections.

On the other hand, connections where beams are attached to the web of H-shaped columns are generally designed as pinned (non-moment-resisting) joints. However, forming these connections as fully restrained can potentially enhance the lateral load-carrying capacity and stiffness of the system, thereby limiting second-order effects. Increasing the degree of redundancy (hyperstaticity) also contributes positively to the overall seismic performance of the structure and enables structural engineers to develop more economical framing systems.

In buildings where the lateral load-resisting system is composed solely of steel moment-resisting frames, often due to usage requirements or architectural constraint, story drift limits become a governing factor in the member sizing when the building height exceeds 20 meters. In such cases, the use of composite (steel-concrete) columns and deep beams may be preferred. However, practical difficulties with composite columns and floor height restrictions imposed by deep beams necessitate alternative solutions. One such alternative is the use of moment-resisting connections in which I-shaped beams are connected to the webs of H-shaped columns. These configurations are expected to enhance both lateral stiffness and strength, making it a promising option for seismic design applications.

Currently, most of the prequalified connection types that satisfy seismic strength and stiffness requirements in existing standards involve beams connected to column flanges. There is no standardized design approach for moment-resisting connections where I-shaped beams are connected to the webs of H-shaped columns. Nevertheless, in principle, such a connection can be configured to be rigid and moment-resisting using appropriate detailing. Therefore, a comprehensive understanding of the behavior of these connections and the development of design criteria through analytical and/or

experimental methods is of great importance. Accordingly, this study aims to investigate the nonlinear behavior of moment resisting I-beam-to-weak axis H-column connections, formed using details based on validated connection types, under cyclic loading. The study focuses on evaluating moment-rotation behavior, stiffness degradation, energy dissipation capacity, and failure modes, and ultimately aims to establish design principles for these connections. These principles will support the safe seismic design of such connections according to the identified criteria and application conditions.

Within the scope of the study, six (6) different moment-resisting I-beam- to- weak axis H-column connections were developed: bolted flange plate, fully restrained bolted end plate, complete joint penetration welded, welded reduced beam section, bolted T-stub, and welded T-stub connections. The design principles of these connections were derived based on AISC 358-22 and TBDY 2018, based on validated connection types, as well as relevant experimental and numerical studies in literature. In developing these principles, the requirements for special moment-resisting frames (SMRFs) stated in TBDY 2018 were considered. Each connection was designed following the defined design principles. The beam-to-column connection was established using connection plates welded to the column web and the inner surfaces of the column flanges. Depending on the connection type, other components such as end plates, T-stubs, stiffeners, flange plates, and shear tabs were also utilized. These connection elements were proportioned to prevent plastic deformation within themselves, thus ensuring that plastic hinges would primarily develop in the predetermined regions of the beam for each connection type.

The nonlinear cyclic behavior of the developed connections was examined using ABAQUS finite element software by evaluating moment-rotation behavior, stiffness degradation, energy dissipation capacity, and failure mechanisms. To ensure the scientific validity of the proposed design criteria, it was essential to identify and apply the most appropriate modeling principles. Therefore, it was of critical importance to validate the accuracy of modeling parameters such as element and material models, solid element types, surface interactions, and damage definitions used in the finite element models. For this reason, several experimentally tested connection types were modeled in ABAQUS and validated by comparing the analysis results with the experimental findings. Within this scope, validation studies were conducted for four (4) different connection types using experimental results from T-stub, bolted flange plate, fully restrained bolted end-plate, and reduced beam section connections under cyclic loading. Due to the similarity of the connection details between the complete joint penetration welded I-beam to weak-axis H-column connection and the reduced beam section connection, the validation of the latter was also considered valid for the former. Similarly, the validation of the bolted T-stub connection was deemed sufficient for the welded T-stub configuration.

The finite element validation models were created using C3D8R linear hexahedral solid elements with a single integration point, which have been proven effective in flexural analyses in the literature. A surface-to-surface contact interaction model was used for defining the interaction between connected components. Surface interaction behavior was specified with separate definitions for normal and tangential directions. For components joined by welding, tie constraints were used to ensure equal degrees of freedom across the interacting surfaces. Material behavior under cyclic loading was modeled using a modified version of the Ramberg-Osgood equation, incorporating the yield stress directly. Combined hardening models were adopted to simulate the

Bauschinger effect and loading direction dependency, using a “half-cycle” definition for kinematic hardening and “cyclic hardening” for isotropic hardening. The onset of damage in the connections was evaluated using the ductile damage model available in the ABAQUS software. In order to implement this damage definition, it is necessary to first define the damage initiation criterion. For this purpose, the ductile criterion was employed. According to this approach, the equivalent plastic strain at the onset of damage must be specified for the condition where the damage variable is zero. Under monotonic uniaxial loading, this strain value can be assumed equal to the ultimate strain corresponding to the tensile strength on the stress–strain curve obtained from tensile testing. However, for structural components subjected to cyclic loading, the uniaxial tensile test alone does not adequately represent the expected material behavior. As reported in the literature, cyclic tests were conducted on steel plate specimens, and the results were used to calibrate the equivalent plastic strain values at damage initiation for use in numerical simulations, in order to replicate the experimentally observed stress–strain behavior under cyclic loading. In the validation studies where no direct cyclic tension–compression testing data were available for the structural steel used, the damage parameters were adopted from previously calibrated models. In the finite element models, due to multiaxial stress states induced by cyclic loads, the equivalent plastic strain at damage initiation was defined as a function of stress triaxiality. The calibrated equivalent plastic strain values corresponding to different stress triaxiality levels were defined in tabular form and used directly in the simulation environment to capture the complex damage initiation behavior under cyclic loading.

Each model was analyzed using a loading protocol consistent with AISC 341-22, applying displacement-controlled cyclic loads to the entire cross section at the beam end. The resulting hysteresis curves showed good agreement with experimental data, confirming the validity of the adopted modeling approach. Consequently, the same modeling principles were applied to the I-beam to H-column (weak-axis) moment connection configurations developed in this study. In addition, in those experimental studies where damage was observed and reported, the damage locations and patterns were found to match closely with those predicted by the numerical models. This further supports the suitability of the damage model definitions and parameters used in the validation models for application to the developed connection types.

Following validation, the finite element models for the designed connections were developed using the verified element types, material definitions, hardening models, surface interactions, and damage criteria. Since no uniaxial tensile or cyclic tension-compression tests were conducted for the materials used in this study, calibrated parameters from similar experimental studies were adopted. In the models, column height was defined as the distance between midpoints of two consecutive stories, while beam length was taken as the half-span. Finer mesh discretization was used in regions where plastic deformation and potential crack initiation were expected. Analyses were performed using the “Dynamic, Implicit” analysis procedure available in the ABAQUS software and solved with the ABAQUS/Standard solver in the time domain (direct integration). This analysis approach was applied in a quasi-static manner, representing scenarios where loading progresses relatively slowly and inertial effects remain limited. During the solution process, the Full Newton-Raphson method was used to solve the nonlinear system of equations.

Results showed that plastic deformations were concentrated in the expected plastic hinge regions of the beam, with limited deformation in other parts of the connection.

Hysteresis curves were generated based on the bending moment at the column face and the corresponding story drift ratio. All modeled connections were found to satisfy the requirements defined in AISC 341-22 Section E3-6b(a) and TBDY 2018 Clause 9.3.4.1(a), which states that the measured flexural resistance of the connection, determined at the column face, shall equal at least 80% of the beam plastic moment ($0.80M_p$) at a story drift angle of 0.04 radians.

During the analysis of some connections, at story drift ratios of 5% and 6%, elements began to be removed in regions of maximum plastic deformation due to reaching the critical damage index value ($D = 1$). This phenomenon was observed in the regions of highest plastic deformation and was interpreted as an indication of crack formation starting to occur in those areas. Outside the plastic hinge region, rupture risk was evaluated using rupture index (RI) and equivalent plastic strain index (PEEQI). Plastic strains in connection plates were found to be significantly lower than those in the beam plastic hinge region, suggesting low fracture risk in those areas.

To extend the scope of the study, a parametric investigation was conducted to identify the most effective I-shaped reduced beam-to-weak-axis H-column connection configuration. Following an overall evaluation of the behavior of a selected reference connection, four additional models were developed to examine the influence of geometry of the connection plates and the location of the reduced beam section on connection performance. Additionally, the effect of the thickness of the connection plates—positioned in alignment with the beam flanges and web and welded between the column flanges—on the distribution of plastic strains was investigated. All of the modeled I-shaped reduced beam-to-weak-axis H-column connections were shown to meet the seismic performance requirements for special moment frames specified in AISC 341-22. Moreover, it was observed that extending the connection plate beyond the column flange in a curved and tapered form helped to reduce stress concentrations. Ensuring thickness compatibility between the connection plates and the beam flanges and web at their corresponding positions was also found to significantly mitigate the risk of crack formation at the interface between these regions.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Deprem bölgelerinde yapılması planlanan çelik binalarda deprem yüklerinin karşılanabilmesi için farklı yatay yük taşıyıcı sistemler tercih edilebilmektedir. Bu taşıyıcı sistemlerden biri olan moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri, kirişlerin kolonlara moment aktaracak şekilde tam dayanımlı ve rijit olarak bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu nedenle birleşimlerin yeterli dayanıma sahip olmaları yapının deprem performansını doğrudan etkilemektedir.

Moment aktaran çelik çerçevelerde kiriş-kolon bağlantılarının rijit ve tam dayanımlı oluşturulmasında yeterliliği deneysel ve/veya analitik olarak gösterilen birleşimlerden yararlanılmaktadır. Bu tür birleşimlerde kirişler kolon başlıklarına; tam dayanımlı bulonlu alın levhalı, bulonlu başlık levhalı, tam penetrasyonlu küt kaynaklı, T-parçalı bulonlu ve kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli olmak üzere, farklı şekillerde bağlanabilmektedir. Kolon gövdesine (kolon enkesiti zayıf eksenine dik doğrultuda) yapılan birleşimler ise genellikle moment aktarmayan (mafsallı) birleşimler olarak teşkil edilmektedir. Bu tür birleşimlerin de rijit ve tam dayanımlı olarak teşkil edilmesi ile, taşıyıcı sistemin yatay yük taşıma kapasitesinin artması ve sisteme yanal rijitlik kazandırılarak görelî kat ötelemeleri ile ikinci mertebe etkilerinin sınırlandırılması etkin bir şekilde sağlanabilir. Ayrıca hiperstatiklik derecesinin artmasıyla birlikte yeniden dağılımın yapının geneline yayılması, yapı sisteminin deprem performansını olumlu yönde etkileyecektir.

Northridge ve Kobe depremleri sonrasında yapılan incelemelerde yapı hasarlarının genellikle kiriş-kolon birleşim bölgelerinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu depremler sonrasında yapılan çalışmalarda daha sünek birleşim tiplerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmalarda özellikle kirişin kolon başlığına (kolon enkesitinin kuvvetli eksenine dik doğrultuda) bağlandığı birleşimlere odaklanılmıştır. Böylece bazı birleşim tiplerinin ön yeterlilikleri gösterilerek yönetmeliklerde yer almaları sağlanmıştır. Buna karşın kirişin kolon gövdesine (kolon enkesitinin zayıf eksenine

dik doğrultuda) bağlandığı birleşim tipleri ile ilgili çalışmalar sınırlı düzeyde kalmıştır. Literatürde bulunan sınırlı düzeydeki çalışmalar incelendiğinde, tekrarlı yükler altında ön yeterliliği gösterilerek standart ve/veya yönetmeliklerde yer alan herhangi bir moment aktaran I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tipi bulunmamaktadır. Prensip olarak, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun gövdesine (kiriş-zayıf eksen kolon birleşimi) eğilme momenti aktaran rijit bir birleşim oluşturacak şekilde bağlantısı sağlanabilir. Bu durumda bu tür birleşim tiplerinin tasarım esaslarının belirlenmesi ile birlikte deprem etkileri altında yeterliliklerinin de deneysel ve analitik olarak gösterilmesi gerekmektedir. Moment aktaran I-enkesitli kiriş-H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tiplerinin teşkilinde davranışı belirli olan mevcut kiriş-kolon birleşimlerinden yararlanılabilir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilmesi öngörülen I-enkesitli kiriş-H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşimleri; bulonlu başlık levhali, tam dayanımlı bulonlu alın levhali, kaynaklı alın levhali, kaynaklı azaltılmış I-enkesitli, bulonlu T-parçalı birleşim ve kaynaklı T-parçalı birleşim olarak belirlenmiştir.

Bu çalışma, I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran kiriş – zayıf eksen kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan davranışlarının; moment-dönme ilişkisi, rijitlik değişimi, enerji sönümleme kapasitesi ve göçme durumları incelenerek araştırılmasını ve buna bağlı olarak birleşimlerin tasarım esaslarının oluşturulmasını amaçlamaktadır. Böylece ön yeterliliği gösterilen bu tür birleşim tiplerinin; belirlenen prensipler ve uygulama koşulları ile hesap esasları doğrultusunda deprem etkilerinin aktarılması amacıyla güvenli bir şekilde boyutlandırılması sağlanacaktır.

1.2 Tezin Kapsamı

Yürütülecek çalışma kapsamında ilk olarak literatürde bulunan I-enkesitli kirişlerin kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran kiriş – zayıf eksen kolon birleşimleri ile ilgili çalışmalar detaylı olarak değerlendirilecektir. Bu değerlendirmelerin ışığında prototip olarak geliştirilen I-enkesitli kiriş– zayıf eksen kolon birleşimlerinin davranışları ileri düzey sonlu eleman modelleri yardımıyla nümerik olarak incelenecektir. Geliştirilen birleşim tiplerinin süneklik düzeyi sınırlı ve/veya yüksek moment aktaran çelik çerçevelerde kullanılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle birleşimler, süneklik düzeyi sınırlı ve/veya yüksek moment aktaran çelik

çerçevelerin birleşimleri için TBDY 2018 bölüm 9.3 ve 9.4’te ve AISC 341-22 bölüm E2 ve E3’te tanımlanan koşullar esas alınarak birleşimlerin davranışları araştırılacaktır. Ayrıca, öngörülen kiriş-kolon birleşimlerinin uygulama detayları belirlenecek; birleşimlerin boyutlandırılmasında dikkate alınacak tasarım prensipleri ve hesap esasları oluşturulacaktır.

1.3 Özgün Değer

Moment aktaran çelik çerçevelerin tasarımında sünek bir davranış için rijit ve tam dayanımlı kiriş-kolon birleşimlerin önemi büyüktür. Bu tür birleşimler, genellikle kirişin kolon başlığına, kolon enkesitinin kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlanması ile oluşturulmaktadır. Bu tasarım yaklaşımı, birleşimin şekil değiştirme kapasitesini optimize ederken deprem enerjisinin etkili bir şekilde sönümünü de sağlamaktadır. Buna karşın, kirişin kolon gövdesine, bir başka deyişle kolon enkesitinin zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimler, genellikle sadece kesme kuvveti aktarımını öngören ve yapının deprem performansına sınırlı katkı sağlayan mafsallı birleşimler olarak tasarlanmaktadır.

Mevcut standart ve yönetmeliklerde, I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı kiriş-zayıf eksen kolon birleşimleri henüz ön yeterliliği kanıtlanmış moment aktaran birleşimler olarak yer almamaktadır. Bu durum, söz konusu birleşim türlerinin tasarım ve uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılamamasına neden olmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, çevrimsel yükler altında gerekli performans kriterlerini karşılayabilecek I-enkesitli kiriş-H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşimlerinin geliştirilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda, yenilikçi birleşim türlerinin tasarım esaslarının oluşturulması, deneysel çalışmalarla desteklenen analitik ve sayısal modellerle bu esasların doğrulanması hedeflenmektedir.

Önerilen çalışma ile kirişin kolon gövdesine bağlandığı moment aktaran birleşim türlerinin geliştirilmesi ve buna bağlı olarak taşıyıcı sistemi moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan çelik binaların deprem performanslarının artırılması amaçlanmaktadır. Bunun yanı sıra, bu birleşimlerin ön yeterliliğinin deneysel ve/veya analitik olarak gösterilmesi ile tasarım ve uygulama esaslarının oluşturulması hedeflenmektedir. Böylece, geliştirilen moment aktaran kiriş-kolon birleşim tiplerinin yönetmeliklere dahil edilmesine ve tasarım kılavuzlarının geliştirilmesine olanak

sağlanması planlanmaktadır. Sonuç olarak, söz konusu yenilikçi birleşim türleri, çelik yapı tasarımında önemli bir ilerleme sağlayacak ve yapı endüstrisinin depreme karşı dayanıklılığını artırmaya yönelik çabalarına katkıda bulunacaktır.

1.4 Yaygın Etki

Kullanım amacı ve/veya mimari zorunluluklar nedeniyle yatay yük taşıyıcı sistemi sadece moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan binalarda, bina yüksekliğine bağlı olarak, özellikle 20 m aşıldığında (6 katlı bina yüksekliği), taşıyıcı sistem elemanlarının enkesitlerinin belirlenmesinde yer değiştirme sınırları (görelî kat ötelemesi açısı) belirleyici olmaktadır. Bu tür durumlarda taşıyıcı sistem elemanı olarak çelik-beton/betonarme kompozit enkesitli kolonlar ile yüksek gövdeli kirişlerin kullanılması öngörülebilmektedir. Ancak kompozit enkesitli kolonların uygulama zorluğu, yüksek gövdeli kirişlerin de kat yüksekliklerini sınırlandırması, bu uygulamalara alternatif başka uygulamaları da gerekli kılmaktadır. Yatay yük taşıyıcı sistemi sadece moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan binalarda yanal rijitliğin ve dayanımın arttırılmasında uygulanabilecek diğerk bir seçenek, I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran kiriş – zayıf eksen kolon birleşimlerinden yararlanmaktır.

Tekrarlı tersinir yükler altında ön yeterliliği gösterilen I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşim tiplerinin tasarım esaslarının oluşturulması, bu tür birleşimlerin deprem etkilerinin aktarılmasında da kullanılmasını ve yapı mühendisleri tarafından daha ekonomik taşıyıcı sistem tasarımlarının gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca moment aktaran çelik çerçevelerden oluşan binaların deprem performanslarının iyileştirilmesi ve taşıyıcı sistemin güçlendirilmesi amacıyla, başlangıçta kirişlerin kolon gövdelerine sadece kesme kuvveti aktaracak şekilde mafsallı olarak birleştiği kiriş-kolon birleşimlerinin, moment aktaran kiriş-kolon birleşimlerine dönüştürülmesinde de bu tür birleşimlerden yararlanılabilecektir.

1.5 Tez Çalışmasının Düzeni

Birinci bölümde, tezin amacı ve kapsamı açıklanmış; çalışma kapsamında yürütülecek araştırmaların literatüre, mevcut bilimsel birikime ve mühendislik pratiğine

sağlayacağı katkılar değerlendirilmiştir. Ayrıca çalışmanın özgün yönü ve uygulama potansiyeli ortaya konmuştur.

İkinci bölümde, moment aktaran çelik çerçeveler hakkında genel bilgiler verilmiş, bu sistemlerde yer alan kiriş-kolon birleşimlerinin yapısal önemi açıklanmış ve birleşim detaylarının deprem performansı üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Üçüncü bölümde, literatürde yer alan moment aktaran I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tiplerine yönelik yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar detaylı şekilde incelenmiş ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

Dördüncü bölüm, çevrimsel yükler altında I-enkesitli kirişlerin, H-enkesitli kolonların zayıf eksenine moment aktardığı birleşimlerin doğrusal olmayan davranışlarını incelemek amacıyla geliştirilen altı adet birleşim prototipinin, AISC 358-22 şartnamesi ve TBDY 2018 yönetmeliğinde ön yeterliliği deneysel olarak gösterilen mevcut birleşim tiplerinden ve literatürdeki benzer birleşim türleri ile ilgili yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçlarından yararlanılarak oluşturulan uygulama detaylarını, tasarım esaslarını ve hesap adımlarına ilişkin detayları içermektedir.

Beşinci bölümde, ileri düzey yapısal analizlerde yaygın olarak kullanılan, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı, genel amaçlı ve parametrik bir analiz yazılımı olan ABAQUS tanıtılmış ve bu çalışmada nasıl kullanıldığı açıklanmıştır. Yazılımın genel özellikleri, doğrusal olmayan analiz kapasitesi, kullanılan malzeme modelleri, eleman tipleri, integrasyon yöntemleri ve hasar tanımı gibi modelleme detaylarına yer verilmiştir.

Altıncı bölümde, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimlerin sonlu eleman analizinde kullanılacak eleman tipi, malzeme modeli, yüzey etkileşimi gibi modelleme esaslarının doğruluğunu göstermek amacıyla, literatürde deneysel verileri bulunan 4 (dört) farklı birleşim tipi için doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve sonuçları sunulmuştur.

Yedinci bölümde, bu tez kapsamında geliştirilen 6 (altı) farklı I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tipine ait sonlu eleman modelleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Her bir birleşim prototipi için; eleman tanımları, malzeme modelleri, temas etkileşim modelleri, sınır koşulları, yükleme adımları, sonlu eleman ağı gibi modelleme esasları detaylandırılmıştır. Modelleme esasları, uygunluğu doğrulama çalışmalarıyla gösterilmiş tanımlara dayanarak oluşturulmuştur.

Sekizinci bölümde, geliştirilen 6 (altı) farklı birleşim prototipine ait sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen veriler sunulmuş ve çevrimsel yükler altındaki doğrusal olmayan davranışları detaylı biçimde değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, moment-dönme eğrileri, plastik şekil değiştirme dağılımları, enerji sönümleme kapasitesi, hasar oluşumu ve gerilme yayılışları analiz edilmiştir. Plastik mafsallarda plastik deformasyonun meydana geldiği bölgelerde, çatlak oluşumu potansiyeli; eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQI) ve kopma indisleri (RI) kullanılarak incelenmiştir.

Dokuzuncu bölümde, tez kapsamında elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve ileride yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



2. MOMENT AKTARAN ÇELİK ÇERÇEVELER

2.1 Genel Bakış

Moment aktaran çelik çerçeveler (Moment-Resisting Steel Frames), yatay ve düşey yükler etkisinde oluşan iç kuvvetlerin kirişler ve kolonlar arasında transferine olanak sağlayan rijit kiriş-kolon birleşimleri kullanılarak oluşturulan taşıyıcı sistemlerdir. Bu sistemlerde rijit kiriş-kolon bağlantıları ile genellikle hem eğilme momenti hem de kesme kuvvetinin transferi sağlanır. Böylece yapının genel stabilitesi, yalnızca kolonlar ve kirişlerden oluşan çerçeve sistemiyle sağlanmaktadır. Moment aktaran çelik çerçeveler, özellikle yüksek süneklik kapasiteleri nedeniyle deprem bölgelerinde yaygın olarak tercih edilir. Moment aktaran çelik çerçevelerin enerji sönümleme mekanizmasını oluşturan plastik şekil değiştirmeler, büyük oranda kiriş uçlarında oluşan plastik mafsalların dönme deformasyonları ile sınırlı düzeyde plastik şekil değiştirmelerin olduğu panel bölgesinin plastik kayma deformasyonlarıdır.

Moment aktaran çelik çerçevelerin önemli avantajı, mimari olarak büyük açıklıklar sunarak geniş alanların oluşturulmasına olanak sağlamasıdır. Bu yapı sistemleri, tasarımcılara açık plan düzenlemeleri, geniş cam yüzeyler ve kolonlardan arındırılmış alanlar yaratma olanağı verir. Aynı zamanda, fabrikada ön üretime uygun olmaları ve montaj kolaylığı nedeniyle inşaat sürecinde zaman ve maliyet avantajı da sağlarlar. Tasarım açısından moment aktaran çelik çerçeveler, yüksek yer değiştirme taleplerine karşı yeterli dayanıma sahip olacak şekilde boyutlandırılır. Özellikle birleşim detayları, sistemin süneklik kapasitesini doğrudan etkileyen unsurlar olup, deprem performansı açısından kritik öneme sahiptir. AISC 341 ve AISC 358 şartnameleri ile TBDY 2018, moment aktaran çelik çerçeveler için birleşim tipi, malzeme, bağlantı detayları ve uygulama kriterlerini detaylı şekilde tanımlamaktadır. Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri, büyük plastik dönme deformasyonları altında yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olacak şekilde boyutlandırılırken, orta ve düşük sünekliğe sahip süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçeveli sistemler daha sınırlı plastik dönme deformasyonu gösterecek

şekilde boyutlandırılmaktadır. Sonuç olarak, moment aktaran çelik çerçeveler kullanılarak oluşturulan yapılar hem statik hem de dinamik yükler altında yüksek performans sunmaları, sünek davranış sergilemeleri ve mimari serbestlik sağlamaları açısından modern çelik yapıların vazgeçilmez taşıyıcı sistemlerinden biri haline gelmiştir.

2.2 Moment Aktaran Çelik Çerçevelerin Kiriş-Kolon Birleşimleri

Northridge (ABD) ve 1995 Kobe (Japonya) depremleri, modern yönetmeliklere uygun şekilde tasarlanmış moment aktaran çelik yapıların kiriş-kolon birleşim bölgelerinde kırılmaların meydana geldiğini göstererek, birleşim detaylarının deprem etkilerini karşılamak açısından yetersiz kaldığını ortaya koymuştur. Özellikle kirişin kolona doğrudan kaynaklandığı kiriş-kolon birleşimlerinde gözlemlenen gevrek kırılmalar, geleneksel tasarım yaklaşımının – yani birleşimlerin yeterince sünek ve yeterli enerji sönümleyici olduğu varsayımının – yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur (FEMA 350, 2000). Bu gelişmelerin ardından SAC Joint Venture önderliğinde ABD’de yürütülen kapsamlı deneysel ve analitik araştırma programları, mevcut birleşim detaylarının eksikliklerini ortaya koymuş ve çeşitli alternatif birleşim tipleri geliştirilmiştir (Krawinkler, 2000). Bu araştırmalar neticesinde “ön yeterli birleşim” (prequalified connection) kavramı ortaya çıkmış ve bu birleşimler ile ilgili detaylar FEMA 350 dokümanı ile AISC 358 şartnamesinde detaylı biçimde tanımlanmıştır. AISC 358-22 şartnamesi, belirli birleşim tiplerinin geometrik sınırlamaları, malzeme gereksinimleri, kaynak ve montaj kuralları ile kalite kontrol koşullarını sistematik şekilde sunmaktadır. Aşağıda AISC 358-22 kapsamında yer alan ve Northridge depremi sonrası ön yeterliliği gösterilerek geliştirilen başlıca moment birleşimleri açıklanmıştır.

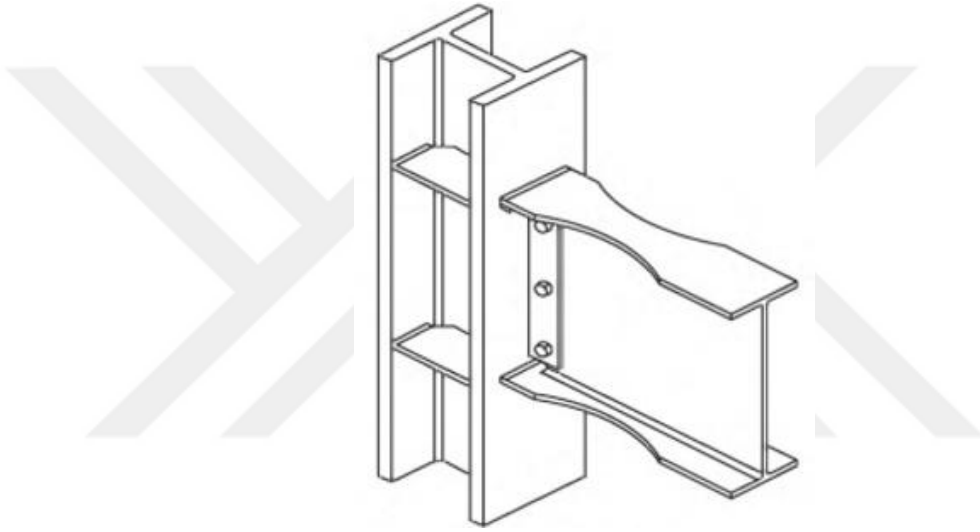
2.2.1 Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi

Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi, plastik mafsallık bölgesini kolon yüzeyinden uzağa taşıyarak gevrek göçmeyi engellemeyi amaçlayan bir birleşim tipidir. Bu birleşimde, kiriş başlığının genişliği daraltılarak plastikleşmenin bu azaltılmış kesitin olduğu, önceden belirlenen bir bölgede yoğunlaşması amaçlanır.

Deprem yükleri altında beklenen davranış, birleşim bölgesinde gevrek kırılma meydana gelmeden, kirişin zayıflatılan bölgesinde plastik deformasyonların yoğunlaşması ile

enerji sönümünün sağlanmasıdır. FEMA 350, azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerinin tekrarlı yükler altında performansını incelerken, bu birleşimlerin gevrek göçme riskini en aza indirerek yapıların güvenli bir şekilde enerji sönümleyebileceğini vurgulamaktadır. Buna göre, plastik mafsallın kirişin azaltılmış enkesit kısmında oluşması gerektiği belirtilmiştir. Bu tasarım yaklaşımı, birleşimlerin sismik yükler altında daha sünek bir şekilde davranmasını sağlayarak, yapıların enerji yutma kapasitesini artırır ve daha iyi bir performans sergilemelerine olanak tanır.

AISC 358-22, azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerde kiriş başlığının ne şekilde zayıflatılacağı ile ilgili geometrik sınırlamalar vermektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi.

Bu geometrik koşulların uygulanması, kiriş-kolon birleşiminin sünek bir davranış sergileyerek yeniden dağılımın gerçekleşmesine olanak sağlar. Ayrıca, birleşimin beklenen performansını gösterebilmesi için uygulanması gereken kaynak detayları da AISC 358-22 şartnamesinde ve TBDY 2018 Ek 9B.5’te açıklanmıştır.

Shen ve diğ. (2000), azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerinin deprem yükleri altındaki doğrusal olmayan davranışını performansını nümerik yöntemlerle incelemişlerdir. Çelik moment çerçevelerin kullanıldığı üç ve on katlı binalar üzerinde yapılan zaman tanım alanı ve itme analizleri sonucunda, plastik deformasyonların azaltılmış kiriş enkesiti bölgesinde yoğunlaştığı ve bu sayede kiriş-kolon birleşim bölgesinde oluşabilecek hasarların sınırlandırılabilirdiği tespit edilmiştir.

Jones ve diğ. (2002), çevrimsel (tekrarlı tersinir) yükler altında azaltılmış kiriş enkesitli moment birleşimlerinin deneysel yöntemlerle incelenmesinde, bu

birleşimlerin yüksek süneklik kapasitesine sahip olduğunu ve plastik şekil değiştirmelerin istenilen bölge olan azaltılmış kiriş enkesitinde oluştuğunu göstermiştir.

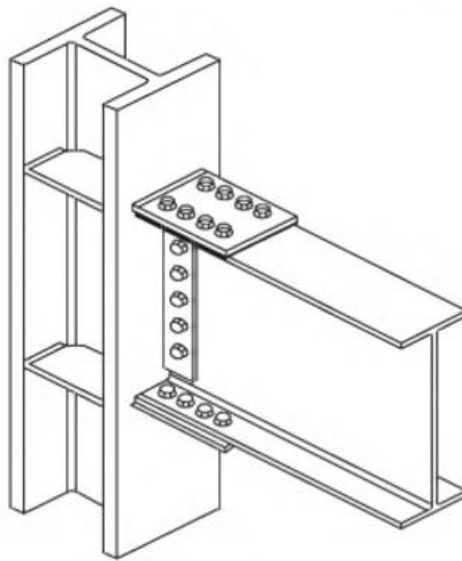
Ricles ve Zhang (2006), derin kolonlara kullanılarak teşkil edilen azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerin deprem yükleri altındaki performansını deneysel olarak incelemiş ve bu tür birleşimlerin AISC şartnameleri tarafından öngörülen süneklik ve enerji tüketimi kriterlerini sağladığını göstermiştir.

Zhang ve Ricles (2006), düşük çevrimli yorulma etkileri altında derin kolonlar kullanılarak oluşturulan azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerin davranışını araştırarak, bu tür birleşimlerin uzun süreli deprem yükleri altında da deformasyon kapasitesini koruduğunu ve gevrek göçmenin oluşmadığını ortaya koymuştur.

Sophianopoulos ve Deri (2011), azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimlerin davranışını etkileyen temel parametreleri derleyerek; birleşim geometrisinin, kolon-kiriş oranlarının ve birleşim detaylarının yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

2.2.2 Bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimi

Bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimleri (BFP), moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri için uygun maliyetli ve pratik bir çözüm sunar; ayrıca, deprem yüklerinin güvenli ve etkili bir şekilde aktarılmasını sağlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimi.

Bu birleşimin deprem sırasında yapıda oluşan çevrimsel (tekrarlı tersinir) yükler altında, sünek davranış sergileyerek enerji yutması ve gevrek göçmeyi önlemesi hedeflenmektedir. FEMA 350’de, bulonlu başlık levhalı birleşimlerin deprem yükleri altındaki davranışı incelenmiş ve bu birleşimlerin sünekliği artırarak, deprem yükleri etkisinde daha iyi enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu, ayrıca gevrek kırılma riskini azaltmaya yardımcı olduğu belirtilmiştir. AISC 358-22 şartnamesinde ve TBDY 2018 Ek 9B.3’te, bulonlu başlık levhalı birleşimin tasarımında kullanılan bulon ve başlık levhalarının boyutlarına ve birleşim geometrisine ilişkin sınırlar tanımlanmakta; ayrıca, bulonların yerleşimiyle ilgili dikkat edilmesi gereken kurallara yer verilmektedir. Birleşim bölgesinin yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olması ile birlikte, yüksek bir süneklik gösterecek şekilde tasarlanması, gevrek kırılmaların önlenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Schneider ve Teeraparbong (1999), SAC Joint Venture kapsamında yürüttükleri çalışmada, bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin performansını deneysel çalışmalar yaparak değerlendirmiştir. Sekiz tam ölçekli birleşim üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, birleşimlerin sünek davranış gösterdiği ve plastik mafsallın kolon yüzeyinden uzakta, kirişte meydana geldiği gösterilmiştir. Ayrıca, bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin geleneksel kaynaklı kiriş-kolon birleşimlerine güçlü bir alternatif oluşturabileceği vurgulanmıştır.

Swanson ve diğ. (2000), SAC Joint Venture için hazırladıkları raporda, bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin deprem yükleri altındaki performansını deneysel olarak incelemiştir. Yapılan testler, bulon sayısı, yerleşimi ve levha boyutlarının birleşim davranışını doğrudan etkilediğini ortaya koymuş; bu parametrelerin uygun şekilde düzenlenmesiyle birleşim performansının optimize edilebileceği ve gevrek kırılma riskinin önemli ölçüde azaltılabileceği gösterilmiştir.

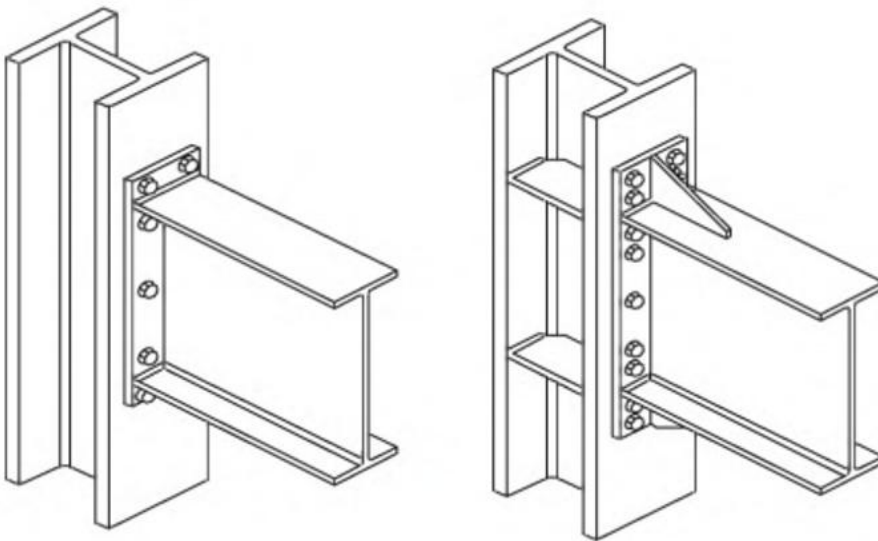
Schneider ve Teeraparbong (2002), sekiz adet tam ölçekli bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşiminin doğrusal olmayan davranışını ve göçme modlarını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, iki farklı davranış modu — kirişte mafsall oluşumu ve başlık levhasında mafsall oluşumu — değerlendirilmiştir. Testler, panel bölgesi deformasyonu, bulonlu birleşimde kaymanın meydana gelmesi, başlık levhasında mafsall oluşumu ve kirişte plastik mafsall oluşumu gibi çeşitli doğrusal olmayan davranış mekanizmalarının bu bağlantı türüyle meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Sekiz numuneden beşi, kiriş net enkesitinin sünek olarak yırtılmasıyla

göçmüştür; bu numunelerdeki kirişlerde belirgin plastik mafsall oluşumu gözlemlenmiştir. Bazı numunelere başlık levhasının uç kısmına eklenen ek levhalar, net kesit yırtılmasını engellemiştir. Bir başka numune, başlık levhasının kolon başlığına bağlandığı kaynaklı birleşimde ısı etkisi altındaki bölgede başlık levhasının kırılmasıyla, diğeri ise doğrudan başlık levhası boyunca kırılma ile göçmüştür. Bu bulgular, bu tür birleşimlerinin deprem yükleri altında sünek davranış sergileyebileceğini göstermektedir.

Sato ve diğ. (2008), süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler için tasarlanmış bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Üç tam ölçekli birleşim örneği üzerinde yapılan testlerde, birleşimlerin sünek bir davranış sergilediği, yüksek enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu ve plastik mafsalların, kirişteki son bulon deliklerinin hemen dışında oluştuğu gözlemlenmiştir. Çalışma, bu birleşimlerin AISC şartnameleri tarafından belirlenen performans hedeflerini sağladığını ve detaylandırmanın performans üzerindeki kritik rolünü vurgulamıştır.

2.2.3 Bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimi

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşim, kiriş-kolon bağlantılarında yaygın olarak kullanılan ve montaj kolaylığı ile maliyet bakımından uygun çözüm sağlayan bir birleşim tipidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimi.

Bu birleşimde, kirişin kolon ile bağlantısı, kirişin uç enkesitine kaynaklanan bir alın levhası (end plate) aracılığıyla sağlanır. Bu tür bir bağlantı, genellikle yapısal olarak daha basit ve hızlı uygulanabilir olduğundan, çelik yapı sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimin temel avantajları arasında, montajının kolay olması, düşük maliyetli olması ve bakım gereksinimlerinin az olması sayılabilir. Ayrıca, bu tasarımda, kirişin kolonla olan bağlantısının güvenliğini ve dayanıklılığını artırmak için çeşitli tasarım parametreleri optimize edilebilir.

FEMA 350 dokümanı, tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimlerin deprem etkileri altında yeterli dayanım ve süneklik sağlayacak şekilde tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. FEMA 350’de, birleşimde kullanılan malzeme kalitesi, bulonların yerleşimi ve alın levhasının boyutlarının birleşim davranışı üzerinde belirleyici olduğu belirtilmektedir. Bu tür birleşimlerde, bulonların doğru şekilde yerleştirilmesi, yük aktarımının düzgün gerçekleştirilmesini sağlamakta ve yerel gevrek kırılma riskini azaltmaktadır. AISC 358-22 şartnamesi ve TBDY 2018 Ek 9B.2, tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimlerinin tasarımına ilişkin ayrıntılı tasarım esaslarını içermektedir. Bu kapsamda, alın levhanın kalınlığı, bulonların düzeni ve bu parametrelerin birleşimin deprem yükleri altındaki performansını optimize edecek şekilde belirlenmesi için yol gösterici hükümler sunulmaktadır. Ayrıca, birleşim bölgesinin sünek davranış gösterecek şekilde tasarlanması amacıyla, levha boyutlandırması ve yerleşimiyle ilgili çeşitli stratejiler de bu şartnamede yer almaktadır.

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimlerin deprem yükleri altındaki performansının araştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır.

Sumner ve diğ. (2000a), bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Dört bulonlu ve sekiz bulonlu alın levhalı birleşimler üzerinde yapılan testlerde, birleşimlerin moment-dönme çevrimsel eğrileri üzerinden enerji sönümleme kapasiteleri, döngüsel rijitlik kayıpları ve plastik dönme kapasiteleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, birleşimlerin önemli düzeyde enerji sönümle kapasitesine sahip olduğunu ve sünek bir davranış sergileyebildiğini göstermiştir.

Sumner ve diğ. (2000b), alın levhalı moment aktaran kiriş-kolon birleşimlerine ait deneysel test verileriyle kalibre edilmiş sonlu eleman modelleri geliştirmişlerdir.

Gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları, sonlu eleman analizlerinin birleşim bölgesindeki gerilme dağılımları, yerel burkulma biçimleri ve moment-dönme eğrileri açısından deneysel sonuçlarla yüksek düzeyde uyum sağladığını göstermiştir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan modelleme yaklaşımının, moment aktaran alın levhalı birleşimlerin çevrimsel davranışlarını değerlendirmek amacıyla güvenle kullanılabileceği ortaya konmuştur.

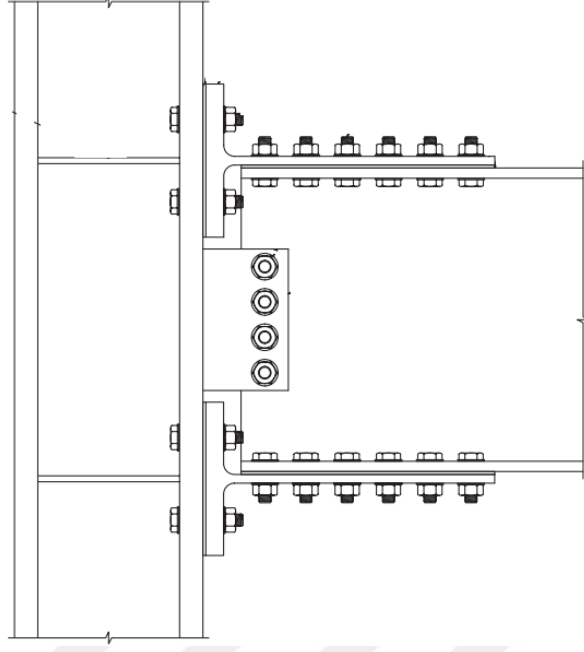
Sumner ve Murray (2001), üç sıra bulon içeren altı adet genişletilmiş alın levhalı moment aktaran kiriş-kolon birleşimi üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, mevcut tasarım prosedürlerinin düşey yükler, rüzgar ve düşük düzeyli deprem etkileri altındaki geçerliliğini incelemektir. Ayrıca, standart ve büyük iç bulon aralıklarının etkileri değerlendirilmiş; ASTM A325 ve ASTM A490 tipi bulonların kullanıldığı birleşimlerde deneysel ve analitik sonuçlar arasında iyi düzeyde bir uyum gözlemlenmiştir.

Murray ve Shoemaker (2002), farklı sayıda bulon sırasına sahip alın levhalı kiriş-kolon birleşimlerinin tasarımını incelemiştir. Çalışmada, bulon yerleşimi ve alın levhası geometrisinin birleşimin çevrimsel yükler altındaki davranışına etkisi değerlendirilmiş; birleşim sünekliğini artırmaya yönelik çeşitli tasarım önerileri sunulmuştur. Ayrıca, alın levhasının kiriş başlığı hizasında sonlandığı (flush) ve başlık düzleminin dışına uzayacak şekilde detaylandırıldığı (extended) toplam dokuz farklı birleşim konfigürasyonunu kapsayan bir tasarım kılavuzu sunmuşlardır. Bu kılavuzda yer alan kurallar, yalnızca düşey yükler, rüzgar ve düşük düzeydeki deprem yükleri altında çalışan birleşimlere yöneliktir; orta ve yüksek düzeyli deprem yükleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Sumner (2003), alın levhasının kiriş başlık hizasının dışına uzayacak şekilde detaylandırıldığı sekiz farklı genişletilmiş alın levhalı moment aktaran birleşim konfigürasyonu için deprem yükleri altında geçerli olan bir tasarım yöntemi önermiştir. Bu yöntemde, alın levhası ve kolon başlığının taşıma kapasitesi, akma çizgisi teorisi kullanılarak öngörülmektedir (Sumner, 2003).

2.2.4 Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimi

Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşiminde kiriş ile kolonun bağlantısı, kiriş ucunda kiriş başlıkları üzerine yerleştirilen T-parçaların, kolon başlığı ve kiriş başlığına bulonlu birleşim ile bağlanması şeklinde teşkil edilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimi.

Bu birleşim türü, özellikle yüksek süneklik gereksinimlerinin olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimi, büyük deformasyonlar ve yüksek enerji tüketimi sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu birleşim, kirişte oluşması beklenen plastik mafsallık bölgesini kolon yüzeyine yakın bir şekilde konumlanmasını sağlayarak, enerji tüketiminin büyük kısmının bu bölgede gerçekleşmesine olanak sağlar.

FEMA 350, bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimlerinin yüksek sünekliği sağlayacak şekilde tasarlanması gerektiğini vurgulamıştır. Buna göre, birleşimlerin tasarımında, enerji yutma ve plastik deformasyon kapasitesinin artırılması gerektiğini belirtmiş ve gevrek göçmenin önlenmesi için belirli tasarım önlemlerinin alınması gerektiğini açıklamıştır. Bu sayede birleşimlerin, deprem yükleri altında daha iyi bir performans sergileyerek, yapının genel dayanıklılığına katkı sağlaması hedeflenmiştir. AISC 358-22, T-parçalı bulonlu birleşimlerinin tasarımına dair detaylı bilgiler sunmakta ve T-parçanın boyutları, birleşimde kullanılacak bulonların yerleşimi ve elemanların malzeme özellikleri gibi kritik tasarım parametrelerini vermektedir.

T-parçalı kiriş-kolon birleşimlerinin deprem yükleri altındaki performansına dair yapılan çalışmalarda, özellikle T-parçanın kalınlıkları ve geometrisinin, birleşimin enerjiyi tüketme davranışını ve dayanımını nasıl etkilediği tartışılmıştır.

Larson (1996), bulonlu T-parçalı kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki davranışını incelemiştir. Çalışmada, T-parçasının başlık kısmının kolon başlığına ve gövdesinin kiriş başlığına bulonlarla bağlandığı birleşim detayları değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, bu birleşimlerin yeterli süneklik ve enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir.

Swanson (1999), T-parçalı birleşimlerin taşıma kapasitesi, başlangıç rijitliği ve süneklik davranışlarını karakterize etmek amacıyla kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalar yürütmüştür. Sonuçlar, T-parçalı birleşimlerde başlık kalınlığı, bulon yerleşimi ve kaynak tipi gibi parametrelerin yapısal performans üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Swanson ve Leon (2000), T-parçalı birleşim bileşenleri üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, birleşim davranışını, süneklik özelliklerini ve göçme modlarını incelemişlerdir. Çalışma, bulon çapı, başlık kalınlığı ve kaynak düzeni gibi parametrelerin birleşim davranışı üzerindeki etkilerini detaylandırmıştır.

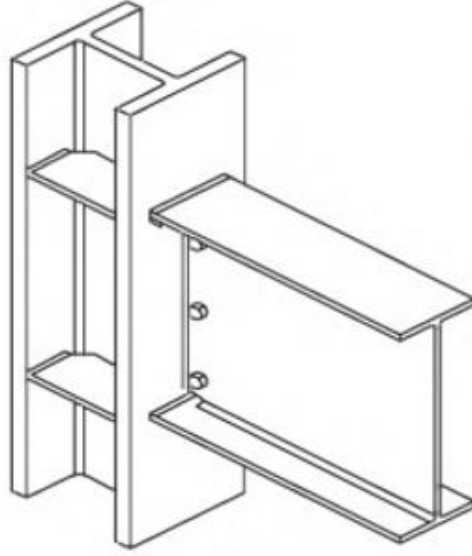
Swanson (2002), bulonlu T-parçalı birleşimlerde oluşan kaldırma (prying) kuvvetlerini değerlendirmek üzere mevcut teorik modelleri gözden geçirmiş ve alternatif bir model önermiştir. Geliştirilen modelin, birleşimlerin taşıma kapasitesini daha doğru tahmin edebildiği, deneysel verilerle doğrulandığı belirtilmiştir.

Hantouche ve diğ. (2013), kalın başlıklı T-parçalı birleşimlerde başlangıç rijitliğini daha doğru tahmin etmek amacıyla modifiye edilmiş bir rijitlik modeli önermişlerdir. Geliştirilen model, sonlu eleman analizleriyle doğrulanmış ve kalın başlıklı T-parçalı birleşimlerin davranışını başarılı şekilde öngörebildiği ortaya konmuştur.

Hantouche ve diğ. (2015), kalın başlıklı T-parçalı birleşimlerde tam penetrasyonlu ve köşe kaynaklı bağlantılar için taşıma kapasitesini etkileyen kaldırma (prying) kuvvetlerini değerlendirmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelleri, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve kaldırma etkisinin birleşim dayanımı üzerindeki kritik rolü vurgulanmıştır.

2.2.5 Tam penetrasyonlu küt kaynaklı kiriş-kolon birleşimi

Kirişin kolona doğrudan tam penetrasyonlu küt kaynak ile bağlandığı kiriş-kolon birleşimi, çelik yapılarda kiriş ve kolon bağlantılarını oluştururken önemli bir seçenek olarak öne çıkar (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı kiriş-kolon birleşimi

Bu birleşim türü, özellikle deprem yükleri altında yüksek dayanımlı birleşim oluşturmak ve yüksek enerji tüketimi sağlamak için tercih edilen birleşim tiplerindendir. Kirişin kolona doğrudan kaynaklı olarak bağlandığı kiriş-kolon birleşimi, kirişin başlıkları ve gövdesi kolon başlığına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulaması ile birleştirilir. Bu kaynakların geometrisi ve özellikleri, birleşim davranışını doğrudan etkilemektedir. Deprem yükleri altında birleşimin iyi bir performans sergileyebilmesi için kaynakların geometrisinin uygunluğu önemli bir parametredir. Ayrıca, birleşimin çevrimsel yükler altındaki dayanımını ve enerji sönümleme kapasitesini belirleyici faktörlerden biridir.

FEMA 350, kirişin kolona doğrudan kaynaklı olarak bağlandığı kiriş-kolon birleşimlerinin deprem yükleri altında yüksek enerji tüketimi sağlayacak şekilde tasarlanması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, özellikle kiriş başlığındaki kaynağın detaylı ve özenli bir şekilde boyutlandırılarak uygulanmasının, kiriş ile kolon arasındaki bağlantının güvenli biçimde oluşturulmasında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir.

AISC 358-22 ve TBDY 2018 Ek 9B.4, kirişin kolona doğrudan kaynaklı olarak bağlandığı kiriş-kolon birleşimlerinin tasarımında kullanılan kaynak detaylarını, kaynak tipi ve yerleşimini belirleyerek, birleşimin deprem yükleri altındaki performansını optimize eder. Ayrıca birleşimin analizinde kullanılan parametrelerin,

özellikle kaynak uzunluğu, bağlantı yerleşimi ve malzeme özelliklerinin doğru seçilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Kirişin kolona doğrudan kaynaklı olarak bağlandığı kiriş-kolon birleşimleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, özellikle kaynak yerleşimi ve malzeme seçiminin birleşimin performansı üzerinde büyük etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Ricles ve diğ. (2002), tam penetrasyonlu küt kaynaklı moment aktaran kiriş-kolon birleşimlerinin deprem yükleri altındaki performansını değerlendirmek amacıyla 11 (on bir) adet tam ölçekli birleşim numunesi üzerinde çevrimsel yükleme testleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kaynak erişim deliği geometrisi, kiriş gövdesi bağlantı detayı, panel bölgesi dayanımı, süreklilik levhaları ve kompozit döşeme gibi parametrelerin birleşim davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek tokluklu kaynak metali ve iyileştirilmiş detaylandırma ile bu tür birleşimlerin 0,03 rad değerinden daha fazla plastik dönme kapasitesine ulaşabileceğini göstermiştir.

Lee ve diğ. (2005a), alternatif kolon takviye detaylarıyla güçlendirilmiş tam penetrasyonlu küt kaynaklı moment aktaran kiriş-kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altındaki davranışını incelemişlerdir. Altı adet tam ölçekli kiriş-kolon birleşimi üzerinde yapılan deneylerde, farklı süreklilik levhası ve panel bölgesi takviye levhası detaylarının birleşim davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, uygun detaylandırma ile birleşimlerin sünek bir davranış sergilediğini ve enerji sönmeme kapasitelerinin arttığını ortaya koymuştur. Lee ve diğ. (2005b), aynı deneysel programın devamı olarak, birleşimlerin panel bölgesi davranışını ve panel bölgesine yerleştirilen takviye levhası detaylarını incelemişlerdir. Beş adet tam ölçekli birleşim numunesi üzerinde yapılan deneyler ve sonlu eleman analizleri sonucunda, mevcut AISC şartnamesinde tanımlanan panel bölgesi tasarım kriterlerinin birleşim davranışını tam olarak yansıtmayabileceği görülmüştür. Çalışma, panel bölgesi dayanımının daha gerçekçi değerlendirilmesi ve izin verilen panel bölgesi kayma deformasyon sınırlarının artırılması gerektiğine dair öneriler sunmuştur.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Giriş

Northridge ve Kobe depremleri sonrasında yapılan incelemelerde, yapı hasarlarının çoğunlukla kiriş-kolon birleşim bölgelerinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu depremlerden sonra sünekliği artırmaya yönelik birleşim tiplerinin geliştirilmesi amaçlanmış ve özellikle kirişin kolon başlığına bağlandığı birleşimler üzerinde durulmuştur. Bunun sonucunda bazı birleşim tiplerinin ön yeterlilikleri gösterilmiş ve yönetmelikler ile tasarım kılavuzlarında yerini almıştır. Buna karşın, kirişin kolon gövdesine bağlandığı birleşim tipleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Literatürde bu konuda gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmalara bakıldığında, tekrarlı yükler altında ön yeterliliği sağlanmış ve standartlarda veya yönetmeliklerde yer alabilecek bir moment aktaran I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tipi bulunmamaktadır. Bu çalışmalardaki mevcut durumu değerlendirmek adına, literatürde yer alan ve kirişin kolon gövdesine bağlandığı birleşim tiplerini inceleyen bazı araştırmalar aşağıda özetlenmiştir:

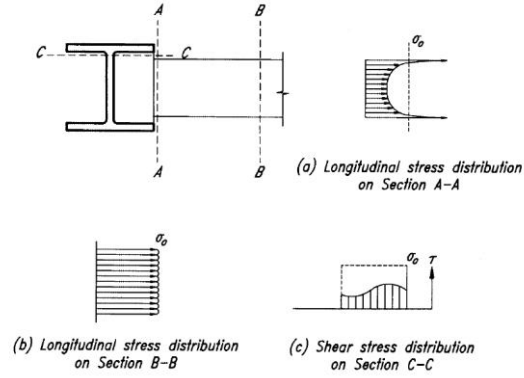
Driscoll ve Beedle (1982), I-enkesitli kiriş ve kolonun iki farklı moment aktaran birleşimini test etmiştir. Deneylerde, kolon başlıklarının iç kısımlarına kaynaklanan bağlantı levhalarında gevrek göçmenin, şekil değiştirme yığılmalarından kaynaklandığı belirlenmiştir. Driscoll ve diğ. (1983), kirişlerin kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı dokuz adet birleşimin davranışını incelemiştir. Test sonuçları, uygun kalınlık ve geometriye sahip bağlantı levhalarıyla yeterli süneklik elde edilebileceğini göstermiştir. Shim ve diğ. (2014) tarafından H-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran bir birleşim önerilmiş ve bu birleşimin performansı deneysel olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, önerilen birleşim tipinin artan yükler altında standart birleşimlere göre daha yüksek dayanıma ulaştığı gösterilmiştir. Oh ve diğ. (2015), kolona kaynaklı konsol kiriş-kiriş birleşimlerinin deprem performansını değerlendirmiştir. Deneyler sonucunda, azaltılmış kiriş enkesitine sahip birleşimlerin daha sünek bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Yılmaz ve diğ. (2016), I-enkesitli kiriş ve kolon birleşimlerinin performansını nümerik

analizler ile incelemiştir. Sonuç olarak, başlık levhalarıyla kaynaklı birleşimlerin en iyi performansı sergilediği, buna karşın alın levhası ile bağlanan birleşimlerin en düşük performansa sahip olduğu saptanmıştır. Lee ve diğ. (2019), I-azaltılmış enkesitli bir kiriş ile H-enkesitli kolon birleşiminin çevrimsel yükler altındaki davranışını deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, birleşimlerin süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler için AISC 341 şartnamesinde tanımlanan şartları sağladığı gözlemlenmiştir.

3.2 Driscoll ve Beedle (1982)

Driscoll ve Beedle (1982) tarafından yapılan çalışmada I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran iki adet kiriş-kolon birleşimi test edilmiştir. Bu birleşimlerden biri kirişin kolona bir bağlantı levhası ile doğrudan kaynaklı olduğu birleşim, diğeri ise bulonlu birleşimdir. Test numuneleri gerekli şartlar dikkate alınarak boyutlandırılmasına rağmen, testin ilk yük döngüsünde kolon başlıklarının iç kısımlarına ve gövdesine kaynaklanan çekme bağlantı levhasında gevrek göçme meydana gelmiştir. Test sonucu yapılan incelemelerde göçmenin şekil değiştirmelerin belli bölgelerde yığılmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. Bu yığılmaların birleşim levhası ile kolon başlığının birleşim noktasında ve birleşim levhasının kirişe küt kaynakla birleştiği bölgede olduğu görülmüştür.

Moment aktarmak için kullanılan levha üzerinde oluşan boyuna gerilmeler, plakanın enine yönde ve kalınlığı boyunca şekil değiştirmesine neden olmaktadır (Poisson Etkisi). Bağlantı plakası kolon başlıklarının iç kısmına kaynaklı bir şekilde bağlandığından hareketi uç noktada sınırlanır, bu nedenle de enine yönde ve levha kalınlığı boyunca ek çekme gerilmeleri oluşur. Bu durum Şekil 3.1’de verilen A-A kesiti ve C-C kesitinin kesişim bölgesinde görülebilmektedir. Böyle bir durumda sünek olmayan bir malzeme kullanılması halinde, erken gevrek göçme riskinin olabileceği anlaşılmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Deneylerde elde edilen gerilme yayılımı (Driscoll ve diğ, 1982).

3.3 Driscoll ve diğ. (1983)

Driscoll ve diğ. (1983) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı dokuz adet moment aktaran kiriş-kolon birleşimi test edilmiştir. Bu testlerde kiriş başlığı bir levha ile temsil edilmiştir. Test numunelerinde kiriş başlığını temsil eden levha, kolon enkesitinin zayıf eksenine dik doğrultuda olacak şekilde kaynaklanan farklı geometrideki bağlantı levhalarına kaynaklı olarak birleşmektedir. Deney sonucunda D numunesi haricinde tüm numunelerde yeterli sünekliğin sağlandığı gösterilmiştir.

Test sonuçlarından elde edilen bilgiler ile bu tip birleşimler için bazı önerilerde bulunulmuştur.

- Kirişlerin, bağlantı levhasına doğrudan küt kaynak ile bağlandığı birleşimlerde bağlantı levhasının kiriş başlığından daha kalın olması gerekmektedir. Böylece gerilme düzensizliği (shear lag) etkisi ile yetersiz bir katkı sağlayan bölge, daha etkin bir hale getirilmiş olacaktır. Ayrıca üretim ve montaj nedeniyle oluşacak hizalama problemlerinin önüne geçilmesi için bağlantı levhası ile kiriş başlığı arasındaki kalınlık farkının 3-6 mm arasında olacak şekilde tercih edilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir.
- Kirişin kolon enkesitinin zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimde kullanılan bağlantı levhası, aynı zamanda kirişin kolon enkesitinin güçlü eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşim için berkitme levhası olarak hizmet etmektedir. Bu nedenle bağlantı levhasının etrafında kullanılacak olan kaynaklar, çekme ve kesme kuvveti etkisine veya basınç ve kesme kuvveti etkisine maruz kalabilmektedir. Kaynak kalınlığı ve üzerindeki gerilmelerin

belirlenmesi için genellikle bileşik etkilerin hesaplanabileceği analizlerden yararlanılması önerilmektedir.

- Bağlantı plakalarının kolon başlığı dışına minimum ~20 mm uzatılması önerilmektedir. Böylece kaynakların üst üste gelmesi önlenecektir. Ayrıca bu şekilde levhanın bir miktar şekil değiştirip uzamasına izin verilmiş olacaktır.
- Bağlantı levhasının kolonun başlık iç kısımlarına kaynaklanıp kolon gövdesine bağlanmadığı durumlarda bağlantı plakasının kolon dışına uzatılan kısmının daralan enkesitli olarak teşkil edilmesi gerekmektedir. Aksi durumda, D numunesinde olduğu gibi yeterli süneklik sağlanamadığı görülmüştür.
- Deprem yükleri altında yüksek süneklik elde edebilmek için bağlantı levhasının kolon başlık hizasından itibaren ~75 mm uzayacak şekilde ve daralan enkesitli olarak teşkil edilebileceği belirtilmiştir. Alternatif olarak birleşimin, destekleyici bir berkitme levhası ile daralan enkesit kullanılmadan da teşkil edilebileceği belirtilmektedir.

3.4 Shim ve diğ. (2014)

Shim ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada H-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran bir kiriş – zayıf eksen kolon birleşimi önerilmiş ve bu birleşimin performansı tek doğrultuda artan yükler altında deneysel olarak araştırılmıştır. Birleşimde bağlantı elemanı olarak bulonların kullanımı tercih edilerek sahada daha hassas bir uygulama gerektiren kaynaklı bağlantı kullanımının minimum seviyeye indirilmesi amaçlanmıştır. Bağlantıda H-enkesitli kiriş ve kolon kullanılmıştır. H-enkesitli kolonun gövdesine kaynaklanan plakalar H-enkesitli kirişin başlıklarına bulonlar vasıtasıyla bağlanmaktadır. Bağlantıda gövde plakası kullanılmamıştır. Yapılan deneylerde sekiz adet numune kullanılmıştır. Bu numunelerin üç adedi Kore Çelik Yapı Topluluğu tarafından önerilen birleşim tipleridir. Geriye kalan beş numune ise, çalışma kapsamında önerilen birleşim tipinin numuneleridir. Bu beş numunenin birbirinden farkı, kiriş ucunun kolonun gövdesine olan mesafesidir. Bu mesafe minimum 15 mm maksimum 195 mm olacak şekilde 45 mm artımlarla oluşturulmuştur. Deney sonucunda kiriş ucunun kolon gövdesine mesafesinin değiştirilmesiyle numunelerin farklı göçme modlarına sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca önerilen birleşim tipine sahip olan numunelerin artan yükler

altında Kore Çelik Yapılar Topluluğu tarafından önerilen standart birleşim tiplerine göre daha yüksek dayanıma ulaştığı gösterilmiştir.

3.5 Oh ve diğ. (2015)

Oh ve diğ. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmanın amacı, kolon enkesitinin zayıf eksenine dik doğrultuda bağlanan ve kolona kaynaklı konsol kiriş-kiriş birleşimlerinin deprem performansının değerlendirilmesidir. Bu tip birleşimlerde kirişin kolona kaynaklı konsol parçası atölyede birleştirilmektedir. Kirişin kalan kısmı ise sahada bulonlu birleşim ile konsol kirişe bağlanmaktadır. Çalışma kapsamında Kore’de kullanılmakta olan, kolonun zayıf eksenine kaynaklı konsol kiriş-kiriş birleşimi test edilmiştir. Buna ek olarak yine kolonun zayıf eksenine bağlanan azaltılmış kiriş enkesitine sahip bir adet birleşim numunesi ile daralan başlık enkesitli kirişe sahip bir adet birleşim numunesi test edilmiştir. Testler AISC 341 şartnamesinde önerilen çevrimsel yük protokolü dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Deney sonucunda azaltılmış kiriş enkesitli ve daralan başlık enkesitli kirişe sahip olan numuneler, %5 görelî kat ötelemesi açısına gevrek bir göçme olmadan kirişin eğilme momenti dayanımının %80’in aşmıştır. Kiriş enkesitinin zayıflatılmadığı numune de benzer bir performans sergilemiş ancak kaynak destek levhasının kolon yüzüne yakın bölümünde gevrek kırılma gözlemlenmiştir. Konsol kirişteki enerji sönümleme kapasitesi karşılaştırıldığında, azaltılmış enkesitli kirişe sahip numunenin daha sünek bir davranış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

3.6 Yılmaz ve diğ. (2016)

Yılmaz ve diğ. (2016) yaptığı nümerik çalışmada, I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı altı tipte kiriş-kolon birleşimi önerilerek sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Analizlerde birleşimlerin tek doğrultulu yükleme altında performansları değerlendirilmiştir.

Moment-dönme ilişkileri, plastik deformasyonlar ve moment kapasiteleri karşılaştırıldığında en iyi performansı kirişin kolonun gövdesine başlık levhalarıyla kaynaklandığı birleşim tipi göstermiştir. En kötü performansı ise, kirişin kolonun gövdesine alın levhası ile doğrudan bağlandığı birleşim tipi sergilemiştir. Kolon

gövdesinde bulonlu birleşim için açılan delikler etrafında gerilme yığılmaları oluşması nedeniyle, kolon gövdesinde yerel burkulma gözlemlenmiştir.

3.7 Lee ve diğ. (2019)

Lee ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, I-azaltılmış enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı bir kiriş – zayıf eksen kolon birleşiminin davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyde iki adet numune kullanılmıştır. Deney numuneleri AISC 341 şartnamesinde tanımlanan koşullar esas alınarak incelenmiştir. Tekrarlı tersinir (çevrimsel) yükler altında yapılan deneylerde her iki deney numunesinin de iyi bir performans sergilediği; %4 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, birleşimlerin dayanımlarının kirişin plastik eğilme momenti dayanımının %80'ini aştığı ve böylece süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler için AISC 341'de tanımlanan koşulun sağlandığı belirtilmiştir.

4. BİRLEŞİM MODELLERİ VE TASARIMI

Çevrimsel yükler altında I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine, kolonların zayıf eksenini etrafında eğilme momenti aktaracak şekilde bağlandığı birleşimlerin doğrusal olmayan davranışlarını incelemek amacıyla altı adet birleşim prototipi geliştirilmiştir. Bu prototip birleşimler aşağıda listelenmiştir.

- a) Bulonlu başlık levhali I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
- b) Tam dayanımlı bulonlu alın levhali I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
- c) Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
- d) Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
- e) Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
- f) Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Prototip birleşimlerde tasarım esaslarına bağlı Avrupa standardına uygun olarak haddelenen profillerden yararlanılmıştır. Kiriş elemanı için IPE 270 enkesitli profil, kolon elemanı için ise HE 260 B enkesitli profil kullanılmıştır.

Kolon ve kiriş için kullanılacak profillerin enkesit özellikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Profillerin enkesit özellikleri.

Profil	d	h	b	t _f	t _w	r
Tipi	mm	mm	mm	mm	mm	mm
IPE 270	270	219,6	135	10,2	6,6	15
HE 260 B	260	177	260	17,5	10,0	24

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d : Enkesit yüksekliği, mm.

h : Köşe bölgelerdeki yarıçap çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliği $d - 2t_f - 2r$, mm.

- b : Başlık genişliği, mm.
- t_f : Başlık kalınlığı, mm.
- t_w : Gövde kalınlığı, mm.
- r : Köşe bölgelerdeki yarıçap, mm.

Kolon ve kiriş için kullanılacak profillerin atalet momentleri ve plastik mukavemet momentleri Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2 : Profillerin atalet ve plastik mukavemet momentleri.

Profil Tipi	I_x mm ⁴	W_x mm ³	I_y mm ⁴	W_y mm ³
IPE 270	5790 x 10 ⁴	484 x 10 ³	419,9 x10 ⁴	96,95 x 10 ³
HE 260 B	14920 x 10 ⁴	1283 x 10 ³	5135 x10 ⁴	602,2 x 10 ³

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

- I_x : Profilin kuvvetli eksenini etrafındaki atalet momenti, mm⁴.
- W_x : Profilin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.
- I_y : Profilin zayıf eksenini etrafındaki atalet momenti, mm⁴.
- W_y : Profilin zayıf eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

şeklinde tanımlanır.

Birleşimlerde kolon elemanı ve tüm levhalar için S355, kiriş elemanı için ise S275 yapı çeliği kullanılacaktır. S275 ve S355 yapı çeliği sınıflarının özellikleri Çizelge 4.3’te verilmektedir.

Çizelge 4.3 : S275 ve S355 yapı çeliği malzeme özellikleri.

Yapı Çeliği Sınıfı	F_y MPa	F_u MPa	E MPa	R_y	R_t
S275	275	430	200000	1,30	1,10
S355	355	510	200000	1,25	1,10

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

- F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.
- F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

R_t : Beklenen çekme dayanımının karakteristik çekme dayanımına oranı.

R_y ve R_t katsayıları TBDY 2018 Bölüm 9.2.4 uyarınca belirlenmiştir.

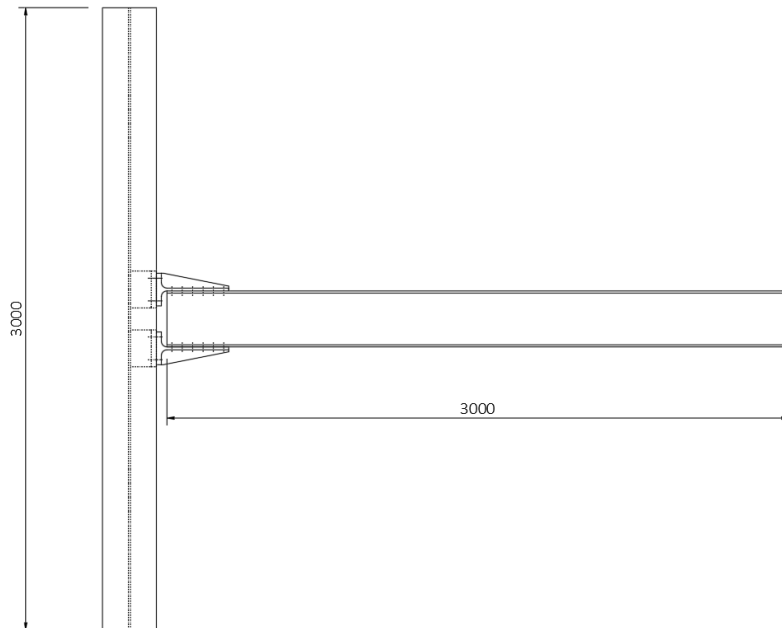
Bulonlu birleşimlerde 10.9 sınıfı bulonlar kullanılacaktır. Bu bulon sınıfı için bulon karakteristik akma gerilmesi (F_{yb}) ve bulon karakteristik çekme dayanımı (F_{ub}) ÇYTHYE 2018 Tablo 2.2’de belirtildiği gibi alınmıştır.

$$F_{yb} = 900 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} = 1000 \text{ MPa}$$

Kaynaklı birleşimlerde, kaynak metal sınıfı olarak TBDY 2018 Tablo 9.1’de belirtilen E 550 kullanılacaktır. Bu metal sınıfı için kaynak metali karakteristik çekme dayanımı (F_E) 550 MPa olarak tanımlanmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin bulunduğu yapısal sistemde kat yüksekliğinin 3,0 m olduğu varsayılmıştır. Kolon yüksekliği, ardışık iki katın orta noktaları arasında kalan düşey mesafe olarak tanımlanmış ve 3,0 m olarak alınmıştır. Kiriş uzunluğu ise açıklığın orta noktasına kadar olan yatay mesafe olarak tanımlanmış ve 3,0 m olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Kiriş-kolon birleşimlerinin bulunduğu yapısal sistem.

4.1 Plastik Mafsalda Beklenen Etkilerin Belirlenmesi

Plastik mafsallarda beklenen en büyük eğilme momenti, AISC 358-22 2.4.3-1’de ve TBDY 2018 Ek 9B.1’te verilen denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.1)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

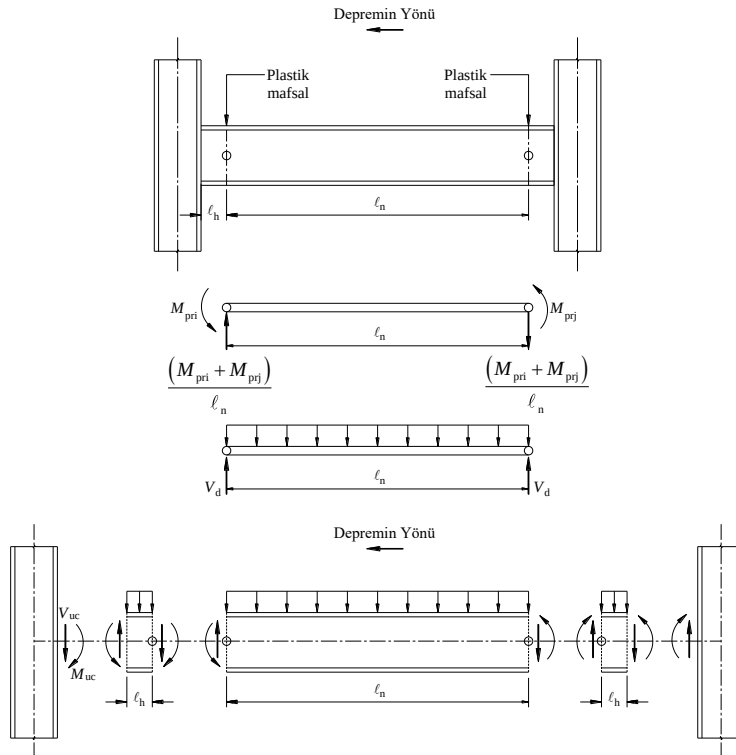
F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksenine etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

Plastik mafsalda oluşacak kesme kuvveti ve buna bağlı olan kolon yüzünde oluşacak moment değeri TBDY 2018 Ek 9B.1.7’de verilen bağıntılar ile elde edilecektir (4.2, 4.3). Şekil 4.2 birleşimin gerekli kesme kuvveti dayanımının V_{uc} ’nin nasıl hesaplanacağı hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 4.2 : Kesme kuvvetinin hesaplanması.

$$V_{uc} = V_d \pm \frac{(M_{pri} + M_{prj})}{l_n} \quad (4.2)$$

$$V_d = \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2} \quad (4.3)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{pr} : Plastik mafsalsal bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm.

W : Kiriş üzerindeki sabit yayılı yük, kN/m.

P : Kiriş üzerindeki sabit tekil yük, kN.

l_n : Plastik mafsallar arasındaki mesafe, mm.

I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinde, kiriş doğrudan kolon başlık yüzeyine değil, bağlantı levhaları aracılığıyla kolonun gövdesine bağlanmaktadır. Bu durum nedeniyle, TBDY 2018 Ek 9B’de tanımlanan kiriş uçlarında beklenen plastik mafsalsal konumunun kolon yüzeyine olan uzaklığı (l_n) tüm birleşimler için farklı şekilde değerlendirilecektir. Bu değerlendirme, AISC 358-22 ve TBDY 2018’de ön yeterliliği tanımlanmış birleşim tiplerinde önerilen plastik mafsalsal konumları da dikkate alınarak, ilgili tasarım esasları doğrultusunda yapılacaktır.

Kiriş üzerine tekil yük bulunmadığı varsayılarak P değeri 0 (sıfır); kiriş üzerindeki yayılı yük ise $W = 7,5 \text{ kN/m}$ şeklinde dikkate alınacaktır.

4.2 Birleşim Tasarımındaki Genel Koşullar

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler, deprem etkileri altında kirişlerinin önemli ölçüde, kiriş-kolon birleşimlerinin kayma bölgesinin ise sınırlı miktarda doğrusal olmayan şekil değiştirme yapabilme özelliğine sahip olduğu taşıyıcı sistemlerdir. Prototip birleşimleri, süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş-kolon birleşimleri için TBDY 2018 9.3’te belirtilen koşullar sağlanarak tasarlanacaktır.

- Birleşimin kapasitesi

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş-kolon birleşimi en az 0,04 radyan görelî kat ötelemesi açısını (görelî kat ötelemesi/kat yüksekliği) sağlayabilecek kapasitede olacaktır.

- Kirişin yanal ötelenme ve burulma kontrolleri

Süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin kiriş başlıkları, yanal ötelenmeye ve burulmaya karşı, süneklik düzeyi yüksek elemanlar için TBDY 2018 9.2.8’de verilen ilgili koşullar esas alınarak desteklenecektir.

- Yerel burkulma kontrolleri

Kiriş ve kolon profillerin yerel burkulma kontrolleri TBDY 2018 Tablo 9.3’e göre yapılacaktır.

Kontroller ilk olarak IPE 270 profili için yapılmıştır:

Başlık parçası için yerel burkulma kontrolü (4.4)

$$\frac{b_{fb}/2}{t_{fb}} \leq 0,30 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}} \quad (4.4)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

b_{fb} : Kiriş başlık genişliği, mm.

t_{fb} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

$$\frac{135/2}{10,2} = 6,62 \leq 0,30 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 8,09$$

Gövde parçası için yerel burkulma kontrolü (4.5)

Kirişte eksenel kuvvetin bulunmadığı varsayılmış ve buna bağılı olarak C_a katsayısı 0 (sıfır) olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{h}{t_{wb}} \leq 2,45 \sqrt{\frac{E}{F_{yb}}} (1 - C_a) \quad (4.5)$$

$$\frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,45 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 66,20$$

h : Köşe bölgelerdeki yarıçap çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliği $d - 2t_f - 2r$, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

IPE 270 profilinin başlık ve gövdesinin süneklik düzeyi yüksek enkesitler için tanımlanan enkesit koşullarını sağladığı gösterilmiştir.

HE 260 B profili için yapılan kontroller aşağıdaki gibidir.

Başlık parçası için yerel burkulma kontrolü (4.6)

$$\frac{b_{fc}/2}{t_{fc}} \leq 0,30 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (4.6)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

b_{fc} : Kolon başlık genişliği, mm.

t_{fc} : Kolon başlık kalınlığı, mm.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

F_{yc} : Kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

$$\frac{260/2}{17,5} = 7,42 > 0,30 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 7,12$$

HE 260 B enkesitinin başlık genişliği / kalınlığı oranının (7,42) mevcut sınır değeri olan 7,12 değerini %4 gibi küçük bir oranda aşması ve TBDY 2018'in yayımlanması planlanan yeni versiyonunda süneklik düzeyi yüksek enkesit koşulu sınır değerinin 8,07 ($= 0,4 \sqrt{E/R_y F_y}$) olarak güncellenecek olması nedeniyle, HE 260 B enkesitli profilin kolon elemanı olarak kullanılması uygun bulunmuştur.

Gövde parçası için yerel burkulma kontrolü (4.7)

Kolonda eksenel kuvvetin bulunmadığı varsayılmış ve buna bağlı olarak C_a katsayısı 0 (sıfır) olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{h}{t_{wc}} \leq 2,45 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} (1 - C_a) \quad (4.7)$$

h : Köşe bölgelerdeki yarıçap çıkarılarak elde edilen başlıklar arasındaki net gövde yüksekliği $d - 2t_f - 2r$, mm.

t_{wc} : Kolon gövde kalınlığı, mm.

$$\frac{177}{10} = 17,7 \leq 2,45 \sqrt{\frac{200000}{355}} = 58,15$$

HE 260 B profilinin başlık ve gövdesinin süneklik düzeyi yüksek enkesitler için tanımlanan enkesit koşullarını sağladığı gösterilmiştir.

- Kolonun kirişten daha güçlü olma koşulu

Birleşimlerde H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bir bağlantı yapılacağından güçlü kolon-zayıf kiriş koşulunun sağlanması oldukça önem taşımaktadır. Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu TBDY 2018'e göre denklem 4.8 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1.0 \quad (4.8)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ΣM_{pc}^* : Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri göz önüne alınarak kiriş boyuna eksenini hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı, kNm.

ΣM_{pb}^* : Kiriş-kolon birleşim bölgesinde, birleşen kirişlerin her biri için olası (beklenen) plastik moment dayanımları ile kiriş ucundaki olası plastik mafsalda

oluşan kesme kuvvetinin kolon eksenine göre hesaplanan eğilme momenti katkısının toplamı, kNm.

Kolon için ΣM^*_{pc} değeri kolon üzerindeki eksenel kuvvetin sıfır olduğu kabul edilerek denklem 4.9 ile hesaplanacaktır.

$$\Sigma M^*_{pc} = \Sigma M_{pc} \frac{h_k}{h_k - \frac{d_b}{2}} \quad (4.9)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{pc} : $\Sigma W_{pc} F_{yc}$, kiriş başlık hizasındaki kolon eğilme momenti dayanımı, kNm.

W_{pc} : Kolon zayıf eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm^3 .

F_{yc} : Kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

h_k : Kat yüksekliği, m.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

Kiriş eksenini hizasındaki kolon enkesiti plastik eğilme momenti değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W_{pc} = 602,2 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$F_{yc} = 355 \text{ MPa}$$

$$\Sigma M_{pc} = 2W_{pc}F_{yc} = 427,5 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M^*_{pc} = \Sigma M_{pc} = 427,5 \times \frac{1,50}{1,50 - \frac{0,27}{2}} = 469,9 \text{ kNm}$$

Kiriş için ΣM^*_{pb} değeri denklem 4.10 ile hesaplanacaktır.

$$\Sigma M^*_{pb} = \Sigma M_{pr} + M_{uv} \quad (4.10)$$

ΣM_{pr} : Plastik mafsallardaki beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm.

M_{uv} : Kiriş uçlarında olası plastik mafsallardaki kesme kuvveti nedeniyle kolon ekseninde meydana gelen ek eğilme momenti, kNm.

Kolon ekseninde plastik mafsaldaki kesme kuvveti nedeniyle meydana gelen eğilme momentinin hesaplanması için plastik mafsalin konumunun bilinmesi gerekmektedir. Plastik mafsalin konumu, prototip birleşimlerde kullanılan elemanların geometrisine bağlı olduğundan, kirişin kolondan daha olması güçlü koşulu birleşim elemanlarının boyutlandırılmasının ardından her bir prototip birleşim için ayrı kontrol edilecektir.

4.3 Dayanım Katsayıları

Birleşimlerin boyutlandırılmasında sadece yük ve dayanım katsayıları ile tasarım (YDKT) yöntemi esas alınacaktır. Birleşim tasarımında, AISC 358-22 2.4 ve TBDY 2018 Ek 9B.1.4'te belirtilen, göz önüne alınan göçme sınır durumuna bağlı olarak, sünek göçme sınır durumu (akma sınır durumu) için $\phi_d = 1,00$ ve sünek olmayan göçme sınır durumu (kırılma sınır durumu) için ise $\phi_n = 0,90$ katsayısı dikkate alınacaktır.

4.4 Kaynak Detayları

Kaynaklı birleşim uygulamalarının kaynak detayları, aşağıda verilen koşullar TBDY 2018 Ek 9B.1.7'de belirtilen koşullar sağlanacak şekilde düzenlenecektir.

4.5 Birleşimlerin Tasarım Esasları ve Uygulama Detayları

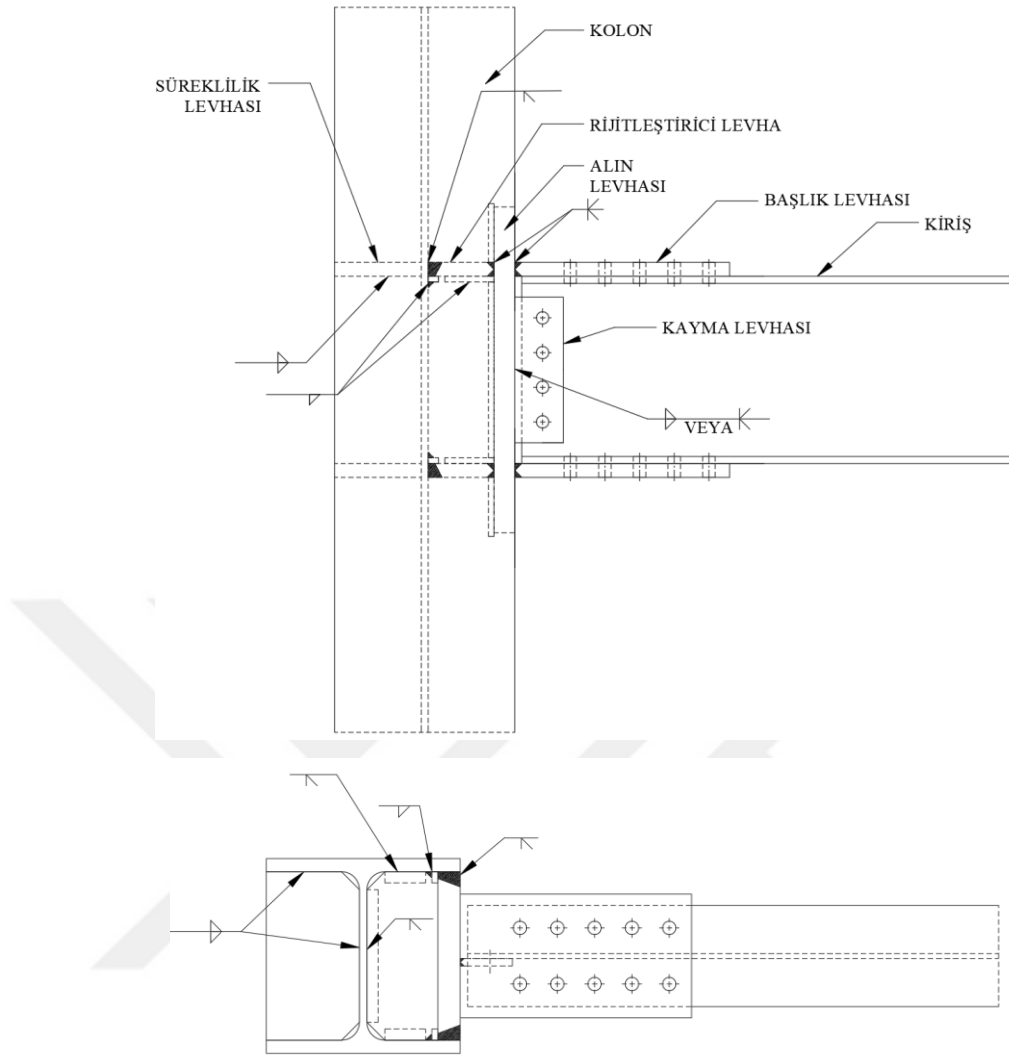
Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen birleşim türlerine ilişkin tasarım esasları belirlenmiş ve bu esaslara uygun uygulama detayları oluşturulmuştur.

4.5.1 Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde açıklanmıştır.

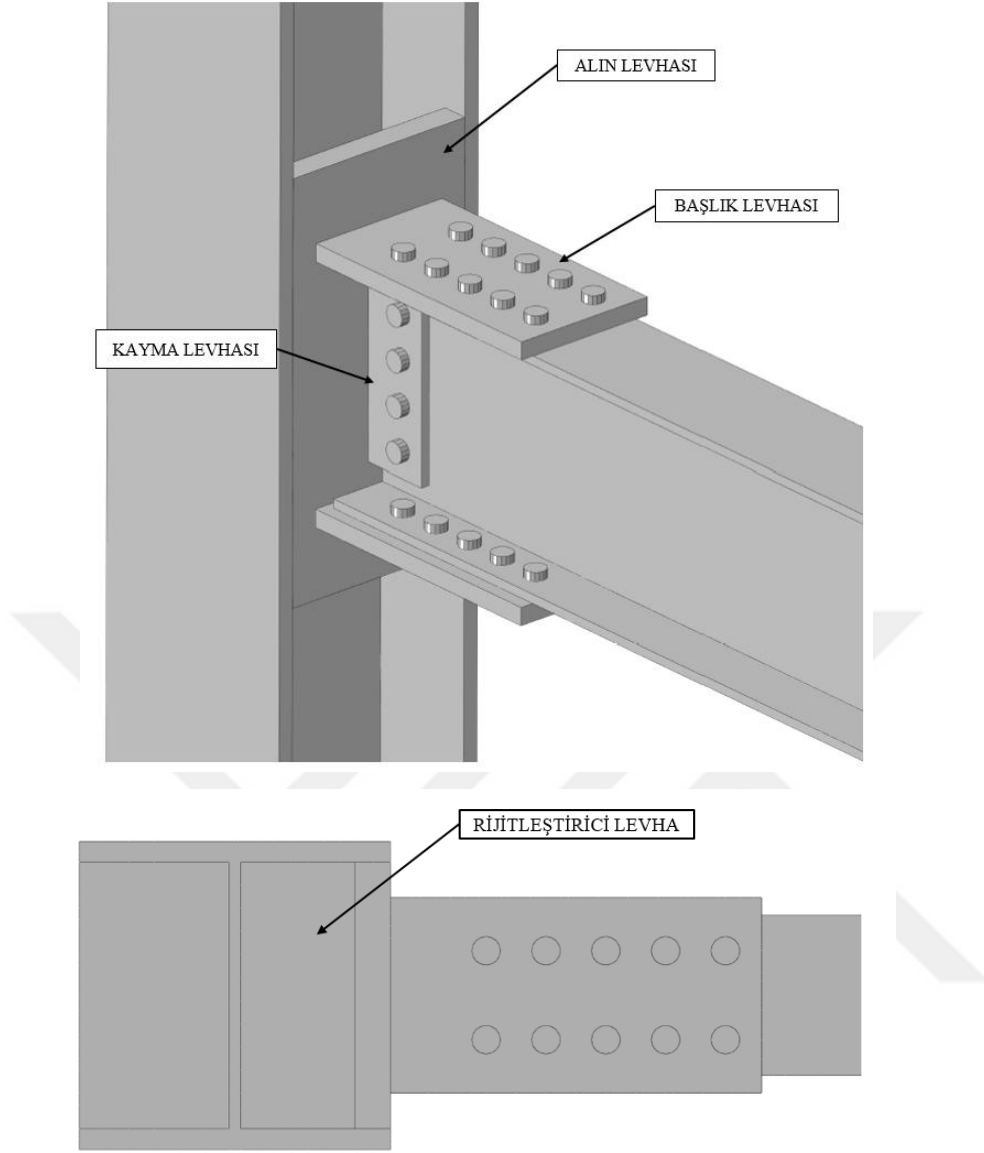
4.5.1.1 Birleşimin karakteristikleri ve uygulama detayları

Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, TBDY 2018 Ek 9B.3'te I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak ve AISC 358-22 Bölüm 7 gözetilerek boyutlandırılacaktır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.

Kirişin kolon gövdesine dik doğrultuda bağlandığı birleşimde başlık levhalarının bağlantısını yapabilmek için alın levhasından yararlanılmaktadır. Alın levhası, kolon başlıklarının uç kısmına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmaktadır. Başlık levhaları da alın levhasına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulanarak birleştirilmektedir. Kiriş başlığı ile başlık levhaları arasındaki birleşim yüksek mukavemetli bulonlarla teşkil edilmektedir. Alın levhası, kendi düzlemine dik doğrultuda ve başlık levhaları hizasında yerleştirilecek rijitleştirici levhalar ile desteklenecektir. Rijitleştirici levhalar, kolon gövdesi ve başlıkları ile alın levhasına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulanarak bağlanacaktır. Kayma levhası alın levhasına tam penetrasyonlu küt kaynak veya köşe kaynak uygulanarak birleştirilecektir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Başlık levhası, alın levhası, kayma levhası ve rijitleştirici levhanın görünümleri.

Montaj işleminin ilk adımında, rijitleştirici levhaların ve başlık levhalarının alın levhasına tam penetrasyonlu küt kaynaklarla bağlantısı sağlandıktan sonra, kolon başlıklarına ve kolon gövdesine bağlantısı tam penetrasyonlu küt kaynak uygulanarak altlık levhaları yardımıyla yapılacaktır. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile kolon başlığına ve kolon gövdesine bağlanacaktır. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır.

Kolon gövdesine uygulanacak kaynak işlemi, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 40 mm uzakta sonlandırılacaktır. Kolon başlığına uygulanacak kaynak işleminin ise, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş

noktalarına en az 15 mm uzakta sonlandırılması sağlanacaktır. Rijitleştirici levhaların kaynak işlemlerinin tamamlanmasının ardından, alın levhası ile kolon başlıklarının uç kısımlarının birleştirilmesine yönelik kaynak uygulamasına geçilecektir. Alın levhası ile kolon başlıklarının uç kısımlarının birleştirilmesinde de tam penetrasyonlu küt kaynak yöntemi uygulanacak olup, bu işlemde altlık levhası kullanılması gerekmektedir. Altlık levhası 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile alın levhasına bağlanacaktır. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır. Bu bölgede kullanılacak altlık levhası, alın levhasına dik doğrultuda, alın levhasına kaynaklanan rijitlik levhalarının ve bu rijitlik levhalarının alın levhası ile olan bağlantısını sağlayan tam penetrasyonlu küt kaynaklı birleşim için kullanılan altlık levhalarının varlığı nedeniyle sürekli bir şekilde teşkil edilemeyecektir. Bu nedenle kesişim bölgelerinde altlık levhasının kesilerek süreksiz hale getirilmesi gerekmektedir.

4.5.1.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

Bu başlık altında, bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ait tasarım esasları açıklanmış ve kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasına yönelik hesap adımları sunulmuştur.

Bulonlu başlık levhalı moment aktaran birleşiminin deprem yükleri etkisinde beklenen temel davranışı, akmanın ve plastik mafsall oluşumunun kolon yüzeyinden en uzak bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde gerçekleşmesidir. Ayrıca, başlık levhaları ile kiriş başlıklarının bağlantısını sağlayan bulonlu birleşimde sürtünme kuvvetinin aşılması ile başlayan kayma deformasyonlarının, kiriş başlıklarının akma davranışının gözlenmesi ile benzer dayanım seviyelerinde meydana gelmesi beklenmektedir. Kiriş enkesitinde meydana gelen akma davranışının ardından, ikincil akma davranışının kolon panel bölgesinde pekleşme davranışı ve beklenen eğilme momenti kapasitesinin oluşmasının ardından meydana gelmesi beklenmektedir. Ayrıca, en büyük dönme değerine (yaklaşık olarak 0,08 rad) ulaşıldığında başlık levhalarında da yerel olarak sınırlı akma deformasyonu meydana gelebileceği öngörülmektedir.

Süreklilik levhalarının kolon ile bağlantısını sağlayan kaynaklı birleşimin detayları için TBDY 2018 Ek 9B.1.7’de verilen koşullar sağlanacaktır.

Birleşime ait uygulama sınırlarının değerlendirilmesinde esas alınacak geometrik değişkenler TBDY 2018 Tablo 9B.2’de belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin birleşimlerinde kullanılabilmesi için, TBDY 2018 Tablo 9B.2’de verilen uygulama sınırları çerçevesinde, TBDY 2018 Ek 9B.3’te tanımlanan tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir. Söz konusu esaslar, birleşim elemanlarının TBDY 2018 Ek 9B.3.1’e uygun olarak, plastik mafsalsın kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasında, kiriş enkesitinde oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları prensibine dayanmaktadır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi denklem 4.11 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.11)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksenine etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

2. En büyük karakteristik bulon deliği çapının belirlenmesi

Birleşimde, kiriş başlığının çekme kırılması sınır durumuna ulaşmasını önleyecek bulon deliğinin çapı (d_h) denklem 4.12 ile belirlenir. AISC 358-16 7.6’da uygulanan yaklaşımda, kiriş başlığı bir levha parçası enkesiti (başlık genişliği × başlık kalınlığı) şeklinde dikkate alınarak net enkesitin, eğilme momentinin aksenal çekme bileşeni etkisinde kırılma sınır durumunun oluşmaması için gerekli bulon deliği çapı belirlenmektedir. Bu yaklaşım güvenli tarafta kalan, ancak eğilme momentinin kuvvet çiftine dönüştürülerek göz önüne alınması daha kaba bir sonuç üretmektedir. Burada

uygulanan yaklaşım (AISC 358-22) ise, kirişin eğilme momenti etkisindeki net enkesiti dikkate alan daha gerçekçi bir yaklaşımdır ve Swanson (2016) tarafından yapılan bir çalışma ile desteklenmiştir.

$$d_h \leq \frac{W_{pb}}{2t_f(d_b - t_f)} \left(1 - \frac{R_y F_y}{R_t F_u} \right) - 2 \text{ mm} \quad (4.12)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_f : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

W_{pb} : Kiriş plastik mukavemet momenti, mm³.

R_t : Beklenen çekme dayanımının karakteristik çekme dayanımına oranı.

3. Başlık levhalarına birleşimin kayma etkisinde dayanımının belirlenmesi

Çelik malzeme sınıfı ve birleşim için uygulama sınırları göz önünde tutularak; başlık levhası kalınlığı ve genişliği ile bulonlar arasındaki uzaklık, bulonların levha kenarlarına olan uzaklıkları öngörülür. Ardından, bulon kesme kuvveti dayanımı ve bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı dikkate alınarak birleşimin kayma etkisindeki dayanımı hesaplanır (4.13).

$$r_n = \min \left[\begin{array}{l} 1,0F_{nv}A_b \\ 2,4F_{ub}d_b t_f \\ 2,4F_{up}d_b t_p \end{array} \right] \quad (4.13)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm².

F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.

F_{ub} : Kiriş malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_{up} : Başlık levhası malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

d_b : Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.

t_f : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

t_p : Başlık levhasının kalınlığı, mm.

4. Birleşimde kullanılacak bulon sayısının tahmin edilmesi

Başlangıçta birleşim detayının kesin olarak bilinmemesi ve buna bağlı olarak plastik mafsallın yerinin belli olmaması nedeniyle, denklem 4.14 kullanılarak birleşimde kullanılacak bulon sayısı tahmin edilir.

$$n \geq \frac{1,25M_{pr}}{\phi_n r_n (d_b + t_p)} \quad (4.14)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{pr} : Plastik mafsall bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

Birleşimin tasarımında dikkate alınacak eğilme momenti değeri alın levhası yüzündeki eğilme momenti ($M_f = M_{uc}$) değeridir. Bu değerin plastik mafsaldaki kesme kuvvetinin etkisi de göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda M_f değeri M_{pr} değerinden daha büyük olacağı için, M_f değerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, denklem 4.14'teki 1,25 katsayısının kullanılması öngörülmüştür (AISC 358-22).

5. Plastik mafsall yerinin belirlenmesi

Plastik mafsallın kolon başlıklarının arasına kaynaklanan alın levhası yüzünden uzaklığı aşağıdaki denklem 4.15 ile belirlenir.

$$l_h = s_e + s_i \left(\frac{n_b}{2} - 1 \right) \quad (4.15)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_e : Kolon başlıkları arasına kaynaklanan alın levhasına en yakın bulon sırası ile bu levhanın yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.

s_i : Ardışık iki bulon deliğinin merkezleri arasındaki uzaklık, mm.

n_b : Kirişin bir başlığında kullanılan toplam bulon sayısı.

6. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak değerlendirilir. Bu hesaplama, plastik mafsal konumunu momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

7. Kolon başlıkları arasına kaynaklanan alın levhasının yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Başlık levhaları arasına kaynaklanan alın levhasının yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımı, plastik mafsal bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}), plastik mafsal konumundaki gerekli kesme kuvveti dayanımı (V_h) ve plastik mafsal konumu ile başlık levhaları arasına kaynaklanan alın levhasının yüzü arasındaki mesafe (l_h) dikkate alınarak denklem 4.16 ile hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_h l_h \quad (4.16)$$

8. Başlık levhalarına etkiyen kuvvetin belirlenmesi

Başlık levhalarına etkiyen kuvvetler; eğilme momentinin çekme ve basınç kuvveti bileşenleri olarak denklem 4.17 ile belirlenir.

$$F_{pr} = \frac{M_f}{d_b + t_p} \quad (4.17)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Kolon başlık levhaları arasına kaynaklanan alın levhası dış yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

t_p : Başlık levhasının kalınlığı, mm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

9. 4. Adımda belirlenen bulon sayısının uygunluğunun kontrolü

Belirlenen bulon sayısının uygunluğu denklem 4.18 ile kontrol edilir.

$$n_b \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n r_n} \quad (4.18)$$

10. 3. Adımda seçilen başlık levhası kalınlığının kontrolü

Başlık levhasının kalınlığı denklem 4.19 ile kontrol edilir.

$$t_p \geq \frac{F_{pr}}{\phi_d F_{yp} b_{fp}} \quad (4.19)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yp} : Başlık levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

b_{fp} : Başlık levhasının genişliği, mm.

11. Başlık levhasının çekme etkisinde kopması sınır durumu

Başlık levhasının çekme kopması denklem 4.20 ile kontrol edilir.

$$F_{pr} < \phi_n R_n \quad (4.20)$$

R_n , AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.1’de tanımlanan şekilde denklem 4.21 ile hesaplanır.

$$R_n = F_u A_e \quad (4.21)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

A_e : Etkin net enkesit alanı, mm².

12. Başlık levhasının blok kırılma sınır durumu

Başlık levhasının blok kırılma dayanımı denklem 4.22 ile kontrol edilir.

$$F_{pr} < \phi_n R_n \quad (4.22)$$

R_n , AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2’te tanımlanan şekilde denklem 4.23 ile hesaplanır.

$$R_n = 0,60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0,60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (4.23)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_{nt} : Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{nv} : Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{gv} : Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı, mm².

F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.

U_{bs} : Çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan bir katsayı.

Çekme gerilmeleri yayılışının üniform olduğu yüzeylerde, $U_{bs} = 1,00$; üniform olmadığı yüzeylerde ise $U_{bs} = 0,50$, olarak alınacaktır. Bu hususta ayrıntılı teknik açıklamalar, ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.3'te sunulmaktadır.

13. Başlık levhasının burkulma sınır durumu

Başlık levhasının burkulma dayanımı denklem 4.24 ile kontrol edilir.

$$F_{pr} < \phi_n R_n \quad (4.24)$$

R_n değeri, $KL/i \leq 25$ ise denklem 4.25 ile belirlenir.

$$R_n = F_y A_g \quad (4.25)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_g : Kayıpsız enkesit alanı, mm².

KL : Burkulma boyu, mm.

i : Atalet yarıçapı, mm.

R_n değeri, $KL/i > 25$ olması durumunda, hesaplanmış olan KL/i değeri kullanılarak AISC 360-22'de Bölüm E3 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 8.2'de belirtildiği şekilde hesaplanacaktır.

14. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilir (4.26). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5'e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.26)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

15. Kiriş gövdesi bağlantı levhasının tasarımı.

Kiriş gövdesinin kolona bağlandığı birleşim, AISC 360-22 veya ÇYTHYE 2018'e uygun şekilde tasarlanmış tek plakalı bir kayma birleşimi olmalıdır. Bu birleşimde dikkate alınacak gerekli kesme kuvveti, kirişin gerekli kesme kuvvetine eşit alınmalı ve bu kuvvetin kolon yüzeyinde etkidiği varsayılmalıdır.

16. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

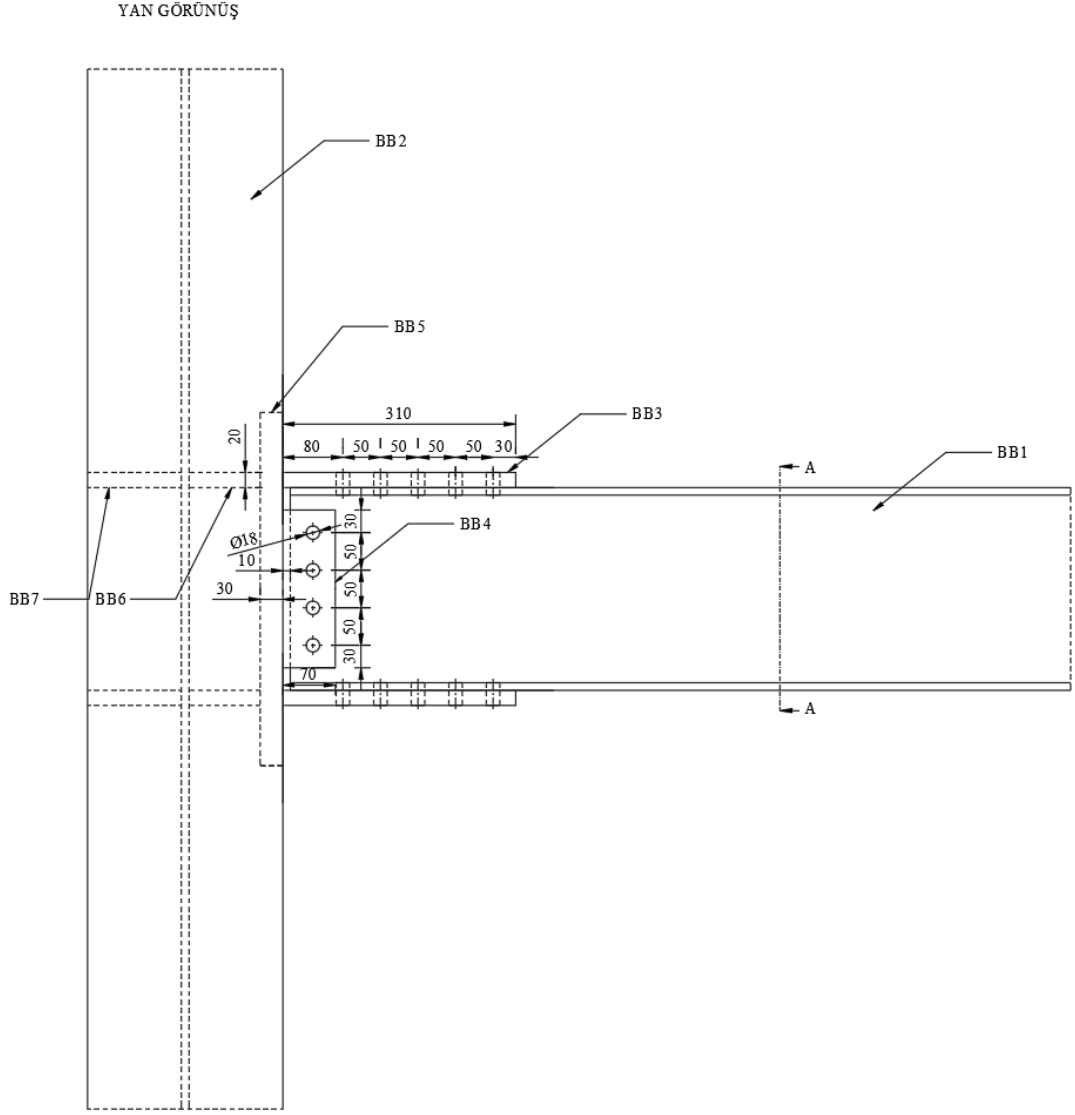
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.27 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1,0 \quad (4.27)$$

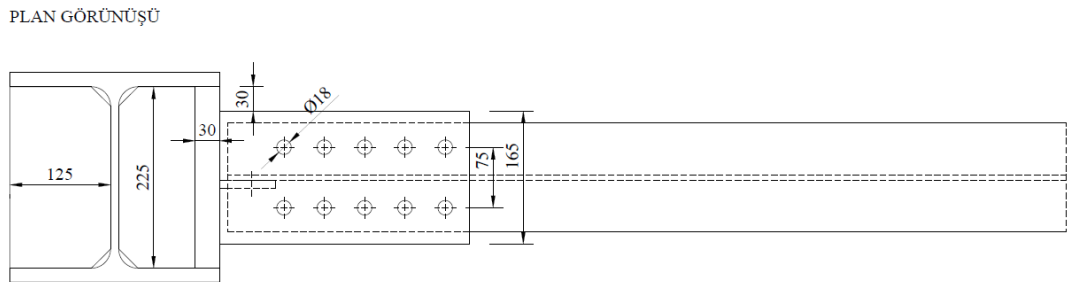
Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek A'da sunulmuştur.

Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

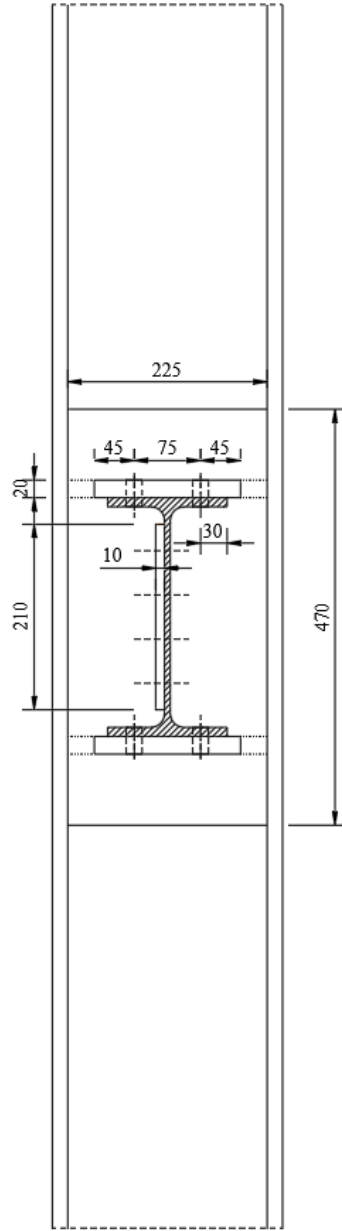


Şekil 4.5 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüş.



Şekil 4.6 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.

KESİT A-A



Şekil 4.7 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.4’te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.4 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
BB-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
BB-2	Kolon	HE 260 B	S355	1

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.5'te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.5 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.

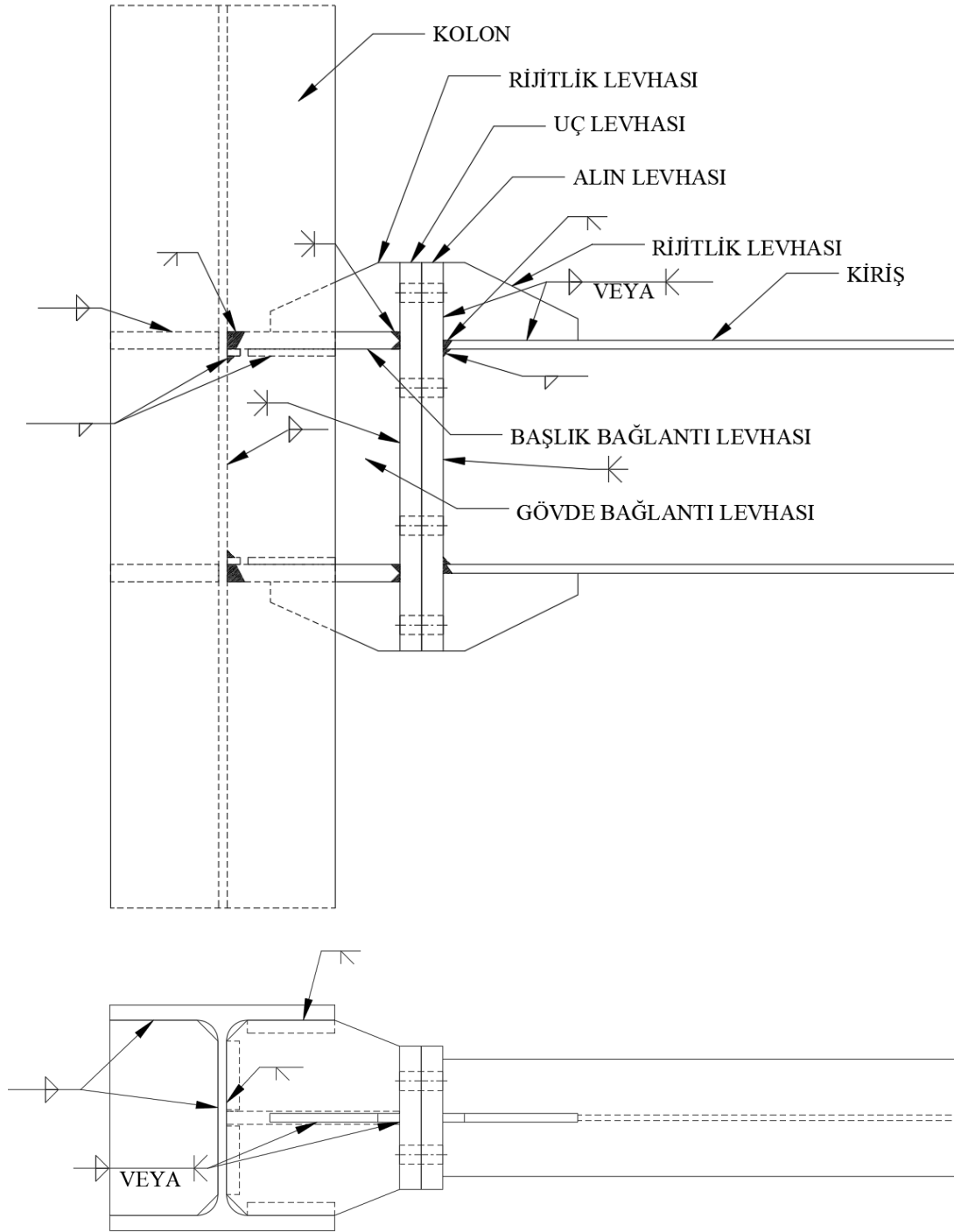
Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
BB-3	Başlık levhası	S355	165	310	20	2
BB-4	Kayma levhası	S355	70	210	10	1
BB-5	Alın levhası	S355	470	225	30	1
BB-6	Başlık bağlantı levhası	S355	95	225	20	2
BB-7	Kolon süreklilik levhası	S355	125	225	20	2

4.5.2 Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde detaylandırılmıştır.

4.5.2.1 Birleşime genel bakış ve uygulama detayları

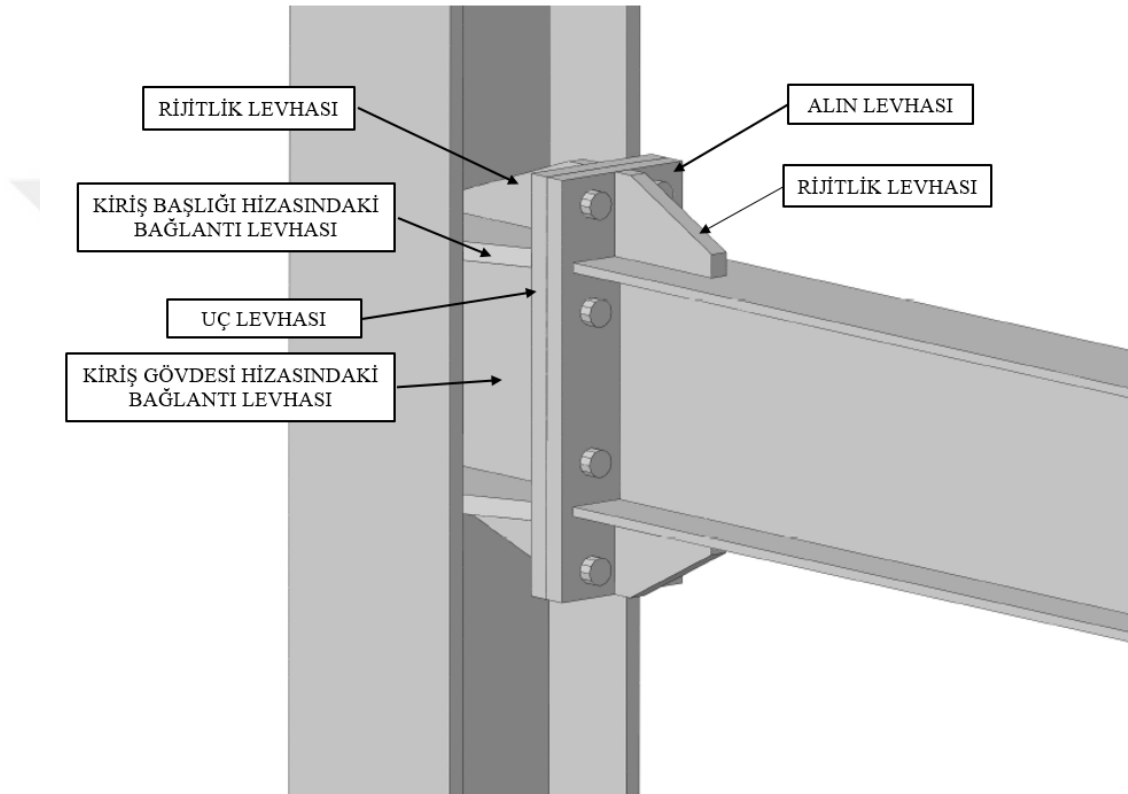
Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, TBDY 2018 Ek 9B.2'de I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı tam dayanımlı bulonlu alın levhalı başlık levhalı kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak ve AISC 358-22 Bölüm 6 gözetilerek boyutlandırılacaktır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Alın levhalı bulonlu I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.

Prototip birleşimde, kiriş ucu enkesiti alın levhasına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmaktadır. Alın levhasının kiriş başlıklarından itibaren uzayan kısımları için rijitleştirici levhalar kullanılacaktır. Bu rijitlik levhaları, kiriş başlığına ve alın levhasına köşe kaynaklar kullanılarak bağlanacaktır.

Kiriş ucundaki alın levhası kolon tarafına, alın levhasıyla aynı geometriye sahip, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhaları ile rijitleştirilen bir uç levhası vasıtasıyla birleşmektedir (Şekil 4.9). Birleşim 4 (dört) bulonlu bir bağlantı olarak düzenlenecektir. Kiriş alın levhasına benzer şekilde, kolona bağlantıda kullanılan uç levhanın kiriş başlıkları hizalarından itibaren uzayan kısımları için de rijitlik levhaları kullanılacaktır. Bu rijitlik levhaları, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarına ve uç alın levhasına çift taraflı köşe kaynaklar yardımıyla bağlanacaktır.



Şekil 4.9 : Alın levhası, uç levhası, bağlantı levhaları ve rijitlik levhaları.

Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kolon başlık ve gövdesi, uç alın levhasına ve kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanacaktır. Benzer şekilde, kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının uç levhasına bağlantısı da tam penetrasyonlu küt kaynak kullanılarak gerçekleştirilecektir.

Montaj işleminin ilk adımında, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları, kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulamasıyla bağlanacaktır. Sonraki adımda, bu levhalar uç levhasına tam penetrasyonlu küt kaynaklar kullanılarak birleştirilecektir ve kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhası

kolon gövdesine çift taraflı köşe kaynak uygulanarak kaynaklanacaktır. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları ise kolon başlıklarına ve gövdesine tam penetrasyonlu küt kaynaklar vasıtasıyla altlık levhaları kullanılarak birleştirilecektir. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile kolon başlığına ve kolon gövdesine birleştirilecektir. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır. Kolon gövdesine uygulanacak kaynak işlemi, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 40 mm uzakta sonlandırılacaktır. Kolon başlığına uygulanacak kaynak işleminin ise, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 15 mm uzakta sonlandırılması sağlanacaktır. Rijitleştirici levhalar, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon gövdesine bağlantısı sağlandıktan sonra, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarına ve uç alın levhasına çift taraflı köşe kaynakla birleştirilecektir.

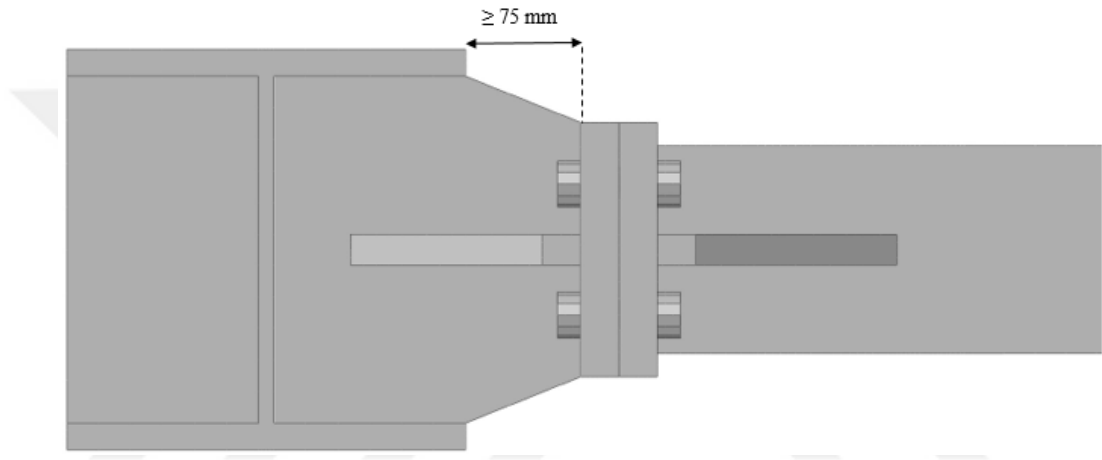
4.5.2.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

Bu başlık altında, tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ait tasarım esasları açıklanmış ve kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasına yönelik hesap adımları sunulmuştur.

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimdeki kiriş-kolon birleşimlerinin davranışında belirleyici olan sınır durumlar; kiriş enkesitinin eğilme etkisinde akmaya ulaşması, alın levhasının eğilme etkisinde akmaya ulaşması, kolon panel bölgesinin akması, çekme etkisindeki bulonların kopması, kayma etkisindeki bulonların kırılması veya kaynaklı birleşim bölgelerinde kırılmalar meydana gelmesi olarak sıralanabilir.

Driscoll ve diğ. (1983) tarafından I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran kiriş-kolon birleşimleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına doğru minimum 75 mm uzatılması önerilmektedir. Böylece levhaların bir miktar şekil değiştirip uzama deformasyonu yapmasına izin verilmektedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kolon başlıklarının iç kısmına kaynaklı bir şekilde bağlandığında, levhaların kolon başlıklarına dik doğrultudaki deformasyonları sınırlanır, bu nedenle levhaların enine dik doğrultuda ve levha kalınlığı boyunca ek çekme gerilmeleri oluşur. Böyle bir durumun erken gevrek göçme riski oluşturabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde

bağlantı levhaları kolon başlığı dışına 75 mm uzayacak şekilde tasarlanacaktır (Şekil 4.10). Bu çalışmalarda kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmının daralan enkesitli olarak teşkil edilmesinin tekrarlı yükler altında daha yüksek süneklik düzeyinin elde edilmesini sağladığı da gösterilmiştir. Bu durum esas alınarak, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmı, kiriş ucuna doğru daralan enkesite sahip olacak şekilde boyutlandırılacaktır. Ayrıca, alın levhası ile uç levhası arasındaki bulon birleşimdeki bulonların montajının yapılabilmesi için, bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına minimum 75 mm uzayacak şekilde teşkil boyutlandırılması önem teşkil etmektedir.

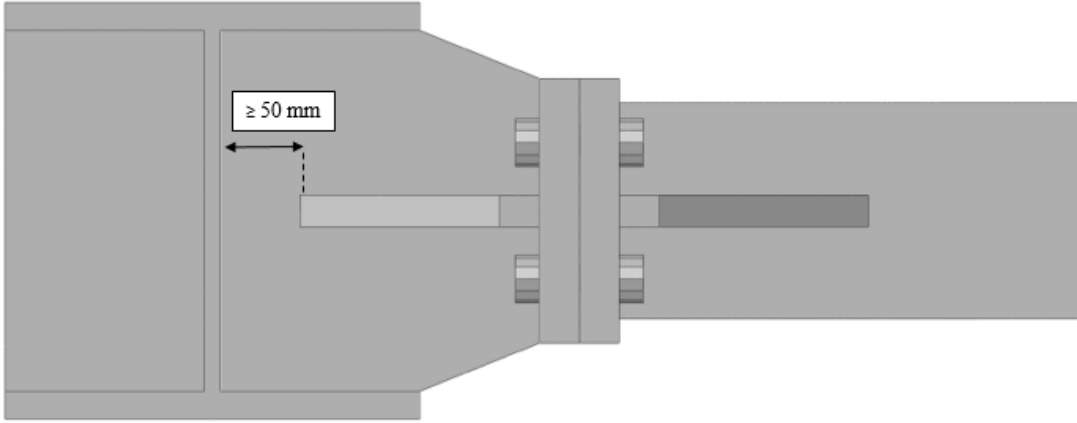


Şekil 4.10 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.

Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları ile kolon gövdesine olan bağlantıdaki tam penetrasyonlu küt kaynaklarda süreksizlik oluşturmamak için kolona bağlantıda kullanılan uç levhanın kiriş başlıkları hizalarından itibaren uzayan kısımları için kullanılan rijitleştirici levhaların kolon gövdesine olan uzaklığının, kolon gövdesi yüzeyinden itibaren 50 mm geride sonlandırılması gerekmektedir (Şekil 4.11).

Süreklilik levhalarının kolon ile bağlantısını sağlayan kaynaklı birleşimin detayları için TBDY 2018 Ek 9B.1.7’de verilen koşullar uygulanacaktır.

TBDY 2018 Ek 9B.2.7(b) uyarınca, rijitlik levhası kalınlığının 10 mm’den az olması durumunda, rijitlik levhasının dayanımına eşit dayanıma sahip köşe kaynak kullanılmasına izin verilebilir.



Şekil 4.11 : Rijitleştirici levhanın kolon yüzünden 50 mm geride sonlandırılması.

Birleşime ait uygulama sınırlarının değerlendirilmesinde esas alınacak değişkenler TBDY 2018 Tablo 9B.1’de belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılabilmesi için TBDY 2018 Tablo 9B.1’de verilen uygulama sınırları çerçevesinde TBDY 2018 Ek 9B.2’de tanımlanan tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir. Söz konusu esaslar, birleşim elemanlarının TBDY 2018 Ek 9B.2.1’e uygun olarak, plastik mafsalsın kiriş enkesitindeki akma nedeniyle meydana gelmesini sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları prensibine dayanmaktadır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi denklem 4.28 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.28)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

2. Plastik mafsall yerinin belirlenmesi

Plastik mafsallın alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyine uzaklığı denklem 4.29 ile belirlenir.

$$l_h = L_b + t_p \quad (4.29)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L_b : Kiriş başlıkları ile alın levhaları arasındaki rijitleştirici levhaların genişliği, mm.

t_p : Alın levhası kalınlığı, mm.

d_c : Kolon enkesit yüksekliği, mm.

3. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak hesaplanır. Bu hesaplama, plastik mafsall konumundaki momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

4. Alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyinde gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kirişe kaynaklı alın levhası ile kiriş başlık ve gövdesi hizasındaki gövde bağlantı levhalarının ucundaki, alın levhasıyla aynı geometriye sahip uç levhasının temas yüzeyindeki enkesitte gerekli eğilme momenti dayanımını, plastik mafsall bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}), plastik mafsall konumundaki gerekli kesme kuvveti dayanımı (V_h) ve plastik mafsall konumu ile iki levhanın temas yüzeyi arasındaki mesafe (l_h) dikkate alınarak denklem 4.30 ile hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_h l_h \quad (4.30)$$

5. Birleşimde kullanılacak bulonların çapının belirlenmesi

Birleşimde kullanılacak bulonların çapı denklem 4.31 ile belirlenir.

$$d_{b,req} = \sqrt{\frac{2M_f}{\pi \phi_n F_{nt} (h_1 + h_2)}} \quad (4.31)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

h_1 : Kirişin basınç etkisi altındaki başlığının merkezi ile çekme bölgesinde yer alan birinci sıradaki bulonların merkezleri arasındaki mesafe, mm.

h_2 : Kirişin basınç etkisi altındaki başlığının merkezi ile çekme bölgesindeki yer alan ikinci sıradaki bulonların merkezleri arasındaki mesafe, mm.

6. Alın levhası kalınlığının belirlenmesi

Birleşimde kiriş ucuna kaynaklı alın levhasının kalınlığı denklem 4.32 ile belirlenir.

$$t_{p,req} = \sqrt{\frac{1,11M_f}{\phi_d F_{yp} Y_p}} \quad (4.32)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yp} : Alın levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

Y_p : Alın levhasının akma çizgisi mekanizması parametresi, mm.

Alın levhasının kalınlığının belirlenmesi için ilk olarak akma çizgisi mekanizması parametresi (Y_p) hesaplanacaktır. AISC 358-22 Tablo 6.3'te tanımlanan bu parametrenin elde edildiği denklem, basınç bölgesinde ilk sıradaki bulonların merkezi ile alın levhasının üst kenarına uzaklık (d_e) ile bulonlar arasındaki yatay mesafe (g) ve alın levhası genişliğine (b_p) bağlı denklem 4.33 ile hesaplanacak s parametresi arasındaki ilişkiye bağlı olarak belirlenir.

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad (4.33)$$

Y_p parametresinin hesaplandığı denklemler her bir durum için ayrı olarak tanımlanmıştır.

Durum 1: $d_e \leq s$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_2 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_1 \left(\frac{1}{p_{fo}} + \frac{1}{2d_e} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_2(p_{fi} + s) + h_1(d_e + p_{fo})]$$

Durum 2: $d_e > s$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_2 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_1 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{fo}} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_2(p_{fi} + s) + h_1(s + p_{fo})]$$

7. Kiriş başlıklarına etkiyen kuvvetin hesaplanması

Kiriş başlıklarına etkiyen kuvvetler (F_{fu}), eğilme momentinin çekme ve basınç kuvveti bileşenleri olarak denklem 4.34 ile belirlenir.

$$F_{fu} = \frac{M_f}{(d_b - t_{bf})} \quad (4.34)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

8. Rijitlik levhalarının kalınlıklarının belirlenmesi

Alın levhaları ile kiriş başlıkları arasında kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlığı, denklem 4.35 ile belirlenir.

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) \quad (4.35)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.

Rijitlik levhasında yerel burkulmanın önlenmesi için denklem 4.36'da belirtilen koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}}\right)} \quad (4.36)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

h_{st} : Rijitlik levhasının yüksekliği, mm.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

9. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilir (4.37). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5'e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.37)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

10. Kiriş-kolon birleşiminin gerekli kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Kiriş-kolon birleşiminin gerekli kesme kuvveti dayanımı, kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımına eşit alınmalıdır.

11. Birleşimdeki bulonların kesme kuvveti dayanımının belirlenmesi

Birleşimdeki kesme kuvvetlerinin basınç başlığındaki bulonlar tarafından karşılanacağı varsayıp bulonların kayma dayanımı ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.3.9 ve AISC 360-22 Bölüm J3'te belirtildiği şekilde denklem 4.38 ile hesaplanır.

$$V_u \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b \quad (4.38)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm².

n_b : Basınç başlığındaki bulon sayısı.

F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.

12. Alın levhasındaki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımının hesaplanması

Alın levhasındaki bulonların deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.3.9 ve AISC 360-22 Bölüm J3 uyarınca denklem 4.39 ile kontrol edilir.

$$V_u \leq \phi_n \sum r_{ni} \quad (4.39)$$

Bu denklemde r_{ni} her bir bulon için denklem 4.40 ile elde edilir.

$$r_{ni} = 1,2l_c t F_u \leq 2,4d_b t F_u \quad (4.40)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_b : Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.

l_c : Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki net uzaklık, mm.

F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

t : Alın levhasının kalınlığı, mm.

13. Uç levhasının kalınlığının belirlenmesi

Birleşimde, kiriş başlık ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının ucundaki, alın levhasıyla aynı geometriye sahip uç levhasının kalınlığı eğilme nedeniyle oluşabilecek

akma davranışına karşı, 6. adımda alın levhası için açıklandığı şekilde denklem 4.41 ile kontrol edilir.

$$t_{ul} \geq \sqrt{\frac{1,11M_f}{\phi_d F_{yu} Y_p}} \quad (4.41)$$

Buradaki terimler şu şekilde açıklanmıştır:

M_f : Alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

F_{yu} : Uç levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

Y_p : Alın levhasının akma çizgisi mekanizması parametresi, mm.

14. Gövde ve başlık bağlantı levhalarının kalınlık kontrolü

Uç levhasına, kolon gövdesine ve kirişin başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarına kaynak uygulamasıyla bağlanan gövde bağlantı levhasının; uç levhasına, kolon gövdesine ile başlıklarına ve kiriş gövdesinin hizasındaki bağlantı levhasına kaynaklanan, kiriş başlıkları hizasındaki başlık bağlantı levhalarının kalınlıkları denklem 4.42 ve denklem 4.43 ile belirlenecektir.

$$t_{bf} \leq t_{sf} \quad (4.42)$$

$$t_{bw} \leq t_{sw} \quad (4.43)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

t_{sf} : Kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_{sw} : Kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

Bu denklemlerdeki koşulların sağlanması ile bu bölgede kiriş enkesitinden daha güçlü bir enkesit oluşturularak plastik mafsallın kirişte belirlenen bölgede oluşması amaçlanmaktadır.

15. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

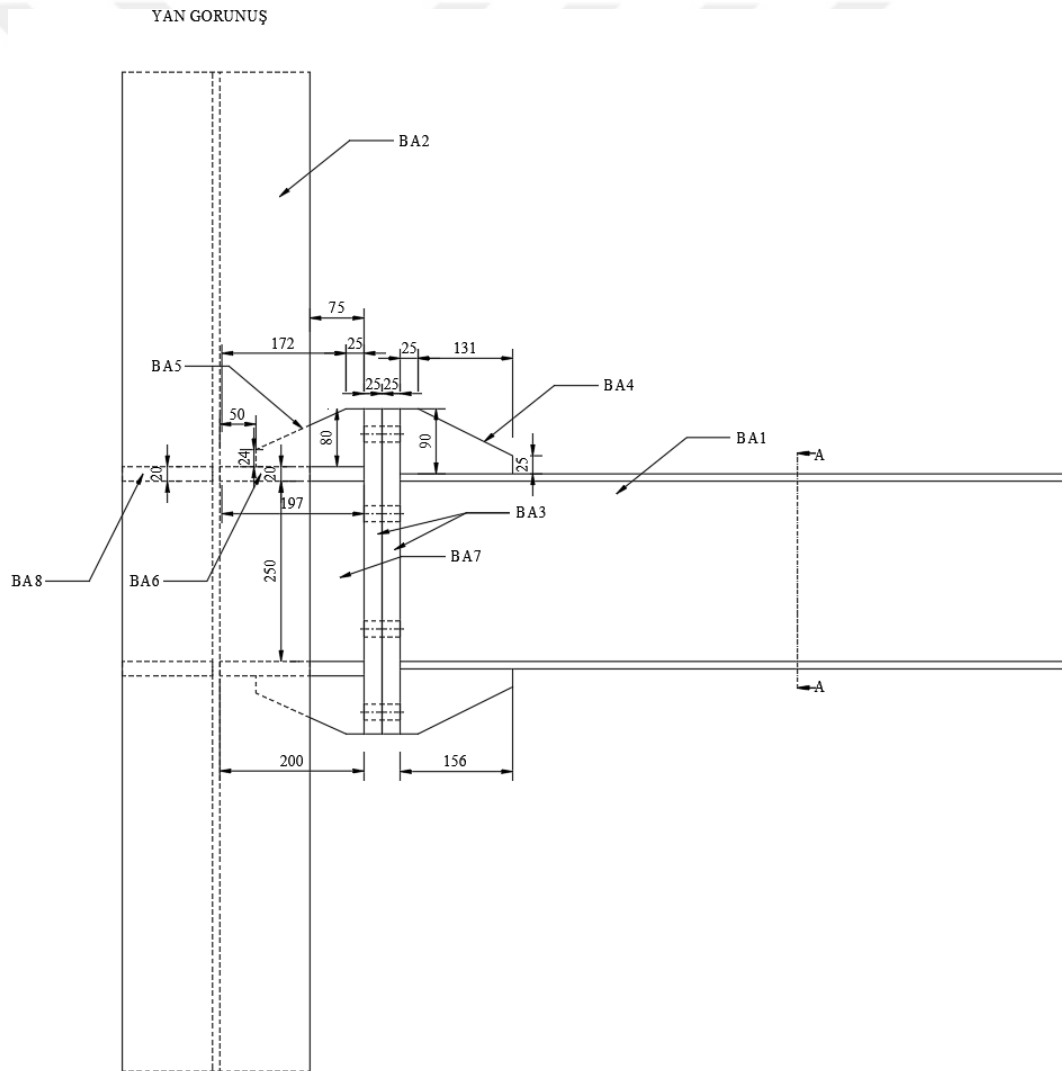
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.44 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1.0 \quad (4.44)$$

Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

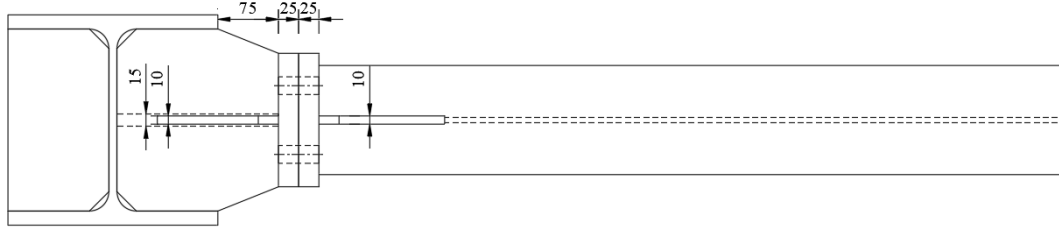
Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek B’de sunulmuştur.

Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te gösterilmektedir.



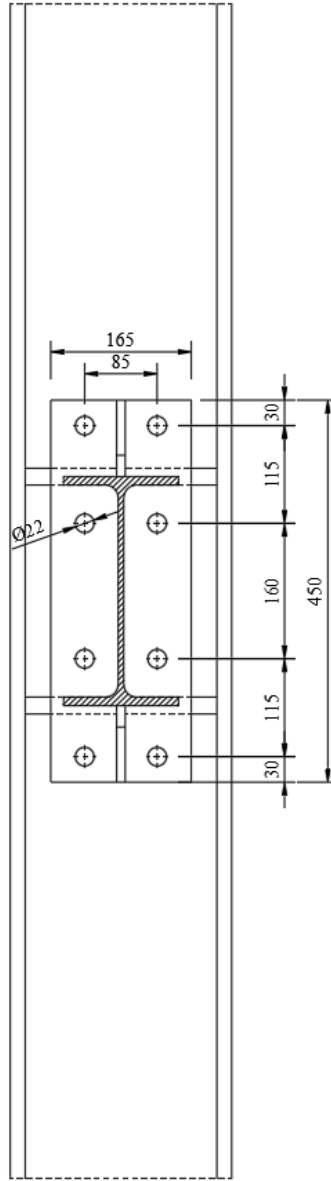
Şekil 4.12 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.

PLAN GÖRÜNÜŞÜ



Şekil 4.13 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.

KESİT A-A



Şekil 4.14 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.6’da detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.6 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
BA-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
BA-2	Kolon	HE 260 B	S355	1

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.7’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.7 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar

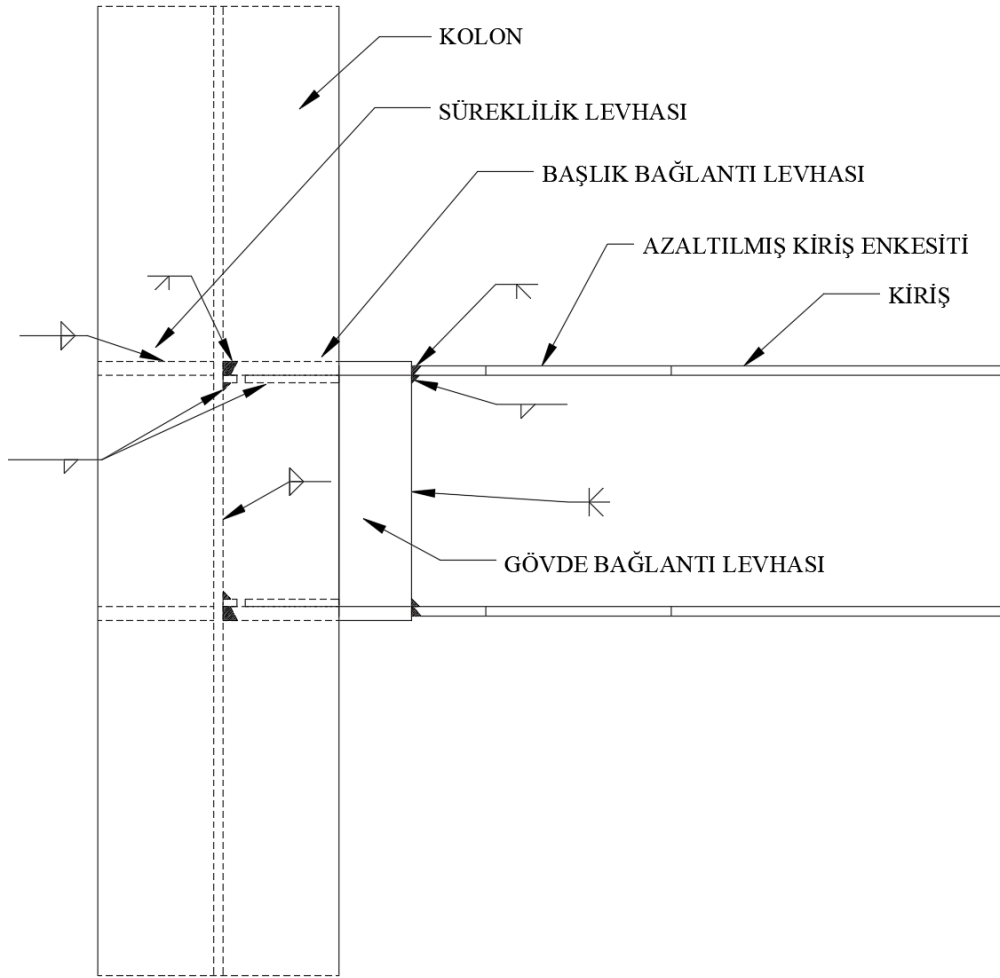
Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
BA-3	Kiriş alın ve uç levhası	S355	165	450	25	2
BA-4	Alın levhası rijitlik levhası	S355	156	90	10	2
BA-5	Uç levhası rijitlik levhası	S355	197	81	10	2
BA-6	Başlık bağlantı levhası	S355	200	225	20	2
BA-7	Gövde bağlantı levhası	S355	250	200	15	1
BA-8	Kolon süreklilik levhası	S355	125	225	20	2

4.5.3 Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde açıklanmıştır.

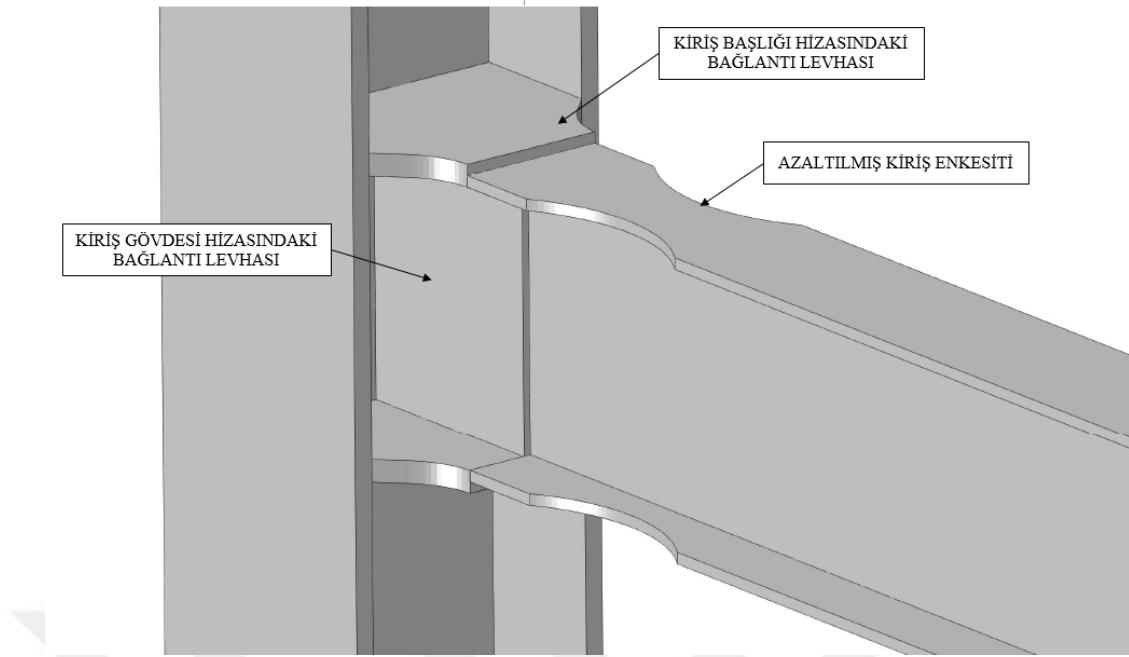
4.5.3.1 Birleşime genel bakış ve uygulama detayları

Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, TBDY 2018 Ek 9B.5’te I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı kaynaklı zayıflatılmış kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak ve AISC 358-22 Bölüm 5 gözetilerek boyutlandırılacaktır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.

Prototip birleşimde kirişin kolona bağlantısı, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasında teşkil edilen ve kolon gövdesi ile başlıklarına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulamasıyla birleşen bağlantı levhaları vasıtasıyla sağlanacaktır (Şekil 4.16). Kiriş başlık ve gövde parçalarının uç enkesitleri de bu levhalara tam penetrasyonlu küt kaynaklı olarak bağlanacaktır.



Şekil 4.16 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki bağlantı levhaları ve azaltılmış kiriş enkesiti.

Bu tür kiriş-kolon birleşimlerinde TBDY 2018 Ek 9B.4’te öngörülen şantiye kaynağından kaçınmak için kiriş elemanının kolona bağlantısında konsol bir kiriş parçasından yararlanılması planlanmıştır. Böylece konsol kiriş elemanının kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarına birleşimi tam penetrasyonlu küt kaynaklar vasıtasıyla atölyede gerçekleştirilerek aynı enkesite sahip diğer kiriş elemanının konsol eleman ucuna bağlantısı bulonlu ek birleşimi ile şantiyede sağlanacaktır.

Montaj işleminin ilk adımında, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanacaktır. Sonraki adımda, kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhası kolon gövdesine çift taraflı köşe kaynak uygulanarak kaynaklanacaktır. Devamında, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhaları ise kolon başlıklarına ve kolon gövdesine tam penetrasyonlu küt kaynaklarla vasıtasıyla altlık levhaları kullanılarak birleştirilecektir. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile kolon başlığına ve kolon gövdesine birleştirilecektir. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır. Kolon gövdesine uygulanacak kaynak işlemi, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 40 mm uzakta sonlandırılacaktır. Kolon başlığına uygulanacak

kaynak işleminin ise, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 15 mm uzakta sonlandırılması sağlanacaktır.

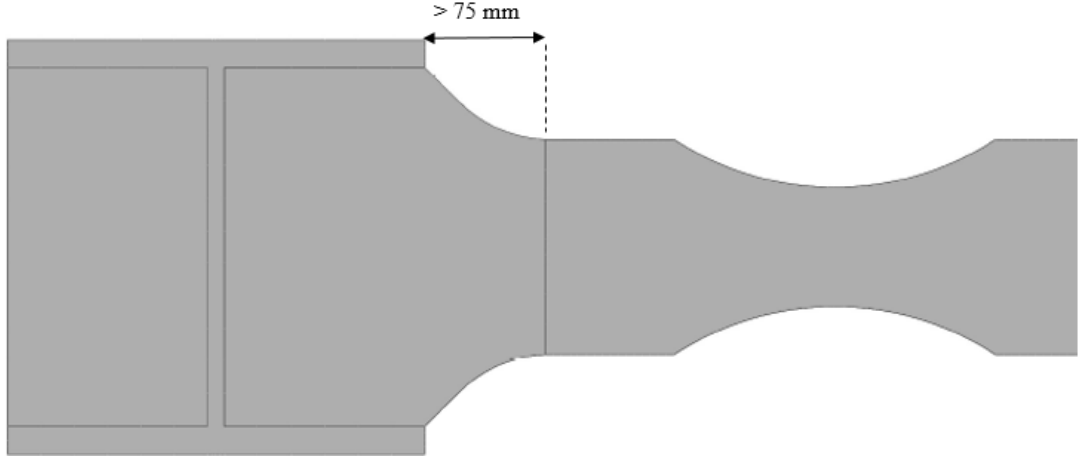
4.5.3.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

Bu başlık altında, kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ait tasarım esasları açıklanmış ve kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasına yönelik hesap adımları sunulmuştur.

Konsol kiriş elemanın, bulonlu bindirme levhali ek birleşimin kapasitesi korunmuş bölge (protected zone) dışında kalacak şekilde teşkil edilmesine olanak tanıyacak yeterli uzunlukta olması gerekmektedir.

Konsol kiriş elemanının kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarına birleşimi tam penetrasyonlu küt kaynakla teşkil edilecek bağlantısında kaynak ulaşım deliklerine yer verilmeyecek olup, kaynak uygulamaları TBDY Ek 9B.2.7 ve AISC 358-22 Bölüm 6.6’da kirişin kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşim detayları için belirtilen kaynak niteliklerine ve geometrik koşullara uygun şekilde gerçekleştirilmelidir.

Driscoll ve diğ. (1983) tarafından I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran kiriş-kolon birleşimleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına doğru minimum 75 mm uzatılması önerilmektedir. Böylece levhaların bir miktar şekil değiştirip uzama deformasyonu yapmasına izin verilmektedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kolon başlıklarının iç kısmına kaynaklı bir şekilde bağlandığında, levhaların kolon başlıklarına dik doğrultudaki deformasyonları sınırlanır, bu nedenle levhaların enine dik doğrultuda ve levha kalınlığı boyunca ek çekme gerilmeleri oluşur. Böyle bir durumun erken gevrek göçme riski oluşturabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde bağlantı levhaları kolon başlığı dışına 75 mm uzayacak şekilde tasarlanacaktır (Şekil 4.17). Bu çalışmalarda kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmının daralan enkesitli olarak teşkil edilmesinin tekrarlı yükler altında daha yüksek süneklik düzeyinin elde edilmesini sağladığı da gösterilmiştir. Bu durum esas alınarak, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmı, kiriş ucuna doğru daralan enkesite sahip olacak şekilde boyutlandırılacaktır.



Şekil 4.17 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.

Birleşime ait uygulama sınırlarının değerlendirilmesinde esas alınacak değişkenler TBDY 2018 Tablo 9B.4'te belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılabilmesi için TBDY 2018 Tablo 9B.4'te verilen uygulama sınırları çerçevesinde TBDY 2018 Ek 9B.5'te tanımlanan tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir. Söz konusu esaslar, birleşim elemanlarının TBDY 2018 Ek 9B.5.1'e uygun olarak, azaltılmış kiriş enkesitinde plastik mafsall oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olması prensibine dayanmaktadır.

Süreklilik levhalarının kolon ile bağlantısını sağlayan kaynaklı birleşimin detayları için TBDY 2018 Ek 9B.1.7'de verilen koşullar sağlanacaktır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Azaltılmış kiriş enkesit geometrisinin tahmini olarak belirlenmesi

Bu adımda kiriş profili, kolon profili ve azaltılmış kiriş enkesiti boyutları olan a , b ve c öngörülür (4.45, 4.46, 4.47).

$$0,5b_{bf} \leq a \leq 0,75b_{bf} \quad (4.45)$$

$$0,65d_b \leq b \leq 0,85d_b \quad (4.46)$$

$$0,1b_{bf} \leq c \leq 0,25b_{bf} \quad (4.47)$$

Buradaki terimler şu şekilde açıklanmıştır:

- a : Kiriş ucundan azaltılmış kiriş enkesitinin başlangıcına olan yatay mesafe, mm.
- b : Azaltılmış kiriş enkesitinin uzunluğu, mm.
- b_{bf} : Kiriş başlık genişliği, mm.
- c : Azaltılmış kiriş enkesitinin ortasındaki kesim derinliği, mm.
- d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

Kirişlerin ve kolonların, kirişteki azaltılmış kesit dahil olmak üzere, ÇYTHYE 2018 Bölüm 5.3'te belirtilen tüm yük birleşmeleri için yeterli olduğu doğrulanmalıdır. Elastik ötelenme hesabı, azaltılmış kiriş kesitinin etkisini içermelidir. Bu hususta ayrıntılı teknik açıklamalar, AISC 358-22 Bölüm 5.7'de sunulmaktadır.

2. Azaltılmış kiriş enkesitinin merkezinde plastik mukavemet momentinin belirlenmesi

Azaltılmış kiriş enkesitinin merkezinde plastik mukavemet momenti ($W_{pb,RBS}$) denklem 4.48 ile belirlenir.

$$W_{pb,RBS} = W_{pb} - 2ct_{bf}(d_b - t_{bf}) \quad (4.48)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

3. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi azaltılmış kiriş enkesitinin merkezindeki plastik mukavemet momenti kullanılarak denklem 4.49 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr}R_yF_{yb}W_{pb,RBS} \quad (4.49)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

4. Plastik mafsal yerinin belirlenmesi

Plastik mafsalın zayıflatılmış kiriş enkesitinde oluşması beklenir ve kiriş ucundan uzaklığı denklem 4.50 ile belirlenir.

$$l_h = a + \frac{b}{2} \quad (4.50)$$

5. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak değerlendirilir. Bu hesaplama, plastik mafsal konumundaki momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

6. Kiriş ucunda gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kiriş ucundaki gerekli eğilme momenti dayanımı denklem 4.51 ile hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_h l_h \quad (4.51)$$

7. Kirişin plastik eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kirişin plastik eğilme momenti dayanımı, kirişin beklenen akma gerilmesi dikkate alınarak denklem 4.52 ile hesaplanır.

$$M_f = R_y F_{yb} W_{p,b} \quad (4.52)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

8. Kirişin eğilme momenti dayanımının kontrol edilmesi

Kiriş ucundaki eğilme momenti dayanımı denklem 4.53 ile kontrol edilir.

$$M_f \leq \phi_a M_{pe} \quad (4.53)$$

Eğer denklem 4.50’de belirtilen koşul sağlanamazsa 1.adıma geri dönülerek kesit uygun bir şekilde yeniden boyutlandırılır.

9. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1’e göre kontrol edilir (4.54). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5’e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.54)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

10. Süreklilik levhalarının kalınlık kontrolü

Driscoll ve Beedle (1982) tarafından yapılan çalışmalarda, kirişin başlıkları ve gövdesinin bu bölgedeki bağlantı levhalarına doğrudan tam penetrasyonlu küt kaynak ile bağlandığı birleşimlerde, bağlantı levhalarının kiriş başlıklarından daha kalın olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu durum, gerilme düzensizliği (shear lag) etkisi nedeniyle etkili alanın azalmasının tolere edilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, üretim ve montaj süreçlerinde karşılaşılabilecek hizalama problemlerinin önüne geçilmesi amacıyla, bağlantı levhası ile kiriş başlığı arasındaki kalınlık farkının 3 ila 6 mm arasında tutulmasının uygun olacağı ifade edilmiştir. Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinde, bağlantı levhalarının geometrik özellikleri belirlenirken söz konusu hususların dikkate alınması

gerekmektedir. Bu kapsamda, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının kalınlıkları denklem 4.55 ve denklem 4.56 ile belirlenecektir.

$$t_{bf} + 3 \text{ mm} \leq t_{sf} \quad (4.55)$$

$$t_{bw} + 3 \text{ mm} \leq t_{sw} \quad (4.56)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

t_{sf} : Kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_{sw} : Kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

Bu denklemlerdeki koşulların sağlanması ile bu bölgede kiriş enkesitinden daha güçlü bir kesit oluşturularak plastik mafsalin kirişte oluşması amaçlanmaktadır.

11. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

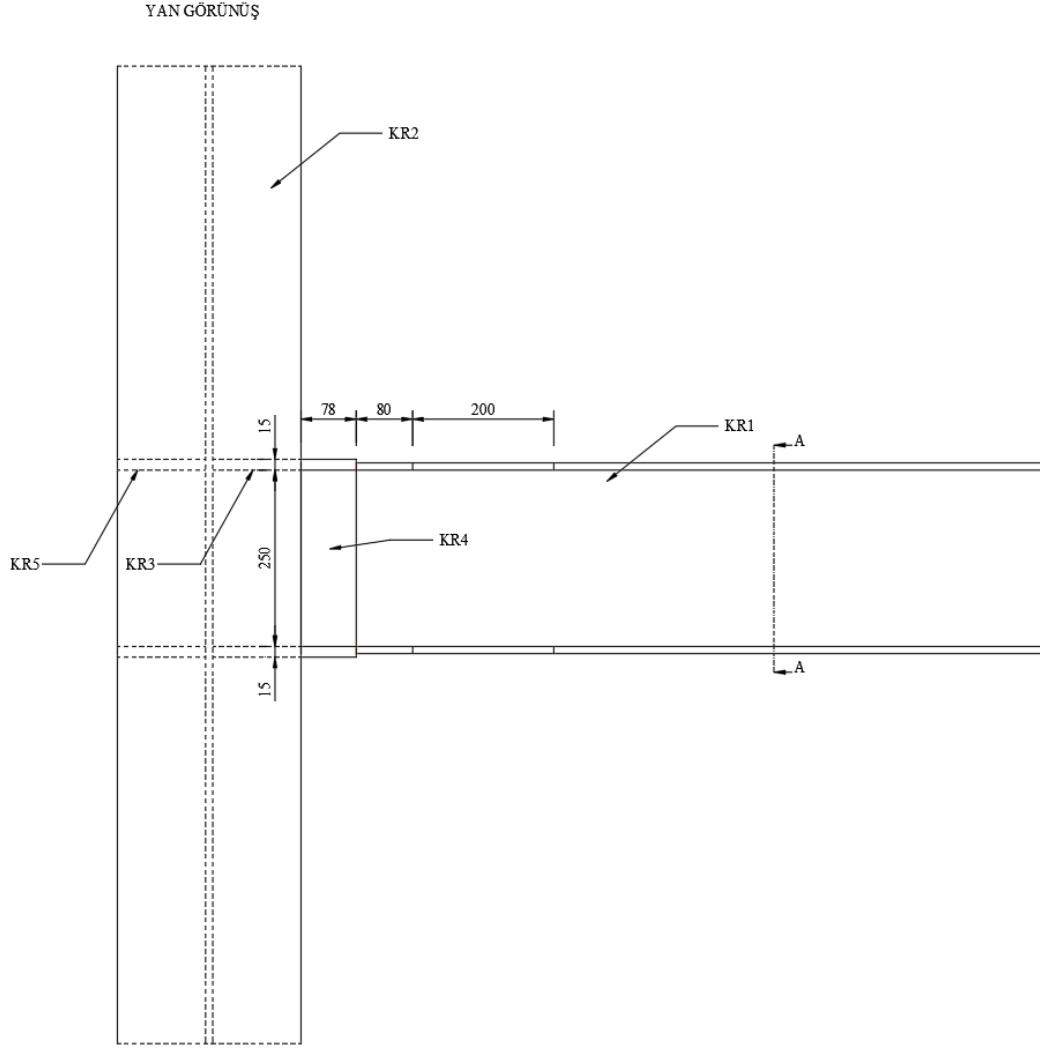
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.57 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1,0 \quad (4.57)$$

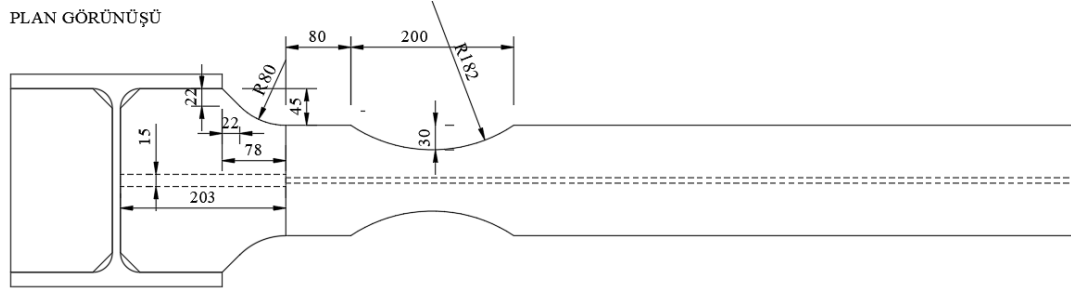
Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek C’de sunulmuştur.

Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmektedir.

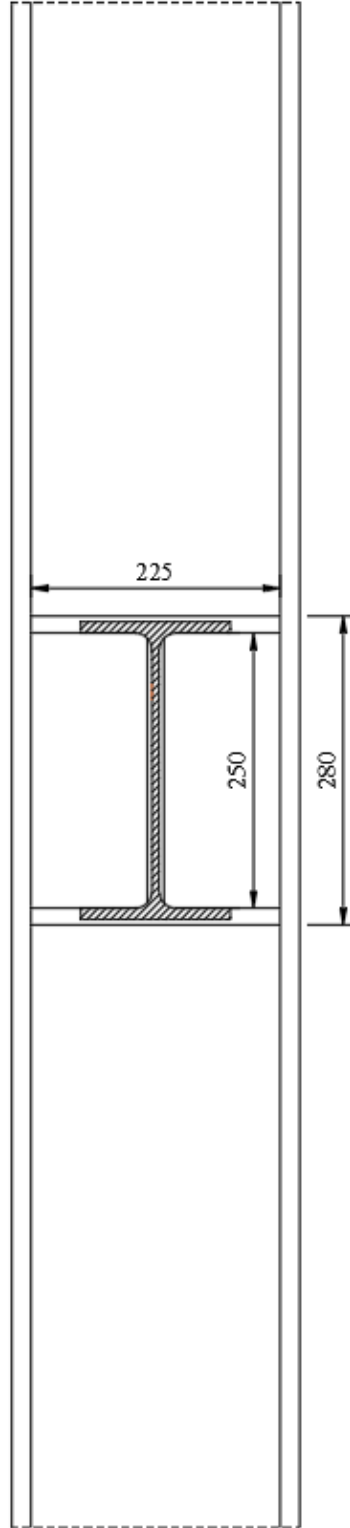


Şekil 4.18 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yan ve kesit görünüşleri.



Şekil 4.19 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.

KESİT A-A



Şekil 4.20 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.8’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.8 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
KR-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
KR-2	Kolon	HE 260 B	S355	1

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.9’da detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.9 : Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.

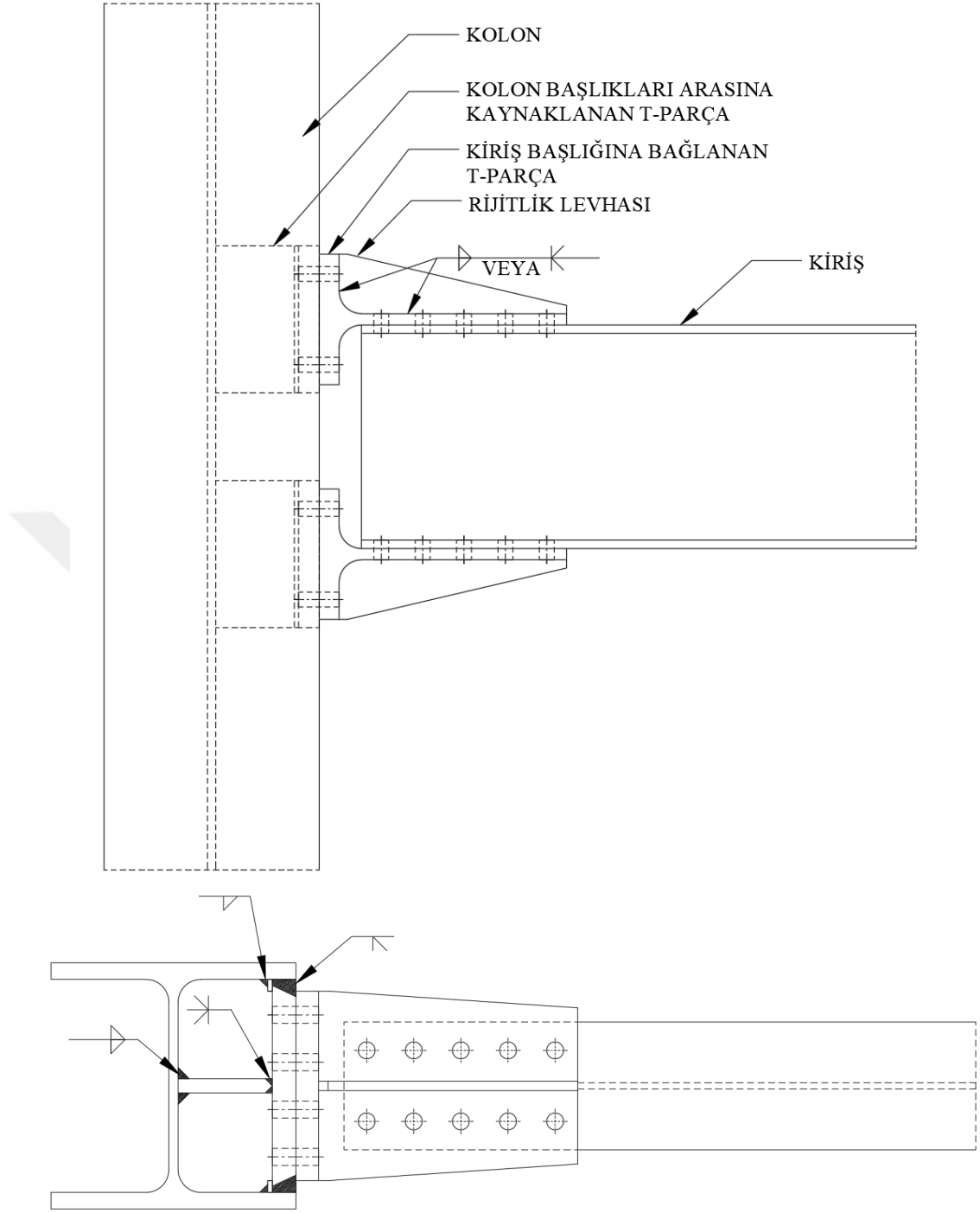
Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
KR-3	Başlık bağlantı levhası	S355	203	225	15	2
KR-4	Gövde bağlantı levhası	S355	250	203	15	1
KR-5	Kolon süreklilik levhası	S355	125	225	15	2

4.5.4 Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde açıklanmıştır.

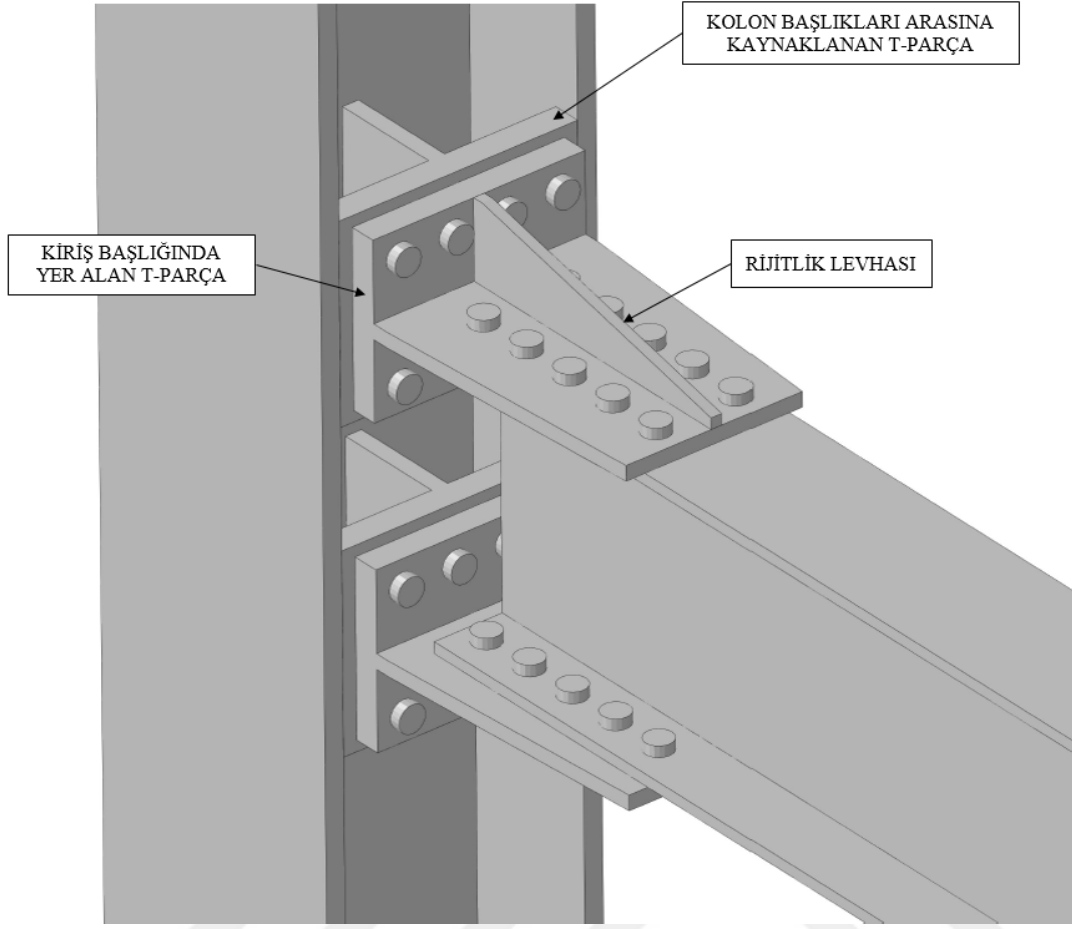
4.5.4.1 Birleşime genel bakış ve uygulama detayları

Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 358-22 Bölüm 13’te bulonlu T-parçalı I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılacaktır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.

Birleşimde 2 (iki) tipte T-parça kullanılacaktır. Kolon gövdesi ve başlıkları arasında yer alan T-parçalar, levhaların birbirine tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlandığı yapma enkesitler olarak teşkil edilecektir. Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ise haddelenmiş profillerden kesilerek elde edilecektir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : Birleşimdeki rijitlik levhası ve T-parçalar.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçaların kolona bağlantısı, yapma enkesitler kullanılarak oluşturulan T-parçalar vasıtasıyla gerçekleştirilecektir. Bu T-parçaların başlık levhalarının kenarları, kolon başlıklarının iç yüzeyinde yer alan uç kısmına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmaktadır. T-parçaların gövde levhaları ise kolon gövdesine iki taraflı köşe kaynak uygulanarak bağlanacaktır.

Montaj işleminin ilk adımında, kolon gövdesi ve başlıkları arasında yer alan T-parçalar, levhaların birbirine tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmasıyla oluşturulacaktır ve bu T-parçaların gövdeleri kolon gövdesine çift taraflı köşe kaynak uygulanarak kaynaklanacaktır. Sonraki adımda, T-parçaların başlık levhaları kolon başlıklarının uç kısımlara altlık levhaları yardımıyla tam penetrasyonlu küt kaynak yöntemi uygulanarak bağlanacaktır. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile T-parçaların başlıklarına bağlanacaktır. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır.

Kiriş başlığındaki T-parçaların başlıkları, başlık ve gövdeleri arasına kaynaklanan levhalar vasıtasıyla rijitleştirilmektedir. Rijitlik levhasının birleşiminde tam penetrasyonlu küt kaynak veya köşe kaynak kullanılacaktır.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ile kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçaların başlık levhaları arasındaki bağlantı ve giriş başlığına birleşen T-parçaların gövdeleri ile giriş başlıkları arasındaki bağlantı bulonlu birleşim olarak teşkil edilecektir.

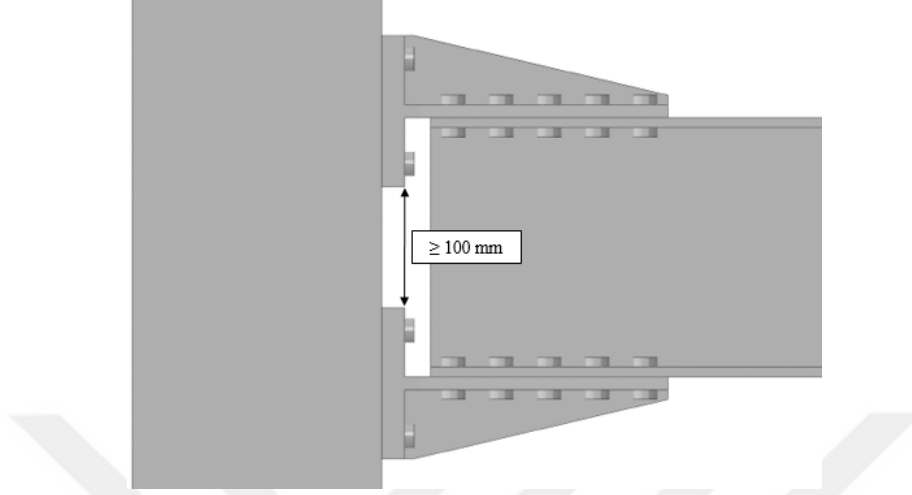
4.5.4.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

Bu başlık altında, bulonlu T-parçalı I-enkesitli giriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ait tasarım esasları açıklanmış ve giriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasına yönelik hesap adımları sunulmuştur.

I-enkesitli girişin, H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, kesme kuvveti; T-parçaların başlıkları arasına yerleştirilen, kolon başlığına kaynaklı ve giriş gövdesine bulonlarla bağlanan bir kayma levhası aracılığıyla aktarılır. Ancak, I-enkesitli girişin, H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, T-parçaların başlıkları arasında yeterli mesafe sağlanamadığından, kesme kuvvetinin aktarımında kayma levhası kullanılmayacaktır. Bu durumda, kesme kuvvetinin; eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı bulonlar üzerinden aktarılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, T-parçaların başlıklarının ve ilgili bulonların kesme kuvveti etkisi altındaki dayanımlarının belirlenmesinde, AISC 358-22 Bölüm 6'da tanımlanan, I-enkesitli girişin H-enkesitli kolon başlığına bağlandığı tam dayanımlı, bulonlu alın levhali birleşimlerin basınç bölgesine ait sınır durumları esas alınacaktır. Bu sınır durumlar; T-parçaların başlıklarındaki bulon deliklerinde ezilme ile bulonlarda kesme etkisi altında oluşan kırılma sınır durumlarını kapsamaktadır.

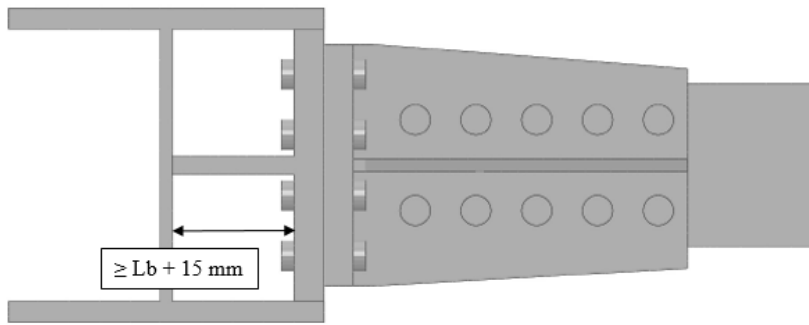
Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ile kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçaların başlık levhalarının birleşiminde kullanılacak bulonların montajının yapılabilmesi için T-parça başlıklarının yatay kenarları arasında yeterli bir mesafe bırakılmalı; böylece yüksekliği bu mesafeyle sınırlanan boşluktan bulonların geçirilmesi mümkün olmalıdır. Montaj işlemi işçiler tarafından elle

gerçekleştirileceğinden, söz konusu mesafenin bir kişinin elinin rahatça erişimine olanak tanıyacak büyüklükte olması gerekmektedir. Bu nedenle, bırakılacak mesafenin en az 100 mm olması uygun görülmüştür (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 : T-parçaların başlıklarının yatay kenarları arasındaki minimum mesafe.

Buna ek olarak, bulonların boşluktan geçirildikten sonra başlık levhalarındaki deliklere sorunsuzca hizalanarak yerleştirilebilmesi için, kolon gövdesi ile kolon başlıklarına kaynaklanan T-parça başlıklarının iç yüzeyleri arasındaki mesafe, kullanılacak bulonun toplam uzunluğundan en az 15 mm daha büyük olacak şekilde belirlenmelidir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : T-parçaların başlık iç yüzeyi ile kolon gövdesi yüzeyi arasındaki minimum mesafe.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçaların haddelenmiş profillerden kesilerek elde edilmesi gerekmektedir.

TBDY 2018 Ek 9B.2.7(b) uyarınca, rijitlik levhası kalınlığının 10 mm'den az olması durumunda, rijitlik levhasının dayanımına eşit dayanıma sahip köşe kaynak kullanılmasına izin verilebilir.

Bu birleşimin boyutlandırılmasında esas alınacak değişkenler AISC 358-22 Bölüm 13.2’de belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılabilmesi için AISC 358-22 Bölüm 13’teki tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir.

Söz konusu esaslar, birleşim elemanlarının AISC 358-22 13.1’e uygun olarak, plastik mafsallın kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasında, kiriş enkesitinde oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları prensibine dayanmaktadır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi denklem 4.58 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.58)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

2. En büyük karakteristik bulon deliği çapının belirlenmesi

Birleşimde, kiriş başlığının çekme kırılması sınır durumuna ulaşmasını önleyecek bulon deliğinin çapı (d_h) denklem 4.59 ile belirlenir.

$$d_h \leq \frac{W_p}{2t_f(d - t_f)} \left(1 - \frac{R_y F_y}{R_t F_u} \right) - 2mm \quad (4.59)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_f : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

W_p : Kirişin kuvvetli eksenine etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

3. Kiriş başlığı ile T-parça gövdesinin birleşiminde kayma etkisinde dayanımın belirlenmesi

Çelik malzeme sınıfı ve birleşim için uygulama sınırları göz önünde tutularak, kiriş başlığında yer alan T-parça gövdesinin kalınlığı ve genişliği, bulonlar arasındaki uzaklık ve bulonların levha kenarlarına olan uzaklıkları kiriş başlık genişliği göz önünde bulundurularak öngörülür. Ardından, bulon kesme kuvveti dayanımı ve bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı dikkate alınarak birleşimin kayma etkisindeki dayanımı hesaplanır (4.60).

$$\phi r_{nv} = \min \left[\begin{array}{l} \phi_n 1,0 F_{nv} A_b \\ \phi_d 2,4 F_{ub} d_{vb} t_{fb} \\ \phi_d 2,4 F_{ut} d_{vb} t_{st} \end{array} \right] \quad (4.60)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm².

F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.

F_{ub} : Kiriş malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_{ut} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

d_{vb} : Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak bulonların çapı, mm.

t_{st} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.

t_{fb} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

4. Kiriş başlığı ile T-parça gövdesinin birleşiminde kullanılacak bulon sayısının tahmin edilmesi

Başlangıçta birleşim detayının kesin olarak bilinmemesi ve buna bağlı olarak plastik mafsalsın yerinin belli olmaması nedeniyle, denklem 4.61 kullanılarak birleşimde kullanılacak bulon sayısı tahmin edilir.

$$n_{vb} \geq \frac{1,25M_{pr}}{d_b \phi r_{nv}} \quad (4.61)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{pr} : Plastik mafsals bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

Birleşimin tasarımında dikkate alınacak eğilme momenti değeri kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyindeki eğilme momenti ($M_f = M_{uc}$) değeridir. Bu değerin plastik mafsaldaki kesme kuvvetinin etkisi de göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda M_f değeri M_{pr} değerinden daha büyük olacağı için, M_f değerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, denklem 4.14'teki 1,25 katsayısının kullanılması öngörülmüştür (AISC 358-22).

5. Plastik mafsals yerinin belirlenmesi

Plastik mafsalsın kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı denklem 4.62 ile belirlenir.

$$l_h = s_1 + L_{vb} = s_1 + s_{vb} \left(\frac{n_{vb}}{2} - 1 \right) \quad (4.62)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_1 : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyine en yakın bulon sırası ile bu yüzey arasındaki uzaklık, mm.

s_{vb} : Kiriş başlığındaki bulon deliklerinin merkezleri arasındaki uzaklık, mm.

n_{vb} : Kiriş başlığındaki bağlantıda kullanılan bulon sayısı.

L_{vb} : Kiriş başlığındaki bağlantıda kullanılan ilk ve son bulonların arasındaki uzaklık, mm.

6. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak değerlendirilir. Bu hesaplama, plastik mafsal konumundaki momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

7. Kolon başlıkları arasında ve kiriş başlığında yer alan T-parçaların başlıkları arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, plastik mafsal bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}), gerekli kesme kuvveti dayanımı (V_h) ve plastik mafsal konumu ile söz konusu yüzey arasındaki uzaklık dikkate alınarak (l_h), denklem 4.63 ile hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_h l_h \quad (4.63)$$

8. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvetin belirlenmesi

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet; eğilme momentinin çekme ve basınç kuvveti bileşenleri olarak denklem 4.64 ile belirlenir.

$$F_{pr} = \frac{M_f}{1,05d_b} \quad (4.64)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

F_{pr} değeri, kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı M_f , üst ve alt T-parçaların gövdelerinin merkezleri arasındaki uzaklığa bölünerek hesaplanmaktadır. Bu tasarım adımında, T-parçaların gövde kalınlıkları henüz belirlenmediğinden, bu uzaklık $1,05d_b$ olarak tahmin edilmektedir. T-parçaların gövde kalınlıkları belirlendikten sonra bu öngörülen kuvvet yeniden hesaplanacaktır.

9. Birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlığının belirlenmesi

Birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlığı AISC 358-22 Bölüm 6'da I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun başlığına bağlandığı tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimler için tanımlanan denklem 4.65 ile belirlenecektir.

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) \quad (4.65)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.

Rijitlik levhasında yerel burkulmanın önlenmesi için denklem 4.66 ile verilen kriterin sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}} \right)} \quad (4.66)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

h_{st} : Rijitlik levhasının yüksekliği, mm.

t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

10. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde boyutlarının belirlenmesi

Kiriş başlığındaki T-parçanın gövde boyutları, çekme kuvveti etkisinde kayıpsız enkesit alanında akma ve net enkesit alanında kırılma; basınç kuvveti etkisinde ise kayıpsız enkesit alanında akma veya burkulma sınır durumlarına göre belirlenir.

İlk bulonların hizasında T-parça gövdesinin kayıpsız enkesit alanı, T-parça başlık genişliği (W_T) ve gövde kalınlığı (t_{st}) göz önünde bulundurularak belirlenir. W_T

değeri, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki birleşimde yer alan bulonlar arasındaki yatay uzaklığa bağlı olarak belirlenir. Genel bir yaklaşımla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği, kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığına göre bir miktar daha dar olacağı varsayılabilir.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde kalınlığının belirlenmesinde, T-parçanın başlık genişliği ile Whitmore genişliği arasındaki küçük olan değer esas alınır. Eğer T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse, genişlik doğrudan T-parçanın başlık genişliği (W_T) olarak alınır. Ancak daralan bir enkesite söz konusuysa, bu durumda genişlik, kesitin geometrisine bağlı olarak belirlenir.

Bu adımda, çekme kuvveti etkisi altındaki kontroller gerçekleştirilecektir. İlk olarak, kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin boyutlandırılmasında kullanılacak Whitmore genişliği (W_{whit}) denklem 4.67 ile hesaplanacaktır.

$$W_{whit} = 2L_{vb} \tan 30^\circ + g_{vb} \quad (4.67)$$

g_{vb} : Kiriş başlığında yer alan bulonlar arasındaki yatay uzaklık, mm.

L_{vb} denklem 4.68 ile belirlenecektir.

$$L_{vb} = s_{vb} \left(\frac{n_{vb}}{2} - 1 \right) \quad (4.68)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_{vb} : Kiriş başlığındaki bulon deliklerinin merkezleri arasındaki uzaklık, mm.

n_{vb} : Kiriş başlığındaki birleşimde kullanılan bulon sayısı.

Akma sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı (t_{st}), denklem 4.69 ile belirlenir.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{\min(W_T, W_{whit}) \phi_d F_{yt}} \quad (4.69)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yt} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

W_T : T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği; daralan bir enkesite sahip ise ilk bulonların hizasında T-parçanın gövde genişliği.

W_{whit} : Whitmore genişliği, mm.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Kırılma sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı (t_{st}), denklem 4.70 ile belirlenir.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n F_{ut} [\min(W_T, W_{whit}) - 2(d_{vht} + 2 \text{ mm})]} \quad (4.70)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{ut} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinde basınç burkulması sınır durumu, denklem 4.71’de tanımlanan koşulun sağlanmasıyla önlenir.

$$t_{st} \geq \frac{s_1 - t_{ft}}{9,60} \quad (4.71)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_1 : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyine en yakın bulon sırası ile bu levhanın yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.

t_{ft} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

11. Çekme kuvveti etkisindeki bulonların çapının belirlenmesi

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhası ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık levhasının birleşiminde kullanılacak bulonların minimum çapı denklem 4.72 ile belirlenir.

Denklem 4.72, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık bölgelerinde kaldırma etkisinin (prying action) oluşmadığı varsayımıyla, çekme bulonları için gerekli minimum çapın tahminine olanak sağlamaktadır. T-parçanın başlığında meydana gelebilecek kaldırma etkisinin düzeyine bağlı olarak, daha büyük çapta bulon kullanımına ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, bu bölgede kaldırma etkisine bağlı olarak sünek bir deformasyon mekanizmasının gelişimine olanak tanımak amacıyla, tasarımda daha büyük çaplı bulonların tercih edilmesi de uygun bir yaklaşım olabilir (Swanson, 2002).

$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4F_{pr}}{n_{tb}\phi_n\pi F_{nt}}} \quad (4.72)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

12. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının boyutlandırılması

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği (b_{ft}) denklem 4.73'teki koşulu sağlamalıdır. b_{ft} değeri, kolon başlıklarının iç yüzeyleri arasındaki uzaklığa eşit olarak alınmalıdır.

$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a \quad (4.73)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

b : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezi ile gövdesindeki eğri bölgenin başlangıcı arasındaki uzaklık, mm.

g_{tb} : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezleri arasındaki yatay uzaklık, mm.

d_{tb} : Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın birleşiminde kullanılacak bulonların çapı, mm.

a değeri denklem 4.74 ile hesaplanır.

$$1,5d_{tb} \leq 1,25b \quad (4.74)$$

Bulonların çekme dayanımı ϕr_{nt} denklem 4.75 ile hesaplanır.

$$\phi r_{nt} = \phi_n A_{tb} F_{nt} \quad (4.75)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_{tb} : Çekme kuvveti etkisi altındaki bulonların kayıpsız enkesit alanı, mm².

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının gerekli dayanımı T_{req} denklem 4.76 ile hesaplanır.

$$T_{req} = \frac{F_{pr}}{n_{tb}} \quad (4.76)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

Karma göçme modu (Mixed-mode failure), hem T-parçanın başlığında akmanın meydana gelmesini hem de bulonlarda hasar oluşmasını kapsayan, her iki mekanizmanın birlikte etkili olduğu bir hasar türü olarak tanımlanmaktadır. Tasarımda genellikle belirleyici hasar modu olarak bu durumun gerçekleşeceği varsayımıyla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının minimum kalınlığı (t_{ft}), denklem 4.77 ile hesaplanacaktır.

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{T_{req}(a' + b') - \phi r_{nt} a'}{\phi_a F_{yp}}} \quad (4.77)$$

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$b' = b - \frac{1}{2}d_{tb}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

$$a = 1,5d_{tb} \leq 1,25b$$

b : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezi ile gövdesindeki eğri bölgenin başlangıcı arasındaki uzaklık, mm.

d_{tb} : Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın birleşiminde kullanılacak bulonların çapı, mm.

W_T : T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği; daralan bir enkesite sahip ise ilk bulonların hizasında T-parçanın gövde genişliği.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

ϕr_{nt} : Bir bulonun çekme dayanımı, MPa.

T_{req} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının gerekli dayanımı, kN.

F_{yt} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Bazı durumlarda, denklem 4.77'de yer alan ifadenin kök içerisindeki terimi negatif bir değer alabilir ve bu durum, fiziksel olarak anlamlı olmayan bir sonuca neden olabilir. Bu gibi durumlarda kullanılabilecek alternatif hesap yöntemi, denklem 4.78'de belirtilmektedir.

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{\phi r_{nt} a' b'}{\phi_d F_{yt} p [a' + \delta(a' + b')]}} \quad (4.78)$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

d_{tht} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığındaki çekme kuvveti etkisindeki bulonların delik çapları, mm.

Tüm durumlar için, kaldırma etkisini (prying action) ortadan kaldırmak üzere gerekli minimum başlık kalınlığı ($t_{ft,crit}$) denklem 4.79 ile hesaplanabilir

$$t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4\phi r_{nt} b'}{\phi_d F_{yt} p}} \quad (4.79)$$

13. Kiriş başlığında yer alan T-parça için uygun H-enkesitli profilin belirlenmesi

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın, hangi H-enkesitli çelik profilden kesilerek oluşturulacağı, aşağıdaki hususlara bağlı olarak belirlenmelidir:

- Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeylerine en yakın bulon sırası ile bu levhanın yüzeyleri arasındaki uzaklık (s_1) ile, 5. adımda hesaplanan, kiriş başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi arasındaki bağlantıda kullanılan ilk ve son bulonların arasındaki uzaklık (L_{vb}) dikkate alınarak, gerekli minimum H-enkesitli profil yüksekliğinin belirlenmesi gerekmektedir.
- H-enkesitli profilin gövde kalınlığı 10.adımda hesaplanır.
- H-enkesitli profilin başlık genişliği (b_{ft}) ve başlık kalınlığı (t_{ft}) 12.adımda hesaplanır.

14. Birleşimin dönme rijitliğinin kontrol edilmesi

Bağlantının başlangıç rijitliği, Swanson (1999) tarafından önerilen rijitlik modeline dayanarak hesaplanmakta ve tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak sınıflandırılabilmesi için gerekli minimum rijitlik değeri olan $18EI_{kiriş}/L_o$ ile karşılaştırılmaktadır. Kirişin tüm elastik moment kapasitesini geliştirecek şekilde tasarlanan çoğu bağlantının bu rijitlik kriterini sağladığı ve bu nedenle tam rijit olarak kabul edilebileceği varsayılır. Ancak, AISC 358-22'de de belirtildiği üzere, T-parçalı birleşimler için bu kontrolün yapılması yine de zorunludur. Birleşimin tam rijit olarak sınıflandırılabilmesi için, denklem 4.80 ile tanımlanan koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$K_i \geq \frac{18EI_{kiriş}}{L_o} \quad (4.80)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

$I_{kiriş}$: Kirişin kuvvetli eksenini etrafında atalet momenti, mm⁴.

L_o : Kirişin kolonların merkezleri arasındaki teorik açıklığı, mm.

$$K_i = \frac{d_b^2 K_{ten} K_{comp}}{K_{ten} + K_{comp}}$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{K_{flange}} + \frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{flange} = \frac{12 n_{tb} E I_{ft} (a' \beta_a + 3 b' \beta_b)}{b'^3 \beta_b (4 a' \beta_a + 3 b' \beta_b)}$$

$$K_{stem} = \frac{t_{st} E (W_T - b_{fb})^2}{L_{stem} \left[(W_T - b_{fb}) + b_{fb} \ln \left(\frac{b_{fb}}{W_T} \right) \right]}$$

L_{stem} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde uzunluğu, mm.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

$$I_{ft} = \frac{p t_{ft}^3}{12}$$

$$K_{slip} = \frac{P_{slip}}{\Delta_{slip}}$$

$$P_{slip} = n_{vb} \alpha (0,70 F_{nt} A_{vb}) \mu$$

$$\Delta_{slip} = 0,19 \text{ mm}$$

n_{vb} : Kiriş başlığındaki birleşimde kullanılan bulon sayısı.

A_{vb} : Kiriş başlığındaki birleşimde kullanılan bulonların dış açılmamış gövdelerinin karakteristik enkesit alanları, mm².

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

α = 1,00, 8.8 sınıfı bulonlar için.

= 0,88, 10.9 sınıfı bulonlar için.

$$\beta_a = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}a'^2}$$

$$\beta_b = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}b'^2}$$

G : Yapısal çelik malzemesinin kayma modülü, MPa.

15. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki eden kuvvetin hesaplanması

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı (M_f) ve kiriş başlığında yer alan T-parçanın belirlenen gövde kalınlığı kullanılarak kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki eden gerçek başlık kuvveti (F_f) denklem 4.81 ile hesaplanacaktır.

$$F_f = \frac{M_f}{d_b + t_{st}} \quad (4.81)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{st} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.

16. Kayma kuvveti etkisindeki bulonların dayanımının yeniden kontrol edilmesi

T-parçanın gövdesi ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak bulonların dayanımı, gerçek başlık kuvveti (F_f) dikkate alınarak kontrol edilir. Adım 3'te hesaplanan ϕr_{nv} değeri kullanılarak, Adım 4'te tahmin edilen kayma etkisindeki bulon sayısının (n_{vb}) gerçek başlık kuvvetini karşılamada yeterli olup olmadığı doğrulanmalıdır (4.82).

$$\phi R_n \geq F_f \quad (4.82)$$

17. Kiriş başlığındaki T-parçanın gövde dayanımının yeniden kontrol edilmesi

T-parçanın gövdesinin gerçek başlık kuvvetine karşı yeterli dayanıma sahip olup olmadığını değerlendirmek için; kayıpsız enkesit alanında akma, net enkesit alanında kırılma ve eğilmeli burkulma sınır durumları kontrol edilmelidir (4.83).

$$\phi R_n \geq F_f \quad (4.83)$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı denklem 4.84 ile belirlenir.

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st} \quad (4.84)$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki net enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı denklem 4.85 ile belirlenir.

$$\phi R_n = \phi_n F_{ut} [\min(W_T, W_{Whit}) - 2(d_{vht} + 2)] t_{st} \quad (4.85)$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma sınır durumuna karşı dayanımı KL/r oranının 25'ten küçük olması halinde denklem 4.86 ile belirlenir.

$$KL/r \leq 25 ; \quad \phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st} \quad (4.86)$$

KL/r oranı denklem 4.87 ile belirlenir.

$$\frac{KL}{r} = \frac{(0,75)(s_1 - t_{ft})}{\sqrt{\frac{W_T t_{st}^3}{12 W_T t_{st}}}} = 2,60 \left(\frac{S_1 - t_{ft}}{t_{st}} \right) \quad (4.87)$$

$KL/r > 25$ olması durumunda, hesaplanan KL/r değeri kullanılarak AISC 360-22 Bölüm E3 veya ÇYTHYE (2018) Bölüm 8.2'de belirtildiği şekilde dayanım katsayısının $\phi = \phi_n$ olduğu kabul edilerek hesaplanacaktır.

18. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık dayanımının yeniden kontrol edilmesi

T-parçanın başlık dayanımı denklem 4.88 ile hesaplanır.

$$\phi R_n = n_{tb} \phi T \quad (4.88)$$

Denklem 4.84'te belirtilen ϕT değeri, ϕT_1 (plastik başlık mekanizması), ϕT_2 (karma göçme modu) ve ϕT_3 (kaldırma etkisi olmadan çekme etkisindeki bulonun kırılması) değerlerinin en küçüğüdür.

T-parçanın başlığında plastik mekanizma sınır durumu için dayanım denklem 4.89 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_1 = \frac{(1 + \delta)}{4b'} p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2 \quad (4.89)$$

T-parçanın başlığında, önce akma ardından bulonların kırılmasıyla meydana gelen karma göçme modu (mixed-mode failure) sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı denklem 4.90 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_2 = \frac{\phi r_{nt} a'}{a' + b'} + \frac{p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2}{4(a' + b')} \quad (4.90)$$

Çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı denklem 4.91 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_3 = \phi r_{nt} \quad (4.91)$$

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$a = \frac{1}{2} (b_{ft} - g_{tb}) \leq 1,25b$$

$$b' = b - \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$b = \frac{1}{2} (g_{tb} - t_{st,eff})$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

$$t_{st,eff} = k_1 + \frac{t_{st}}{2}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p}$$

d_{tht} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığındaki çekme kuvveti etkisindeki bulonların delik çapları, mm.

19. Kiriş başlığı ve T-parçanın gövdesinin birleşiminde bulon deliklerinin ezilme dayanımının kontrolü

Kiriş başlığı ve T-parçanın gövdesinde yer alan bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.3.9 ve AISC 360-22 Bölüm J3 uyarınca denklem 4.92 ile kontrol edilir.

$$F_f \leq \phi_d \sum R_{ni} \quad (4.92)$$

Bu denklemde R_{ni} her bir bulon için denklem 4.93 ile elde edilir.

$$\phi_d R_{ni} = \phi_d 1,2 l_c t F_u \leq \phi_d 2,4 d_b t F_u \quad (4.93)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_b : Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.

t : Kiriş başlığı veya T-parça gövdesinin kalınlığı, mm.

F_u : Kiriş veya T-parça malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

l_c : Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki uzaklık, mm.

20. Kiriş başlığı ve T-parçanın gövdesinin blok kırılma dayanımının kontrol edilmesi

Blok kırılma sınır durumu, AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2’te tanımlanan şekilde denklem 4.94 ile hesaplanır.

$$R_n = 0,60 F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0,60 F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (4.94)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_{nt} : Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{nv} : Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{gv} : Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı, mm².

F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.

U_{bs} : Çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan bir katsayı.

Çekme gerilmeleri yayılışının üniform olduğu yüzeylerde, $U_{bs} = 1,00$; üniform olmadığı yüzeylerde ise $U_{bs} = 0,50$, olarak alınacaktır. Bu hususta ayrıntılı teknik açıklamalar, ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.3'te sunulmaktadır.

Bu tasarım kapsamında, blok kırılma hasarı sünek bir göçme modu olarak kabul edilir ve bu nedenle dayanım katsayısı olarak ϕ_d kullanılmalıdır.

21. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilir (4.95). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5'e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.95)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

Kiriş-kolon birleşiminin gerekli kesme kuvveti dayanımı (V_u), kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımına eşit alınmalıdır.

22. T-parçanın başlığının kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, kesme kuvveti; T-parçaların

başlıkları arasına yerleştirilen, kolon başlığına kaynaklı ve kiriş gövdesine bulonlarla bağlanan bir kayma levhası aracılığıyla aktarılır. Ancak, I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, T-parçaların başlıkları arasında yeterli mesafe sağlanamadığından, kesme kuvvetinin aktarımında kayma levhası kullanılmaz. Bu durumda, kesme kuvvetinin; eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı bulonlar üzerinden aktarılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, T-parçaların ve ilgili bulonların kesme kuvveti etkisi altındaki dayanımlarının belirlenmesinde, AISC 358-22 Bölüm 6'da tanımlanan, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolon başlığına bağlandığı tam dayanımlı, bulonlu alın levhalı birleşimlerin basınç bölgesine ait sınır durumları esas alınacaktır. Bu sınır durumlar; T-parçaların başlıklarındaki bulon deliklerinde ezilme ile bulonlarda kesme etkisi altında oluşan kırılma sınır durumlarını kapsamaktadır.

Bulonların kesme kuvveti dayanımı denklem 4.96 ile hesaplanır.

$$V_u \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b \quad (4.96)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm².

n_b : Basınç başlığındaki bulon sayısı.

F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.

Basınç etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.3.9 ve AISC 360-22 Bölüm J3 uyarınca denklem 4.97 ile kontrol edilir.

$$V_u \leq \phi_n \sum r_{ni} \quad (4.97)$$

Bu denklemde r_{ni} her bir bulon için denklem 4.98 ile elde edilir.

$$r_{ni} = 1,2l_c t F_u \leq 2,4d_b t F_u \quad (4.98)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_b : Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.

l_c : Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki net uzaklık, mm.

F_u : T-parça malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

t : T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

23. Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın gövde ve başlık kalınlıklarının belirlenmesi

Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın gövde kalınlığı denklem 4.99 ile belirlenecektir.

$$t_{bw} \leq t_{tcw} \quad (4.99)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_{tcw} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.

Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın başlık kalınlığı denklem 4.100 ile belirlenecektir.

$$t_{ft} \leq t_{tcf} \quad (4.100)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{ft} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

t_{tcf} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

24. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

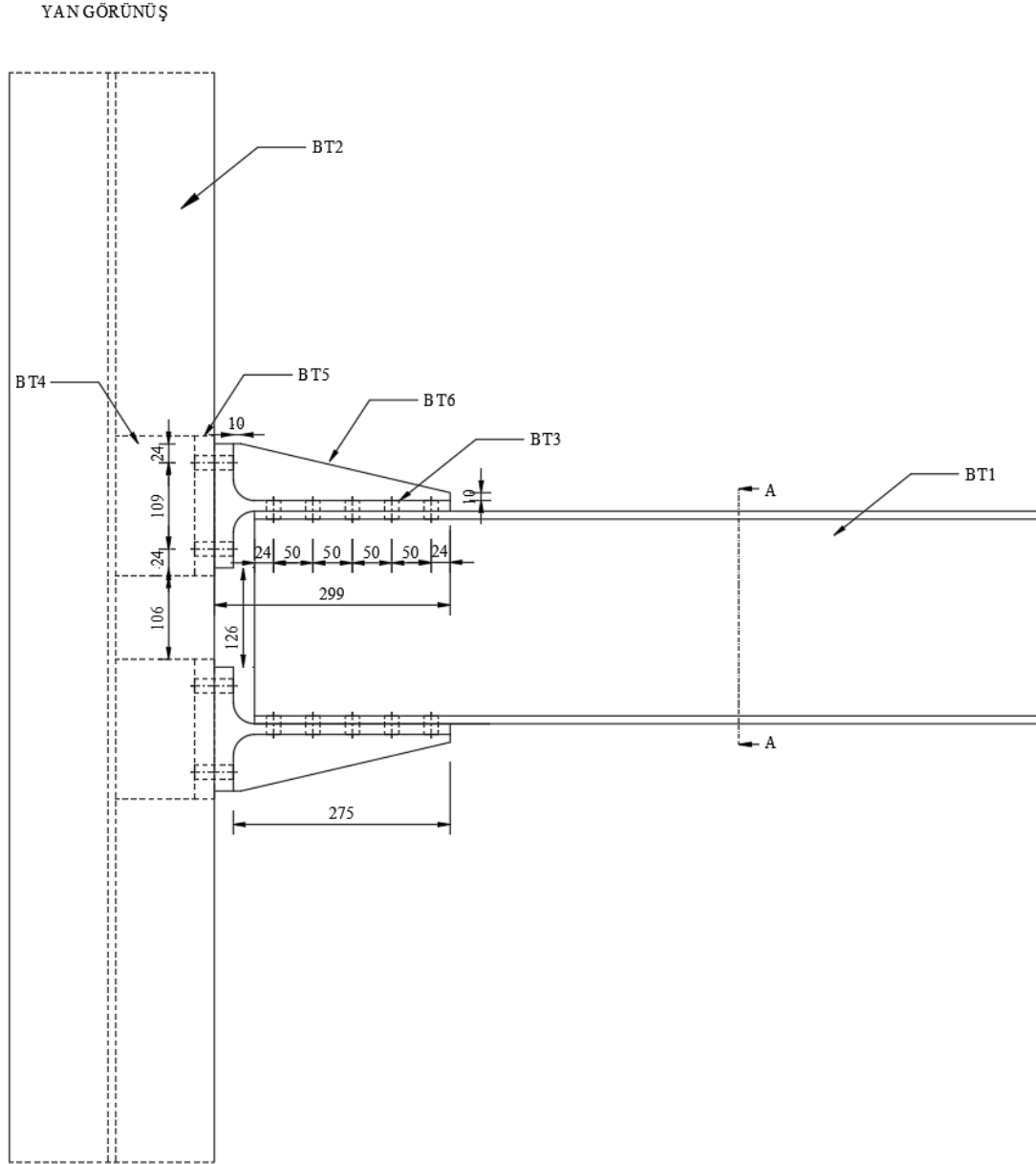
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.101 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1,0 \quad (4.101)$$

Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

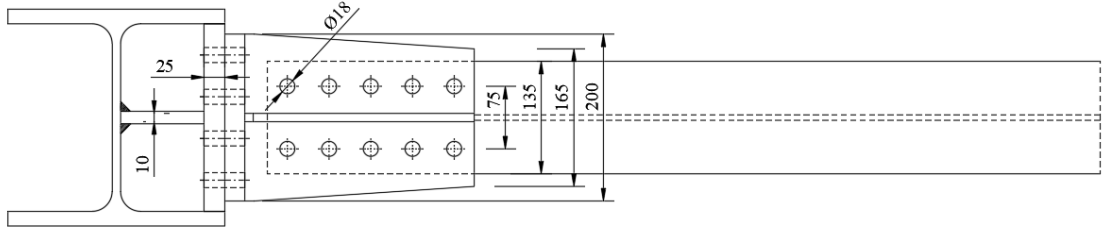
Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek D’de sunulmuştur.

Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



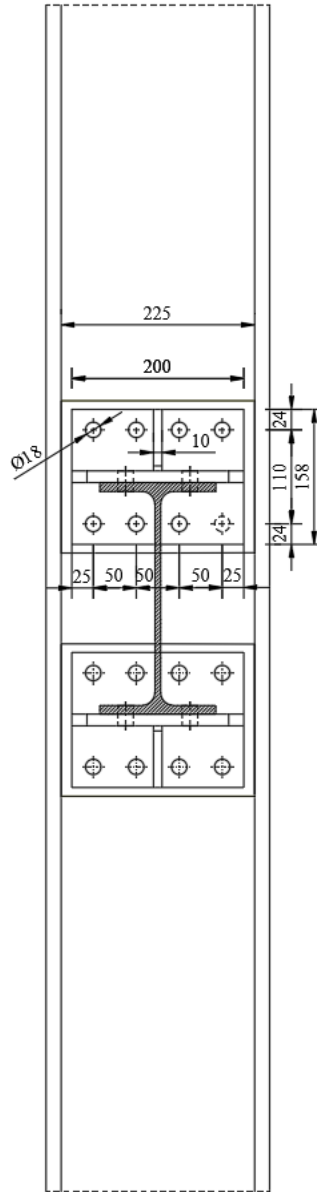
Şekil 4.25 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.

PLAN GÖRÜNÜŞÜ



Şekil 4.26 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.

KESİT A-A



Şekil 4.27 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A enkesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.10’da detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.10 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş, kolon ve T-parça.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
BT-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
BT-2	Kolon	HE 260 B	S355	1
BT-3	T-Parça	HE 400 B	S355	2

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.11’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.11 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.

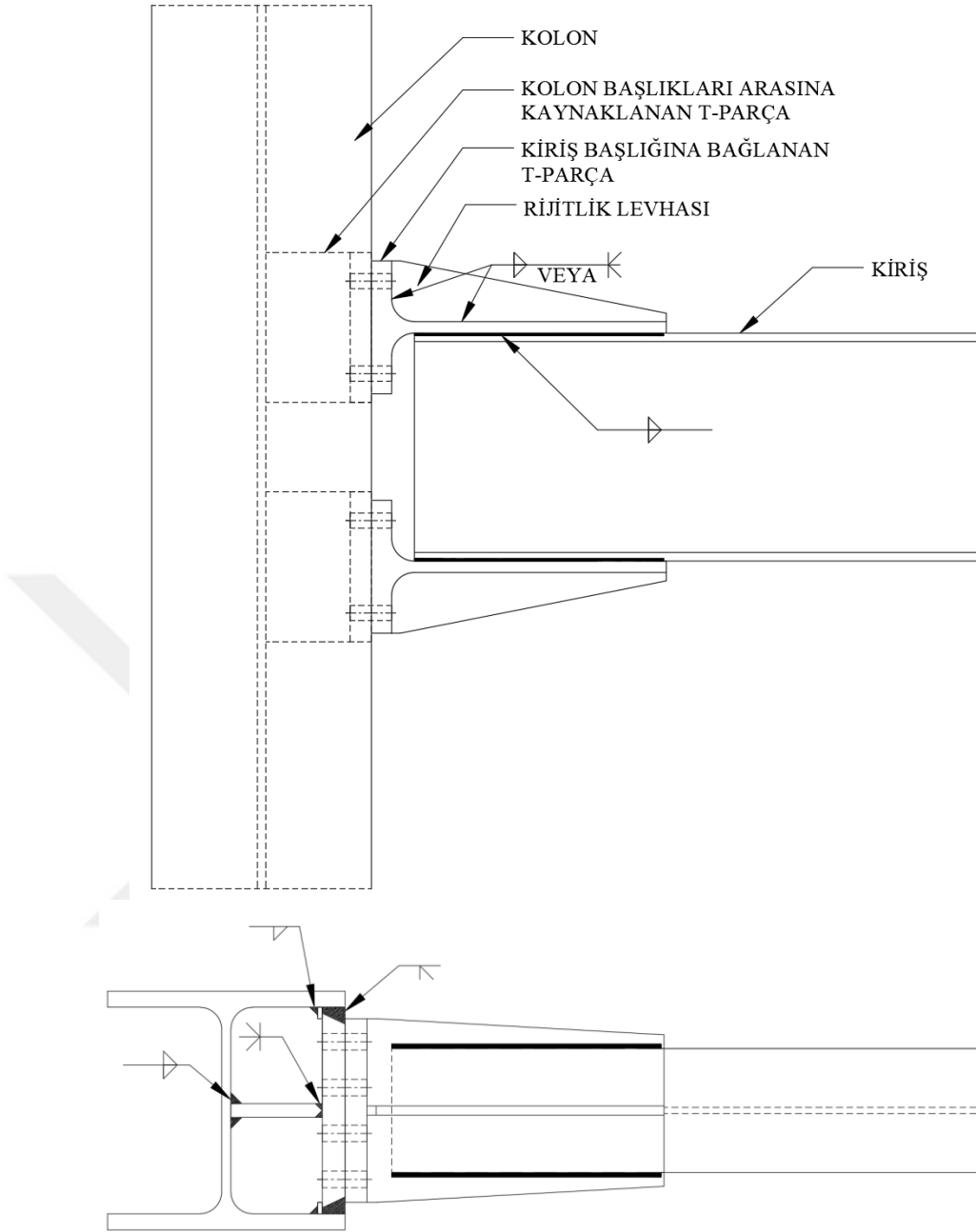
Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
BT-4	Gövde bağlantı levhası	S355	100	178	15	2
BT-5	Başlık bağlantı levhası	S355	225	178	25	2
BT-6	T-parça rijitlik levhası	S355	325	72	10	2

4.5.5 Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde açıklanmıştır.

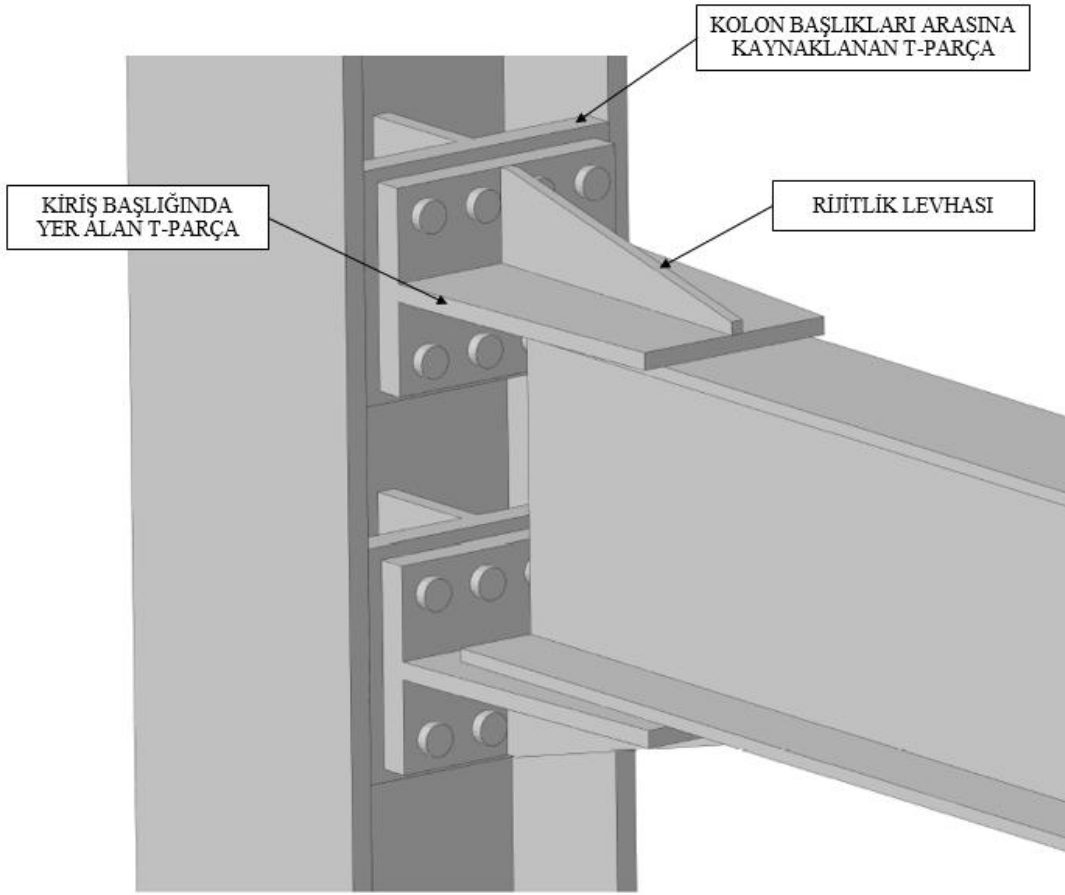
4.5.5.1 Birleşime genel bakış ve uygulama detayları

Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 358-22 Bölüm 13’te bulonlu T-parçalı I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu başlık levhalı kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılacaktır (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin elemanları.

Birleşimde 2 (iki) tipte T-parça kullanılacaktır. Kolon gövdesi ve başlıkları arasında yer alan T-parçalar, levhaların birbirine tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlandığı yapma enkesitler olarak teşkil edilecektir. Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ise haddelenmiş profillerden kesilerek elde edilecektir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 : Birleşimdeki rijitlik levhası ve T-parçalar.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçaların kolona bağlantısı, yapma enkesitler kullanılarak oluşturulan T-parçalar vasıtasıyla gerçekleştirilecektir. Bu T-parçaların başlık levhalarının kenarları, kolon başlıklarının iç yüzeyinde yer alan uç kısmına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmaktadır. T-parçaların gövde levhaları ise kolon gövdesine iki taraflı köşe kaynak uygulanarak bağlanacaktır.

Montaj işleminin ilk adımında, kolon gövdesi ve başlıkları arasında yer alan T-parçalar, levhaların birbirine tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanmasıyla oluşturulacaktır ve bu T-parçaların gövdeleri kolon gövdesine çift taraflı köşe kaynak uygulanarak kaynaklanacaktır. Sonraki adımda, T-parçaların başlık levhaları kolon başlıklarının uç kısımlara altlık levhaları yardımıyla tam penetrasyonlu küt kaynak yöntemi uygulanarak bağlanacaktır. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile T-parçaların başlıklarına bağlanacaktır. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır.

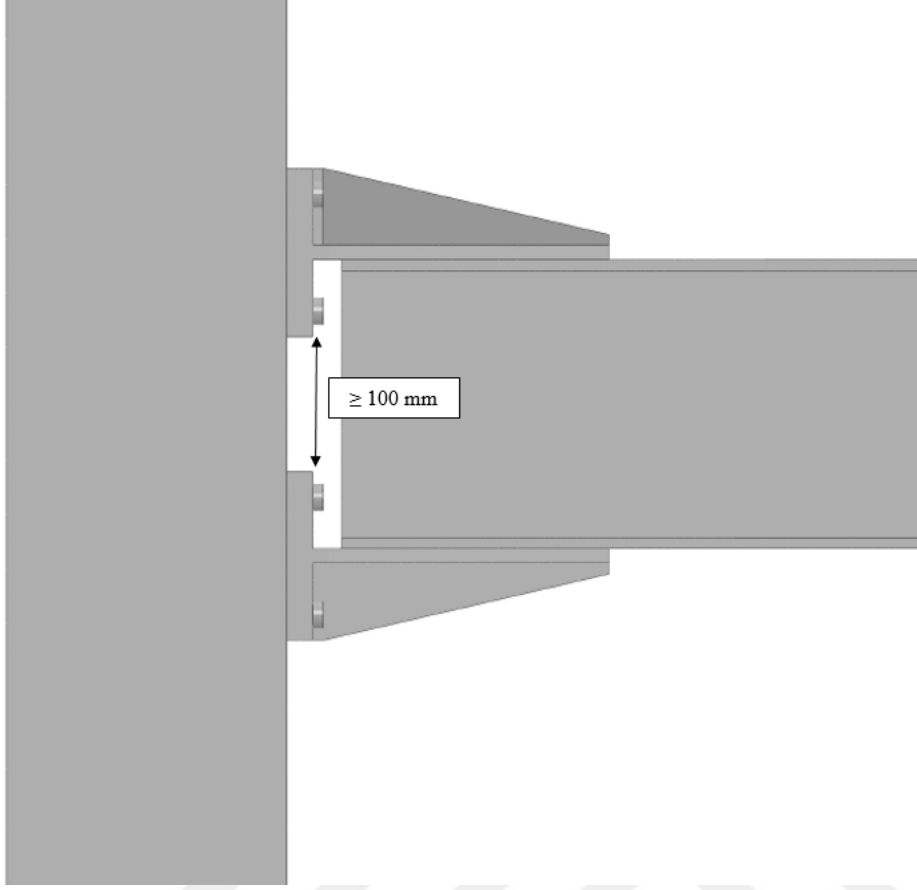
Kiriş başlığındaki T-parçaların başlıkları, başlık ve gövdeleri arasına kaynaklanan levhalar vasıtasıyla rijitleştirilmektedir. Rijitlik levhasının birleşiminde tam penetrasyonlu küt kaynak veya köşe kaynak kullanılacaktır.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ile kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçaların başlık levhaları arasındaki bağlantı bulonlu birleşimle; kiriş başlığına birleşen T-parçaların gövdeleri ile kiriş başlıkları arasındaki bağlantı köşe kaynak uygulamasıyla teşkil edilecektir.

4.5.5.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

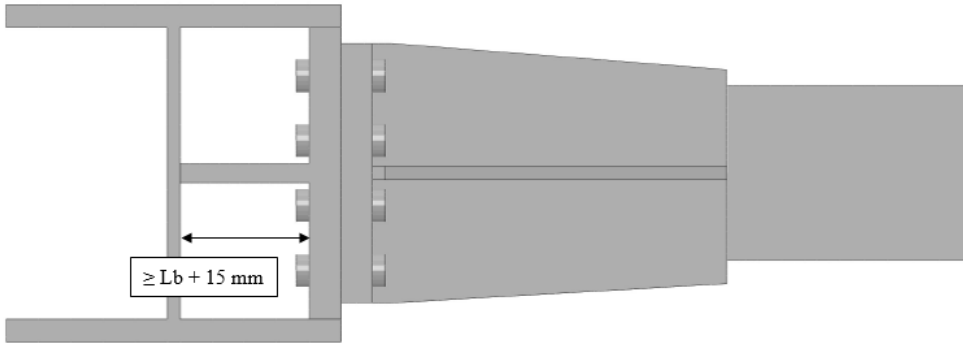
I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, kesme kuvveti; T-parçaların başlıkları arasına yerleştirilen, kolon başlığına kaynaklı ve kiriş gövdesine bulonlarla bağlanan bir kayma levhası aracılığıyla aktarılır. Ancak, I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı kaynaklı T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, T-parçaların başlıkları arasında yeterli mesafe sağlanamadığından, kesme kuvvetinin aktarımında kayma levhası kullanılmayacaktır. Bu durumda, kesme kuvvetinin; eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı bulonlar üzerinden aktarılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, T-parçaların başlıklarının ve ilgili bulonların kesme kuvveti etkisi altındaki dayanımlarının belirlenmesinde, AISC 358-22 Bölüm 6'da tanımlanan, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolon başlığına bağlandığı tam dayanımlı, bulonlu alın levhalı birleşimlerin basınç bölgesine ait sınır durumları esas alınacaktır. Bu sınır durumlar; T-parçaların başlıklarındaki bulon deliklerinde ezilme ile bulonlarda kesme etkisi altında oluşan kırılma sınır durumlarını kapsamaktadır.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalar ile kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçaların başlık levhaları arasındaki bağlantı, bulonlu birleşimle teşkil edilecektir. Bu birleşimde, bulonların montajının yapılabilmesi için T-parça başlıklarının yatay kenarları arasında yeterli bir mesafe bırakılmalı; böylece yüksekliği bu mesafeyle sınırlanan boşluktan bulonların geçirilmesi mümkün olmalıdır. Montaj işlemi işçiler tarafından elle gerçekleştirileceğinden, söz konusu mesafenin bir kişinin elinin rahatça erişimine olanak tanıyacak büyüklükte olması gerekmektedir. Bu nedenle, bırakılacak mesafenin en az 100 mm olması uygun görülmüştür (Şekil 4.30).



Şekil 4.30 : T-parçaların başlıklarının yatay kenarları arasındaki minimum mesafe.

Buna ek olarak, bulonların boşluktan geçirildikten sonra başlık levhalarındaki deliklere sorunsuzca hizalanarak yerleştirilebilmesi için, kolon gövdesi ile kolon başlıklarına kaynaklanan T-parça başlıklarının iç yüzeyleri arasındaki mesafe, kullanılacak bulonun toplam uzunluğundan en az 15 mm daha büyük olacak şekilde belirlenmelidir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 : T-parçaların başlık iç yüzeyi ile kolon gövdesi yüzeyi arasındaki minimum mesafe.

Kiriş başlıklarına birleşen T-parçaların haddelenmiş profillerden kesilerek elde edilmesi gerekmektedir.

TBDY 2018 Ek 9B.2.7(b) uyarınca, rijitlik levhası kalınlığının 10 mm'den az olması durumunda, rijitlik levhasının dayanımına eşit dayanıma sahip köşe kaynak kullanılmasına izin verilebilir.

Bu birleşimin boyutlandırılmasında esas alınacak değişkenler AISC 358-22 Bölüm 13.2'de belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılabilmesi için AISC 358-22 Bölüm 13'teki tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir. Söz konusu esaslar, plastik mafsalin kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin uç bölgesinde, kiriş enkesitinde oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları prensibine dayanmaktadır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi denklem 4.102 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.102)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

2. Kiriş başlığı ile T-parçanın gövdesinin birleşiminde kayma etkisinde dayanımın belirlenmesi

Çelik malzeme sınıfı, birleşim için uygulama sınırları ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.2'de tanımlanan köşe kaynak uygulama sınırları göz önünde tutularak, kiriş

başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin kalınlığı öngörülür. Ardından, esas metal ve kaynak metalinin karakteristik dayanımları belirlenerek birleşimin kayma etkisindeki dayanımı hesaplanır (4.103).

$$\phi R_n = \min \begin{bmatrix} \phi_n 0,60 F_E n_w a_w \\ \phi_n 0,60 F_{ub} n_w t_{tfb} \\ \phi_n 0,60 F_{ut} n_w t_{st} \end{bmatrix} \quad (4.103)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{ub} : Kiriş malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_{ut} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa

t_{st} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.

t_{tfb} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

n_w : Köşe kaynak sayısı.

a_w : Köşe kaynak etkin kalınlığı, mm.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

3. Kiriş başlığı ile T-parça gövdesinin birleşiminde kaynak uzunluğunun tahmin edilmesi

Başlangıçta birleşim detayının kesin olarak bilinmemesi ve buna bağlı olarak plastik mafsallın yerinin belli olmaması nedeniyle, denklem 4.104 kullanılarak etkin köşe kaynak uzunluğu tahmin edilir.

$$L_w \geq \frac{1,25 M_{pr}}{d_b \phi R_n} \quad (4.104)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_{pr} : Plastik mafsall bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi, kNm

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

Birleşimin tasarımında dikkate alınacak eğilme momenti değeri kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyindeki eğilme momenti ($M_f = M_{uc}$)

değeridir. Bu değerin plastik mafsaldaki kesme kuvvetinin etkisi de göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda M_f değeri, M_{pr} değerinden daha büyük olacağı için, M_f değerinin tahmin edilebilmesi amacıyla, denklem 4.104'teki 1,25 katsayısının kullanılması öngörülmüştür (AISC 358-22).

4. Plastik mafsall yerinin belirlenmesi

Plastik mafsallın kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı denklem 4.105 ile belirlenir.

$$l_h = s_2 + L_w \quad (4.105)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_2 : Kiriş ucu ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.

L_w : Kiriş başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi arasındaki bağlantıda kullanılan etkin köşe kaynak uzunluğu, mm.

5. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak değerlendirilir. Bu hesaplama, plastik mafsall konumundaki momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

6. Kolona başlıkları arasında ve kiriş başlıklarında yer alan T-parçaların başlıkları arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, plastik mafsall bölgesinde beklenen eğilme momenti kapasitesi M_{pr} , gerekli kesme kuvveti dayanımı V_h ve plastik mafsall konumu ile söz konusu yüzey arasındaki uzaklık l_h dikkate alınarak, denklem 4.106 ile hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_h l_h \quad (4.106)$$

7. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvetin belirlenmesi

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet; eğilme momentinin çekme ve basınç kuvveti bileşenleri olarak denklem 4.107 ile belirlenir.

$$F_{pr} = \frac{M_f}{1,05d_b} \quad (4.107)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

F_{pr} değeri, kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı M_f , üst ve alt T-parçaların gövdelerinin merkezleri arasındaki uzaklığa bölünerek hesaplanmaktadır. Bu tasarım adımında, T-parçaların gövde kalınlıkları henüz belirlenmediğinden, bu uzaklık $1,05d_b$ olarak tahmin edilmektedir. T-parçaların gövde kalınlıkları belirlendikten sonra bu öngörülen kuvvet yeniden hesaplanacaktır.

8. Birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlığının belirlenmesi

Birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlığı AISC 358-22 Bölüm 6'da I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun başlığına bağlandığı tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşimler için tanımlanan denklem 4.108 ile belirlenecektir.

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) \quad (4.108)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.

Rijitlik levhasında yerel burkulmanın önlenmesi için denklem 4.109 ile verilen kriterin sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}}\right)} \quad (4.109)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

h_{st} : Rijitlik levhasının yüksekliği, mm.

t_s : Rijitlik levhasının kalınlığı, mm.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

F_{ys} : Rijitlik levhası malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

9. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde boyutlarının belirlenmesi

Kiriş başlığındaki T-parçanın gövde boyutları, çekme kuvveti etkisinde kayıpsız enkesit alanında akma ve basınç kuvveti etkisinde ise kayıpsız enkesit alanında akma veya burkulma sınır durumlarına göre belirlenir.

Köşe kaynakların başlangıcındaki T-parça gövdesinin kayıpsız enkesit alanı, T-parça başlık genişliği (W_T) ve gövde kalınlığı (t_{st}) göz önünde bulundurularak belirlenir. W_T değeri, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki birleşimde yer alan bulonlar arasındaki yatay uzaklığa bağlı olarak belirlenir. Genel bir yaklaşımla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği, kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığına göre bir miktar daha dar olacağı varsayılabilir.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde kalınlığının belirlenmesinde, T-parçanın başlık genişliği ile Whitmore genişliği arasındaki küçük olan değer esas alınır. Eğer T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse, genişlik doğrudan T-parçanın başlık genişliği (W_T) olarak alınır. Ancak daralan bir enkesite söz konusuysa, bu durumda genişlik, kesitin geometrisine bağlı olarak belirlenir.

Akma sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı t_{st} , denklem 4.110 ile belirlenir.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{W_T \phi_d F_{yt}} \quad (4.110)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yt} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

W_T : T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği; daralan bir enkesite sahip köşe kaynak başlangıcında T-parçanın gövde genişliği.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinde basınç burkulması sınır durumu, denklem 4.111'de tanımlanan koşulun sağlanmasıyla önlenir.

$$t_{st} \geq \frac{s_2 - t_{ft}}{9,60} \quad (4.111)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

s_2 : Kiriş ucu ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyi arasındaki uzaklık, mm.

t_{ft} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

10. Çekme kuvveti etkisindeki bulonların çapının belirlenmesi

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhası ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık levhasının birleşiminde kullanılacak bulonların minimum çapı denklem 4.112 ile belirlenir.

Denklem 4.112, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık bölgelerinde kaldırma etkisinin (prying action) oluşmadığı varsayımıyla, çekme bulonları için gerekli minimum çapın tahminine olanak sağlamaktadır. T-parçanın başlığında meydana gelebilecek kaldırma etkisinin düzeyine bağlı olarak, daha büyük çapta bulon kullanımına ihtiyaç duyulabilir. Ayrıca, bu bölgede kaldırma etkisine bağlı olarak sünek bir deformasyon mekanizmasının gelişimine olanak tanımak amacıyla,

tasarımda daha büyük çaplı bulonların tercih edilmesi de uygun bir yaklaşım olabilir (Swanson, 2002).

$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4F_{pr}}{n_{tb}\phi_n\pi F_{nt}}} \quad (4.112)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

11. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının boyutlandırılması

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği b_{ft} , denklem 4.113'teki koşulu sağlamalıdır. b_{ft} değeri, kolon başlıklarının iç yüzeyleri arasındaki uzaklığa eşit olarak alınmalıdır.

$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a \quad (4.113)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

b : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezi ile gövdesindeki eğri bölgenin başlangıcı arasındaki uzaklık, mm.

g_{tb} : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezleri arasındaki yatay uzaklık, mm.

d_{tb} : Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın birleşiminde kullanılacak bulonların çapı, mm.

a değeri denklem 4.114 ile hesaplanır.

$$1,5d_{tb} \leq 1,25b \quad (4.114)$$

Bulonların çekme dayanımı $\phi_r F_{nt}$ denklem 4.115 ile hesaplanır.

$$\phi_{r_{nt}} = \phi_n A_{tb} F_{nt} \quad (4.115)$$

Buradaki terimler şu şekilde açıklanmıştır:

A_{tb} : Çekme kuvveti etkisi altındaki bulonun kayıpsız enkesit alanı, mm².

F_{nt} : Bulon malzemesinin karakteristik çekme gerilmesi dayanımı, MPa.

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının gerekli dayanımı T_{req} denklem 4.116 ile hesaplanır.

$$T_{req} = \frac{F_{pr}}{n_{tb}} \quad (4.116)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{pr} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kN.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

Karma göçme modu (Mixed-mode failure), hem T-parçanın başlığında akmanın meydana gelmesini hem de bulonlarda hasar oluşmasını kapsayan, her iki mekanizmanın birlikte etkili olduğu bir hasar türü olarak tanımlanmaktadır. Tasarımda genellikle belirleyici hasar modu olarak bu durumun gerçekleşeceği varsayımıyla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının minimum kalınlığı (t_{ft}), denklem 4.117 ile hesaplanacaktır.

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{T_{req}(a' + b') - \phi_{r_{nt}} a'}{\phi_d F_{yt} p}} \quad (4.117)$$

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$b' = b - \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

$$a = 1,5d_{tb} \leq 1,25b$$

b : T-parçanın başlığındaki bulonların merkezi ile gövdesindeki eğri bölgenin başlangıcı arasındaki uzaklık, mm.

d_{tb} : Kiriş başlığında yer alan T-parça ile kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın birleşiminde kullanılacak bulonların çapı, mm.

W_T : T-parçanın gövdesi daralan bir enkesite sahip değilse kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği; daralan bir enkesite sahip ise ilk bulonların hizasında T-parçanın gövde genişliği.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

ϕr_{nt} : Bir bulonun çekme dayanımı, MPa.

T_{req} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının gerekli dayanımı, kN.

F_{yt} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

Bazı durumlarda, denklem 4.117'de yer alan ifadenin kök içerisindeki terimi negatif bir değer olabilir ve bu durum, fiziksel olarak anlamlı olmayan bir sonuca neden olabilir. Bu gibi durumlarda kullanılacak alternatif hesap yöntemi, denklem 4.118'de belirtilmektedir.

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{\phi r_{nt} a' b'}{\phi_d F_{yt} p [a' + \delta(a' + b')]}} \quad (4.118)$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

d_{tht} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığındaki çekme kuvveti etkisindeki bulonların delik çapları, mm.

Tüm durumlar için, kaldırma etkisini (prying action) ortadan kaldırmak üzere gerekli minimum başlık kalınlığı ($t_{ft,crit}$) denklem 4.119 ile hesaplanabilir

$$t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4\phi r_{nt} b'}{\phi_d F_{yt} p}} \quad (4.119)$$

12. Kiriş başlığında yer alan T-parça için uygun H-enkesitli profilin belirlenmesi

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın, hangi H-enkesitli çelik profilden kesilerek oluşturulacağı, aşağıdaki hususlara bağlı olarak belirlenmelidir:

- Kiriş ucu ile kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhasının dış yüzeyi arasındaki uzaklık (s_2) ile, 5. adımda hesaplanan kiriş başlıkları ile Kiriş başlığı ile kiriş başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi arasındaki bağlantıda kullanılan etkin köşe kaynak uzunluğu (L_w) dikkate alınarak, gerekli minimum H-enkesitli profil yüksekliğinin belirlenmesi gerekmektedir.
- H-enkesitli profilin gövde kalınlığı 8.adımda hesaplanır.
- H-enkesitli profilin başlık genişliği (b_{ft}) ve başlık kalınlığı (t_{ft}) 10.adımda hesaplanır.

13. Birleşimin dönme rijitliğinin kontrol edilmesi

Bağlantının başlangıç rijitliği, Swanson (1999) tarafından önerilen rijitlik modeline dayanarak hesaplanmakta ve tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak sınıflandırılabilmesi için gerekli minimum rijitlik değeri olan $18EI_{kiriş}/L_o$ ile karşılaştırılmaktadır. Kirişin tüm elastik moment kapasitesini geliştirecek şekilde tasarlanan çoğu bağlantının bu rijitlik kriterini sağladığı ve bu nedenle tam rijit olarak kabul edilebileceği varsayılır. Ancak, AISC 358-22'de de belirtildiği üzere, T-parçalı birleşimler için bu kontrolün yapılması yine de zorunludur. Birleşimin tam rijit olarak sınıflandırılabilmesi için, denklem 4.120 ile tanımlanan koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$K_i \geq \frac{18EI_{kiriş}}{L_o} \quad (4.120)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

$I_{kiriş}$: Kirişin kuvvetli eksen etrafında atalet momenti, mm⁴.

L_o : Kirişin kolonların merkezleri arasındaki teorik açıklığı, mm.

$$K_i = \frac{d_b^2 K_{ten} K_{comp}}{K_{ten} + K_{comp}}$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{K_{flange}} + \frac{1}{K_{stem}} \right)^{-1}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{K_{stem}} \right)^{-1}$$

$$K_{flange} = \frac{12n_{tb}EI_{ft}(a'\beta_a + 3b'\beta_b)}{b'^3\beta_b(4a'\beta_a + 3b'\beta_b)}$$

$$K_{stem} = \frac{t_{st}E(W_T - b_{fb})^2}{L_{stem} \left[(W_T - b_{fb}) + b_{fb} \ln \left(\frac{b_{fb}}{W_T} \right) \right]}$$

L_{stem} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde uzunluğu, mm.

n_{tb} : Çekme kuvveti etkisindeki bulon sayısı.

$$I_{ft} = \frac{pt_{ft}^3}{12}$$

ϕ_n : Sünek olmayan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

α = 1,00, 8.8 sınıfı bulonlar için.

= 0,88, 10.9 sınıfı bulonlar için.

$$\beta_a = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}a'^2}$$

$$\beta_b = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}b'^2}$$

G : Yapısal çelik malzemesinin kayma modülü, MPa.

14. Kiriş başlığında yer alan T-parçaların gövdelerine etki eden kuvvetin hesaplanması

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı (M_f) ve kiriş başlığında yer alan T-parçanın belirlenen gövde kalınlığı kullanılarak kiriş başlığında

yer alan T-parçanın gövdesine etki eden gerçek başlık kuvveti (F_f) denklem 4.121 ile hesaplanacaktır.

$$F_f = \frac{M_f}{d_b + t_{st}} \quad (4.121)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

M_f : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı, kNm.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{st} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm

15. Kiriş başlıkları ile T-parçaların birleşiminde kullanılan köşe kaynakların dayanımının yeniden kontrol edilmesi

T-parçanın gövdesi ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak köşe kaynakların dayanımı, gerçek başlık kuvveti (F_f) dikkate alınarak kontrol edilir. Adım 2’de hesaplanan ϕR_n değeri kullanılarak, Adım 3’te öngörülen kiriş başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi arasındaki bağlantıda kullanılan köşe kaynağın uzunluğunun (L_w) gerçek başlık kuvvetini karşılamada yeterli olup olmadığı doğrulanmalıdır (4.122).

$$\phi R_n \geq F_f \quad (4.122)$$

16. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövde dayanımının yeniden kontrol edilmesi

T-parçanın gövdesinin gerçek başlık kuvvetine karşı yeterli dayanıma sahip olup olmadığını değerlendirmek için; kayıpsız enkesit alanında akma ve eğilmeli burkulma dayanımları kontrol edilmelidir (4.123).

$$\phi R_n \geq F_f \quad (4.123)$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı denklem 4.124 ile belirlenir.

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st} \quad (4.124)$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma sınır durumuna karşı dayanımı KL/r oranının 25'ten küçük olması halinde denklem 4.125 ile belirlenir.

$$KL/r \leq 25 ; \quad \phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st} \quad (4.125)$$

KL/r oranı denklem 4.126 ile belirlenir.

$$\frac{KL}{r} = \frac{(0,75)(s_2 - t_{ft})}{\sqrt{\frac{W_T t_{st}^3}{12 W_T t_{st}}}} = 2,60 \left(\frac{s_2 - t_{ft}}{t_{st}} \right) \quad (4.126)$$

$KL/r > 25$ olması durumunda, hesaplanan KL/r değeri kullanılarak AISC 360-22 Bölüm E3 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 8.2'de belirtildiği şekilde dayanım katsayısının $\phi = \phi_n$ olduğu kabul edilerek hesaplanacaktır.

17. Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık dayanımının yeniden kontrol edilmesi
T-parçanın başlık dayanımı denklem 4.127 ile hesaplanır.

$$\phi R_n = n_{tb} \phi T \quad (4.127)$$

Denklem 4.127'de belirtilen ϕT değeri, ϕT_1 (plastik başlık mekanizması), ϕT_2 (karma göçme modu) ve ϕT_3 (kaldırma etkisi olmadan çekme etkisindeki bulonun kırılması) değerlerinin en küçüğüdür.

T-parçanın başlığında plastik mekanizma sınır durumu için dayanım denklem 4.128 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_1 = \frac{(1 + \delta)}{4b'} p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2 \quad (4.128)$$

T-parçanın başlığında, önce akma ardından bulonların kırılmasıyla meydana gelen karma göçme modu (mixed-mode failure) sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı denklem 4.129 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_2 = \frac{\phi r_{nt} a'}{a' + b'} + \frac{p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2}{4(a' + b')} \quad (4.129)$$

Çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı denklem 4.130 ile hesaplanacaktır.

$$\phi T_3 = \phi r_{nt} \quad (4.130)$$

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$a = \frac{1}{2} (b_{ft} - g_{tb}) \leq 1,25b$$

$$b' = b - \frac{1}{2} d_{tb}$$

$$b = \frac{1}{2} (g_{tb} - t_{st,eff})$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}}$$

$$t_{st,eff} = k_1 + \frac{t_{st}}{2}$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p}$$

d_{tht} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığındaki çekme kuvveti etkisindeki bulonların delik çapları, mm.

18. Kiriş başlığı ve T-parçanın gövdesinin blok kırılma dayanımının kontrol edilmesi

Blok kırılma sınır durumu, AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2'te tanımlanan şekilde denklem 4.131 ile hesaplanır.

$$R_n = 0,60F_u A_{nv} + U_{bs} F_u A_{nt} \leq 0,60F_y A_{gv} + U_{bs} F_u A_{nt} \quad (4.131)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_{nt} : Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{nv} : Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı, mm².

A_{gv} : Kayma gerilmesi etkisindeki kayıpsız enkesit alanı, mm².

F_u : Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı, MPa.

F_y : Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi, MPa.

U_{bs} : Çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan bir katsayı.

Çekme gerilmeleri yayılışının üniform olduğu yüzeylerde, $U_{bs} = 1,00$; üniform olmadığı yüzeylerde ise $U_{bs} = 0,50$, olarak alınacaktır. Bu hususta ayrıntılı teknik açıklamalar, ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.3'te sunulmaktadır.

Bu tasarım kapsamında, blok kırılma hasarı sünek bir göçme modu olarak kabul edilir ve bu nedenle dayanım katsayısı olarak ϕ_d kullanılmalıdır.

19. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilir (4.132). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5'e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.132)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

Kiriş-kolon birleşiminin gerekli kesme kuvveti dayanımı (V_u), kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımına eşit alınmalıdır.

20. T-parçanın başlığının kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, kesme kuvveti; T-parçaların başlıkları arasına yerleştirilen, kolon başlığına kaynaklı ve kiriş gövdesine bulonlarla bağlanan bir kayma levhası aracılığıyla aktarılır. Ancak, I-enkesitli kirişin, H-enkesitli kolonun zayıf eksenine dik doğrultuda bağlandığı bulonlu T-parçalı moment aktaran birleşimlerde, T-parçaların başlıkları arasında yeterli mesafe sağlanamadığından, kesme kuvvetinin aktarımında kayma levhası kullanılmaz. Bu durumda, kesme kuvvetinin; eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı bulonlar üzerinden aktarılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, T-parçaların ve ilgili bulonların kesme kuvveti etkisi altındaki dayanımlarının belirlenmesinde, AISC 358-22 Bölüm 6'da tanımlanan, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolon başlığına bağlandığı tam dayanımlı, bulonlu alın levhalı birleşimlerin basınç bölgesine ait sınır durumları esas alınacaktır. Bu sınır durumlar; T-parçaların başlıklarındaki bulon deliklerinde ezilme ile bulonlarda kesme etkisi altında oluşan kırılma sınır durumlarını kapsamaktadır.

Bulonların kesme kuvveti dayanımı denklem 4.133 ile hesaplanır.

$$V_u \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b \quad (4.133)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

A_b : Diş açılmamış bulon gövdesi karakteristik enkesit alanı, mm².

n_b : Basınç başlığındaki bulon sayısı.

F_{nv} : Bulon malzemesinin karakteristik kayma gerilmesi dayanımı, MPa.

Basınç etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.3.9 ve AISC 360-22 Bölüm J3 uyarınca denklem 4.134 ile kontrol edilir.

$$V_u \leq \phi_n \sum r_{ni} \quad (4.134)$$

Bu denklemde r_{ni} her bir bulon için denklem 4.135 ile elde edilir.

$$r_{ni} = 1,2l_c t F_u \leq 2,4d_b t F_u \quad (4.135)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_b : Bulonun karakteristik gövde çapı, mm.

l_c : Kuvvet doğrultusundaki delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki veya delik kenarı ile eleman kenarı arasındaki net uzaklık, mm.

F_u : T-parça malzemesinin karakteristik çekme dayanımı, MPa.

t : T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

21. Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın gövde ve başlık kalınlıklarının belirlenmesi

Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın gövde kalınlığı denklem 4.136 ile belirlenecektir.

$$t_{bw} \leq t_{tcw} \quad (4.136)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_{tcw} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın gövde kalınlığı, mm.

Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın başlık kalınlığı denklem 4.137 ile belirlenecektir.

$$t_{ft} \leq t_{tcf} \quad (4.137)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{ft} : Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

t_{tcf} : Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık kalınlığı, mm.

22. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

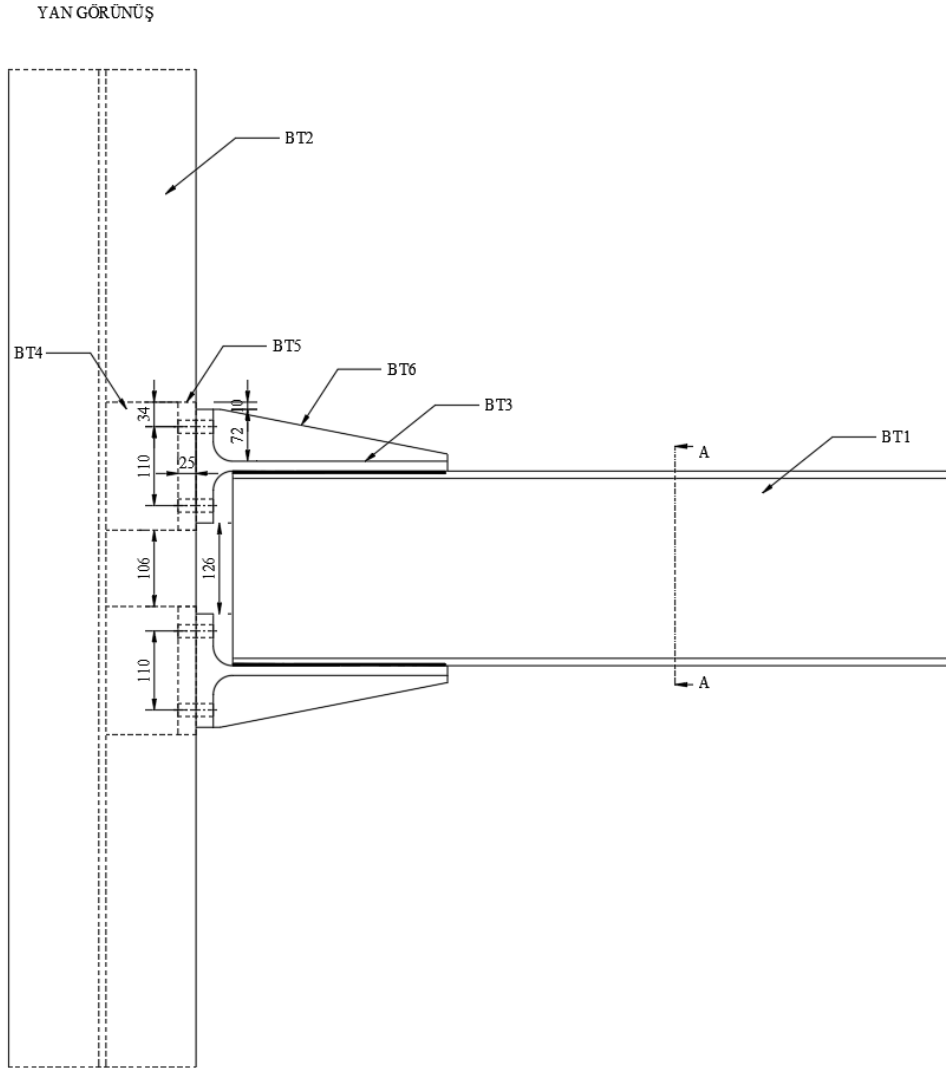
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.138 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1,0 \quad (4.138)$$

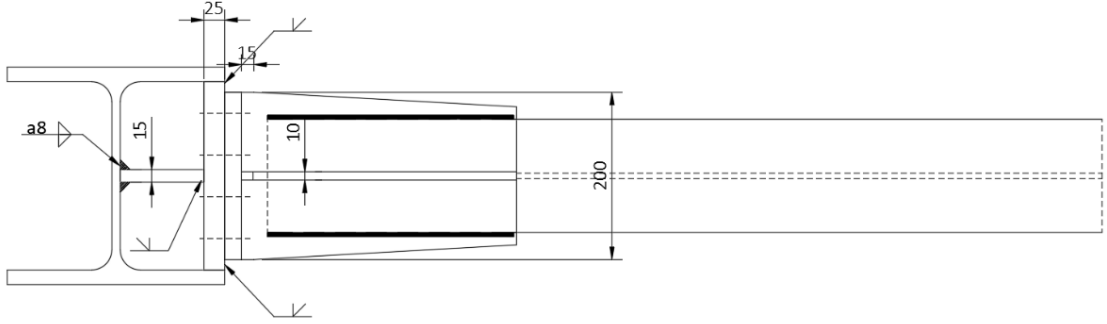
Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek E’de sunulmuştur.

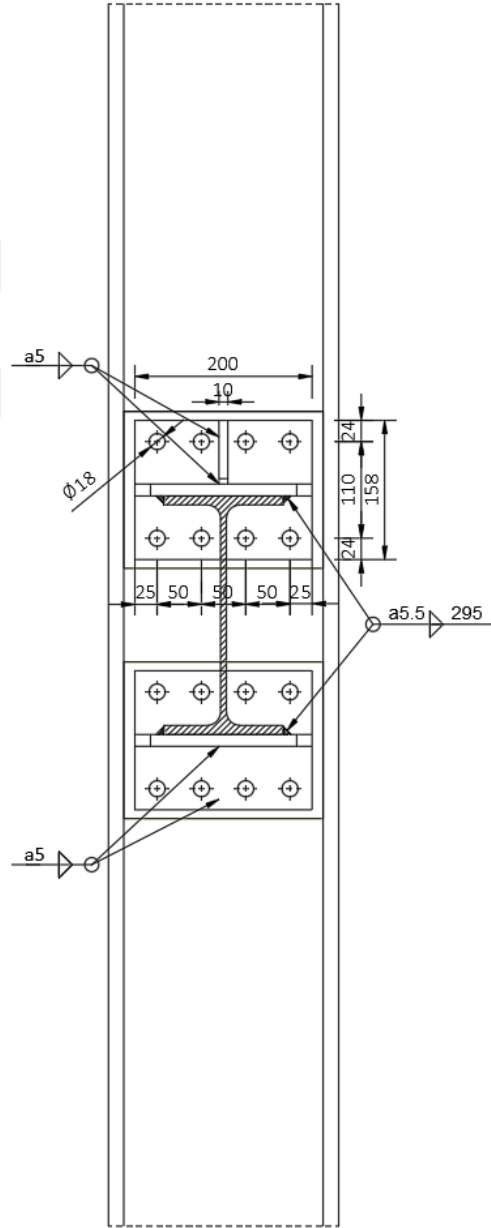
Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’te gösterilmektedir.



Şekil 4.32 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.



Şekil 4.33 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.



Şekil 4.34 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi F-F enkesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.12’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.12 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş, kolon ve T-parça.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
KT-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
KT-2	Kolon	HE 260 B	S355	1
KT-3	T-Parça	HE 400 B	S355	2

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.13’te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.13 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar.

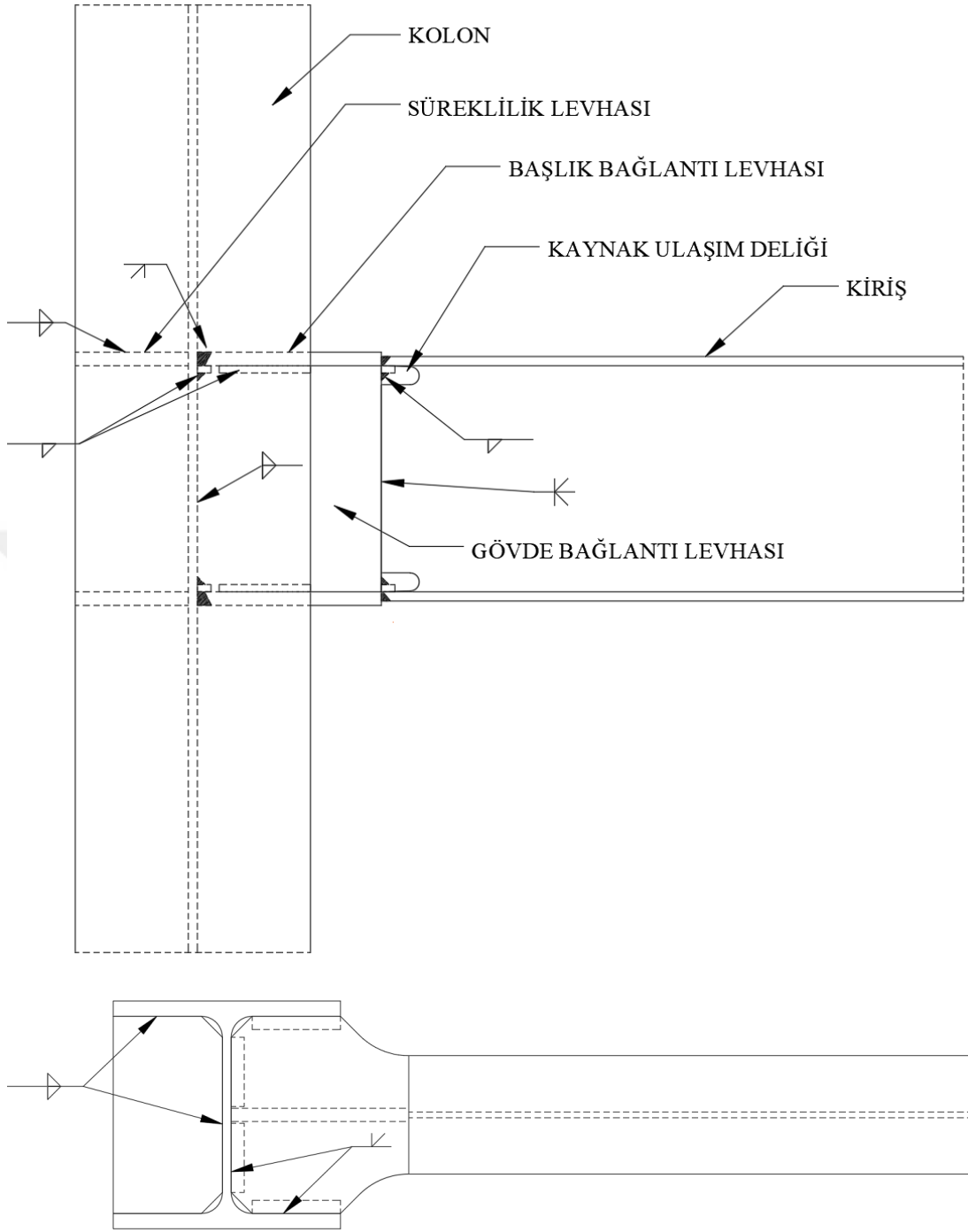
Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
KT-4	Gövde bağlantı levhası	S355	100	178	15	2
KT-5	Başlık bağlantı levhası	S355	225	178	25	2
KT-6	T-parça rijitlik levhası	S355	325	72	10	2

4.5.6 Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi

Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ilişkin genel bilgiler, uygulama detayları, tasarım esasları ve hesap adımları bu bölümde açıklanmıştır.

4.5.6.1 Birleşime genel bakış ve uygulama detayları

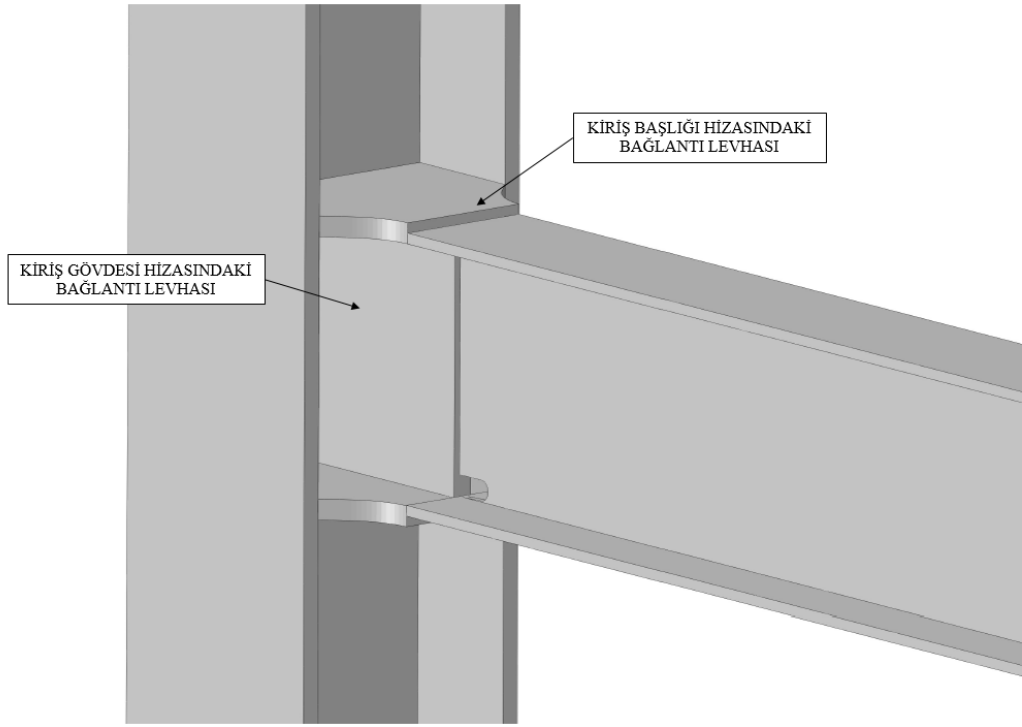
Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, TBDY 2018 Ek 9B.4’te I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı tam penetrasyonlu küt kaynaklı kiriş-kolon birleşiminin tasarım esasları dikkate alınarak ve AISC 358-22 Bölüm 8 gözetilerek boyutlandırılacaktır (Şekil 4.35).



Şekil 4.35 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimindeki elemanlar.

Prototip birleşimde kirişin kolona bağlantısı, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasında teşkil edilen ve kolon gövdesi ile başlıklarına tam penetrasyonlu küt kaynak uygulamasıyla birleşen bağlantı levhaları vasıtasıyla sağlanacaktır (Şekil 4.36). Kiriş başlık ve gövde parçalarının uç enkesitleri de bu levhalara tam penetrasyonlu küt kaynaklı olarak

bağlanacaktır. Birleşimde kesme kuvvetinin aktarımı için kayma levhası kullanılmayacaktır.



Şekil 4.36 : Birleşimdeki bağlantı levhaları.

Bu tür kiriş-kolon birleşimlerinde TBDY 2018 Ek 9B.4'te öngörülen şantiye kaynağından kaçınmak için kiriş elemanının kolona bağlantısında konsol bir kiriş parçasından yararlanılması planlanmıştır. Böylece konsol kiriş elemanının kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarına birleşimi tam penetrasyonlu küt kaynaklar vasıtasıyla atölyede gerçekleştirilerek aynı enkesite sahip diğer kiriş elemanının konsol eleman ucuna bağlantısı bulonlu ek birleşimi ile şantiyede sağlanacaktır.

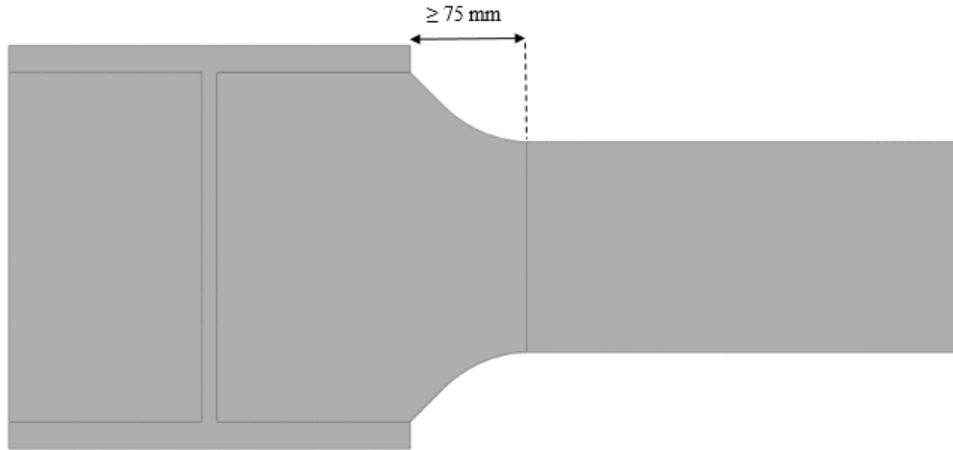
Montaj işleminin ilk adımında, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasına tam penetrasyonlu küt kaynakla bağlanacaktır. Sonraki adımda, kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhası kolon gövdesine çift taraflı köşe kaynak uygulanarak kaynaklanacaktır. Devamında, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhaları ise kolon başlıklarına ve kolon gövdesine tam penetrasyonlu küt kaynaklarla vasıtasıyla altlık levhaları kullanılarak birleştirilecektir. Altlık levhaları 6 mm kaynak kalınlığına sahip sürekli köşe kaynak ile kolon başlığına ve kolon gövdesine birleştirilecektir. Bu köşe kaynağın, küt kaynağın bulunduğu tarafa, tam penetrasyonlu küt kaynağın altında kalacak şekilde uygulanması sağlanacaktır. Kolon

gövdesine uygulanacak kaynak işlemi, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 40 mm uzakta sonlandırılacaktır. Kolon başlığına uygulanacak kaynak işleminin ise, kolon enkesiti boyun bölgesindeki eğrilik bitiş noktalarına en az 15 mm uzakta sonlandırılması sağlanacaktır. Bu işlemin ardından, konsol kiriş elemanının, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarına birleşimi, tam penetrasyonlu küt kaynaklar kullanılarak gerçekleştirilecektir.

4.5.6.2 Birleşimin tasarım esasları ve hesap adımları

Bu başlık altında, tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimine ait tasarım esasları açıklanmış ve kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasına yönelik hesap adımları sunulmuştur.

Driscoll ve diğ. (1983) tarafından I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran kiriş-kolon birleşimleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına doğru minimum 75 mm uzatılması önerilmektedir. Böylece levhaların bir miktar şekil değiştirip uzama deformasyonu yapmasına izin verilmektedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kolon başlıklarının iç kısmına kaynaklı bir şekilde bağlandığında, levhaların kolon başlıklarına dik doğrultudaki deformasyonları sınırlanır, bu nedenle levhaların enine dik doğrultuda ve levha kalınlığı boyunca ek çekme gerilmeleri oluşur. Böyle bir durumun erken gevrek göçme riski oluşturabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde bağlantı levhaları kolon başlığı dışına 75 mm uzayacak şekilde tasarlanacaktır (Şekil 4.37).

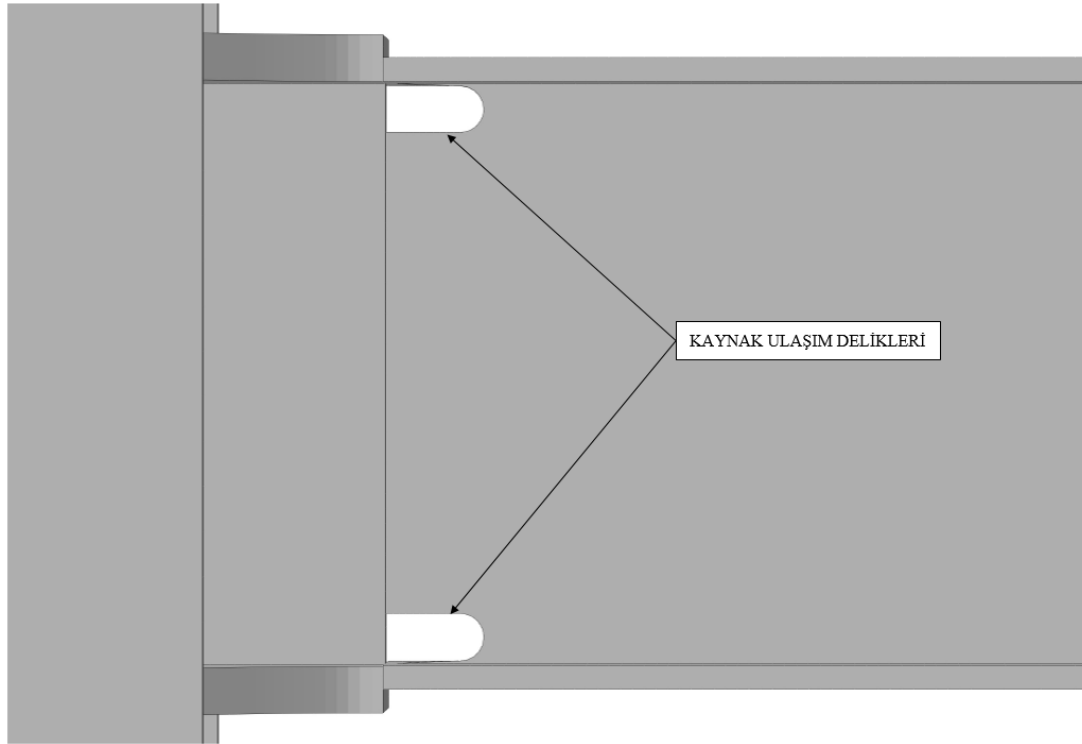


Şekil 4.37 : Bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzatılması.

Bu çalışmalarda kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmının daralan enkesitli olarak teşkil edilmesinin tekrarlı yükler altında daha yüksek süneklik düzeyinin elde edilmesini sağladığı da gösterilmiştir. Bu durum esas alınarak, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmı, kiriş ucuna doğru daralan enkesite sahip olacak şekilde boyutlandırılacaktır.

Konsol kiriş elemanın, bulonlu bindirme levhali ek birleşimin kapasitesi korunmuş bölge dışında kalacak şekilde teşkil edilmesine olanak tanıyacak yeterli uzunlukta olması gerekmektedir.

Konsol kirişin ucunda, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarına yapılacak tam penetrasyonlu küt kaynak işlemi için, ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.1.6'ya uygun olarak kaynak ulaşım delikleri açılacaktır (Şekil 4.38).



Şekil 4.38 : Kaynak ulaşım delikleri.

Süreklilik levhalarının kolon ile bağlantısını sağlayan kaynaklı birleşimin detayları için TBDY 2018 Ek 9B.1.7'de verilen koşullar sağlanacaktır.

Birleşime ait uygulama sınırlarının değerlendirilmesinde esas alınacak değişkenler TBDY 2018 Tablo 9B.3'te belirtildiği gibi ele alınacaktır. Bu birleşim tipinin süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde kullanılabilmesi için TBDY 2018 Tablo 9B.3'te verilen uygulama

sınırları çerçevesinde TBDY 2018 Ek 9B.4'te tanımlanan tasarım esaslarına uyulması gerekmektedir. Bu esaslar, birleşim elemanlarının TBDY 2018 Ek 9B.4.1'e uygun olarak, plastik mafsalın kolon başlığına yakın bölgede oluşmasını sağlayacak yeterli dayanıma sahip olması prensibine dayanmaktadır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Kiriş-kolon birleşiminin boyutlandırılmasında izlenecek hesap adımları

1. Beklenen plastik eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesi

Plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi denklem 4.139 ile elde edilir.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} \quad (4.139)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

W_{pb} : Kirişin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti, mm³.

R_y : Beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı.

C_{pr} : Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve beklenen en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı.

AISC 358-22 Bölüm 8 ve TBDY 2018 Ek 9B.4'te belirtildiği gibi, C_{pr} katsayısı 1,40 olarak alınacaktır.

2. Plastik mafsal yerinin belirlenmesi

Plastik mafsalın kiriş ucunda oluşması beklenir. Bu nedenle plastik mafsalın kiriş ucundan uzaklığı $l_h = 0$ olarak alınır.

3. Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımının hesaplanması

Plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_{uc} = V_h$), plastik mafsalların konumları arasındaki kirişin serbest cisim diyagramı dikkate alınarak değerlendirilir. Bu hesaplama, plastik mafsal konumundaki momentin M_{pr} olduğunu varsayarak kiriş üzerindeki düşey yüklerden gelen etkileri de içermelidir.

4. Kiriş ucunda gerekli eğilme momenti dayanımının hesaplanması

Kiriş ucunda gerekli eğilme momenti, plastik mafsallardaki beklenen eğilme momenti M_{pr} 'ye eşit olacaktır (4.140).

$$M_f = M_{pr} \quad (4.140)$$

5. Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımının kontrol edilmesi

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı (V_d), AISC 360-22 Bölüm G2 veya ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilir (4.141). Kirişin gerekli kesme kuvveti dayanımı ($V_u = V_h$), AISC 358-22 Bölüm 2.5'e uygun şekilde belirlenmelidir.

$$V_u \leq V_d = \phi_d 0,60 F_{yb} A_w C_{v1} \quad (4.141)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

F_{yb} : Kiriş malzemesinin karakteristik akma gerilmesi, MPa.

A_w : Toplam enkesit yüksekliği ile gövde kalınlığının çarpımı olarak hesaplanan kiriş gövdesi alanı, mm².

C_{v1} : Gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı, haddelenmiş I-profillerin gövdeleri için $(d_b/t_{wb}) \leq 2,24\sqrt{E/F_{yb}}$ ise $C_{v1} = 1,00$ olarak alınır.

ϕ_d : Sünek olan sınır durumlar için dayanım katsayısı.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

d_b : Kiriş enkesit yüksekliği, mm.

t_{wb} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

6. Bağlantı levhalarının kalınlıklarının kontrolü

Driscoll ve diğ. (1982) tarafından yapılan çalışmalarda, kirişin başlıkları ve gövdesinin bu bölgedeki bağlantı levhalarına doğrudan tam penetrasyonlu küt kaynak ile bağlandığı birleşimlerde, bağlantı levhalarının kiriş başlıklarından daha kalın olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu durum, gerilme düzensizliği (shear lag) etkisi nedeniyle etkili alanın azalmasının tolere edilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, üretim ve montaj süreçlerinde karşılaşılabilecek hizalama problemlerinin önüne geçilmesi amacıyla, bağlantı levhası ile kiriş başlığı arasındaki kalınlık farkının 3 ila 6 mm arasında tutulmasının uygun olacağı ifade edilmiştir. Tam penetrasyonlu küt kaynaklı

I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinde, bağlantı levhalarının geometrik özellikleri belirlenirken söz konusu hususların dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının kalınlıkları denklem 4.142 ve denklem 4.143 ile belirlenecektir.

$$t_{bf} + 3 \text{ mm} \leq t_{sf} \quad (4.142)$$

$$t_{bw} + 3 \text{ mm} \leq t_{sw} \quad (4.143)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

t_{bf} : Kiriş başlık kalınlığı, mm.

t_{sf} : Kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

t_{bw} : Kiriş gövde kalınlığı, mm.

t_{sw} : Kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı, mm.

Bu denklemlerdeki koşulların sağlanması ile bu bölgede kiriş enkesitinden daha güçlü bir kesit oluşturularak plastik mafsallın kirişte oluşması amaçlanmaktadır.

7. Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu

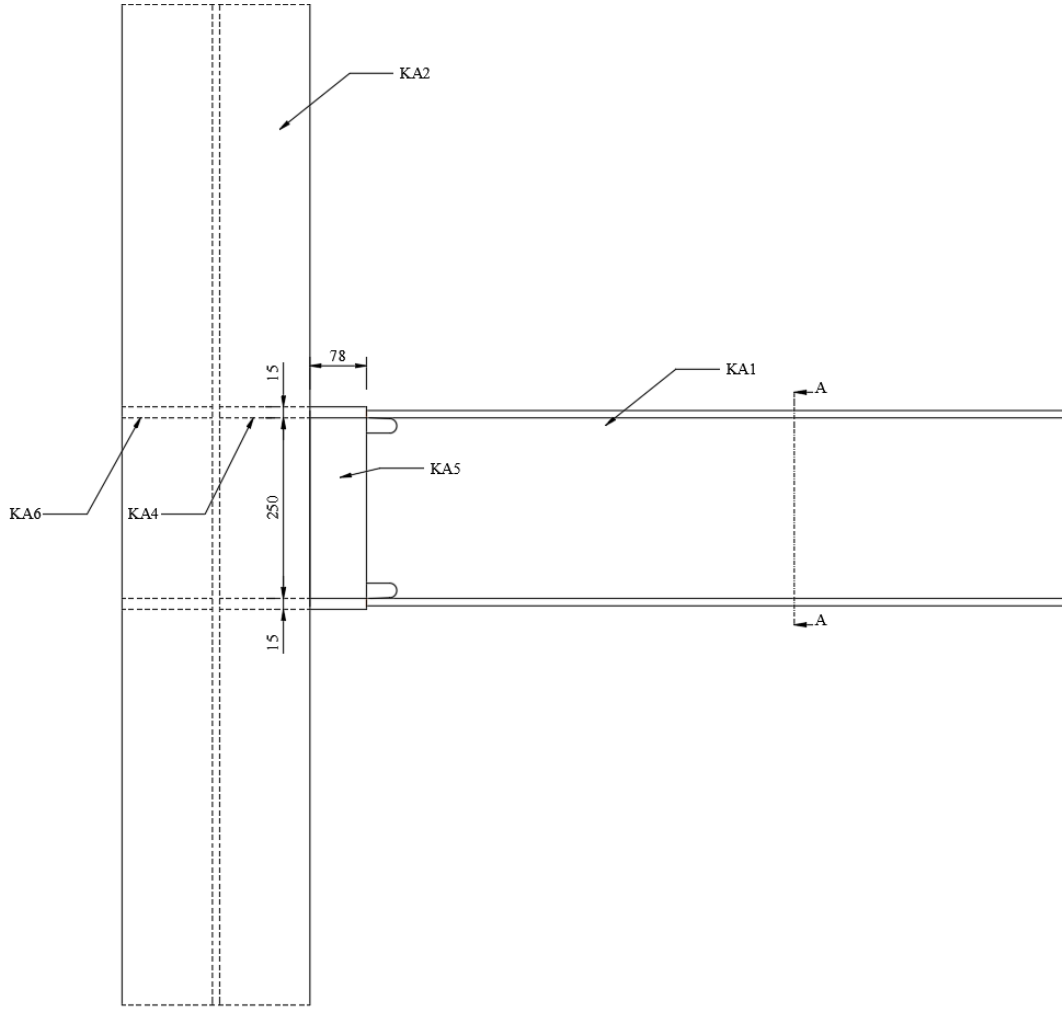
Kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu, denklem 4.144 ile kontrol edilecektir.

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} > 1,0 \quad (4.144)$$

Bu koşulun sağlanmasıyla, plastik mafsalların kiriş uçlarında oluşması ve olası yumuşak kat mekanizması durumunun önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

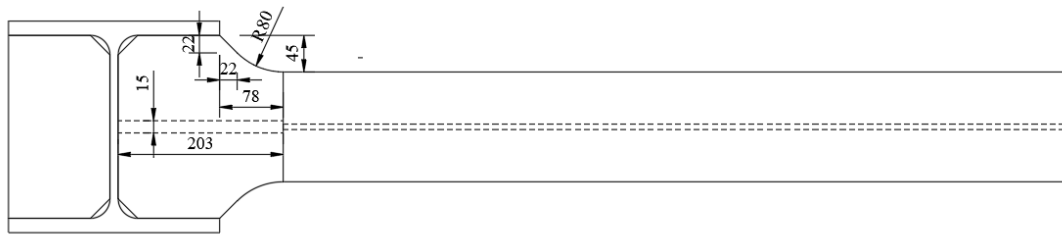
Belirlenen tasarım kriterleri doğrultusunda birleşimlerin boyutlandırması gerçekleştirilmiş olup, ilgili hesaplamaların detayları Ek F’de sunulmuştur.

Tasarım esasları dikkate alınarak boyutlandırılan birleşim Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de gösterilmektedir.



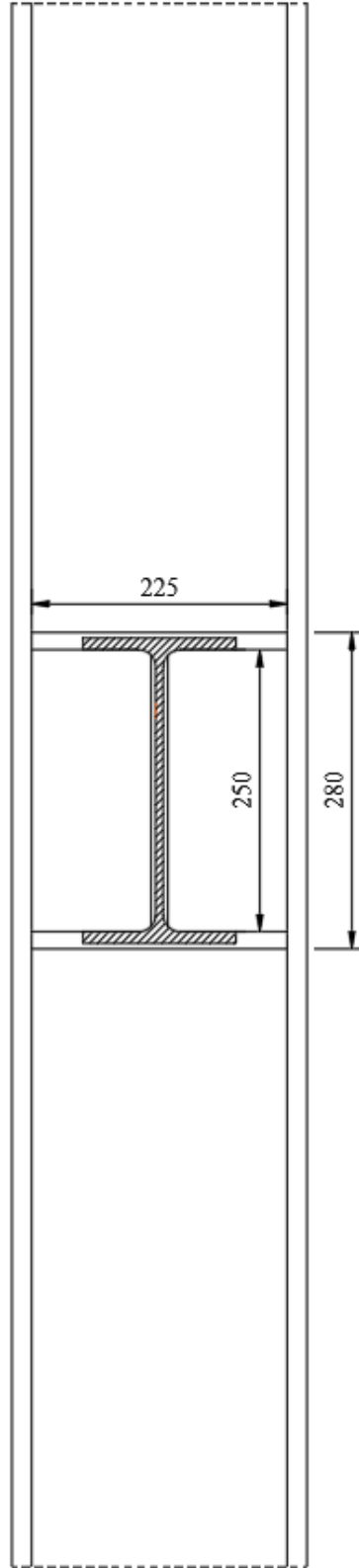
Şekil 4.39 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi yandan görünüşü.

PLAN GÖRÜNÜŞÜ



Şekil 4.40 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi plan görünüşü.

KESİT A-A



Şekil 4.41 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi A-A kesiti.

Birleşimdeki elemanlar Çizelge 4.14'te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.14 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan kiriş ve kolon.

Eleman İsimleri	Yapı Elemanı	Profil	Malzeme Sınıfı	Adet
KA-1	Kiriş	IPE 270	S275	1
KA-2	Kolon	HE 260 B	S355	1

Birleşimde kullanılan levhalar Çizelge 4.15'te detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.15 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminde kullanılan levhalar

Levha İsimleri	Levhalar	Malzeme Sınıfı	b [mm]	h [mm]	t [mm]	Adet
KA-4	Başlık bağlantı levhası	S355	203	225	15	2
KA-5	Gövde bağlantı levhası	S355	250	203	15	1
KA-6	Kolon süreklilik levhası	S355	125	225	15	2

5. SONLU ELEMAN MODELLERİ İÇİN TEMEL ESASLAR

ABAQUS, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı, doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin yapılabilmesini sağlayan gelişmiş bir yazılımdır. Program, çok çeşitli sonlu eleman tipleri ve güçlü çözüm algoritmalarına sahiptir. Gerçekçi simülasyonlar yapabilme yeteneği ile mühendislik ve bilimsel çalışmalarda geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Bu yazılım, karmaşık yapıların analiz edilmesinde, özellikle çelik yapıların doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesinde etkin bir araçtır. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımında kullanılacak olan bazı özellikler ve bu özelliklerin nasıl uygulandığı, ilgili başlıklar altında detaylı olarak ele alınacaktır.

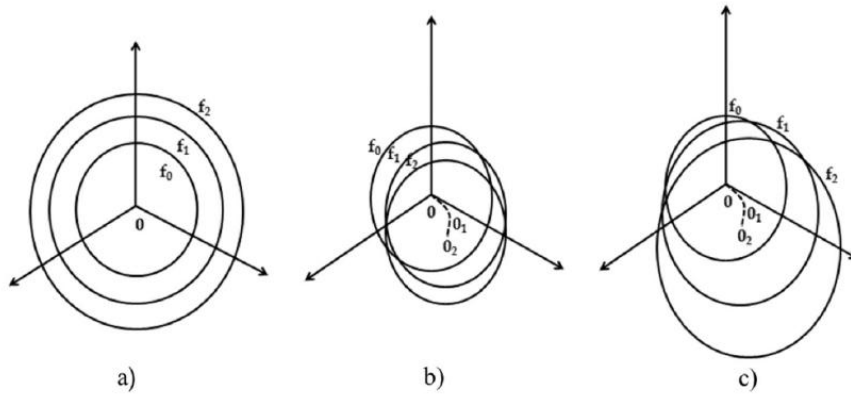
5.1 Malzeme Modeli

Çelik malzemenin davranışı, tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen mühendislik gerilme-şekil değiştirme verilerinin, gerçek gerilme-şekil değiştirme verilerine dönüştürülmesiyle birlikte ABAQUS yazılımında modellenebilir. ABAQUS, malzemenin elastik bölgedeki davranışını, tanımlanan elastisite modülüne göre otomatik olarak oluşturur. Plastik bölgeye ait gerilme ve şekil değiştirme verileri ise genellikle tablo formatında tanımlanır. Bu tanımlama sürecinde, akma gerilmesine karşılık gelen plastik şekil değiştirme değerinin sıfır (0) olarak kabul edilmesi gerekir.

Plastik davranışın doğru bir şekilde modellenebilmesi için çeliğin pekleşme özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. İlk yüklemenin ardından plastik deformasyon meydana geldiğinde, ters yönde uygulanan yüklemelerde akma gerilmesinde bir azalma gözlemlenebilir. Bu durum, literatürde Bauschinger etkisi olarak tanımlanmakta ve kinematik pekleşme modeli kapsamında ele alınmaktadır. Kinematik pekleşme modeline göre, bir eleman dış yükler altında akma gerilmesine ulaştığında, akma yüzeyinin boyutu sabit kalır; ancak gerilme düzleminde yükleme yönünde öteleme göstererek yer değiştirir.

İzotropik pekleşme modelinde, akma yüzeyi ilerleyen plastik deformasyonla birlikte merkezini koruyarak tüm yönlerde eşit şekilde genişler. Bu, akma gerilmesinin tüm

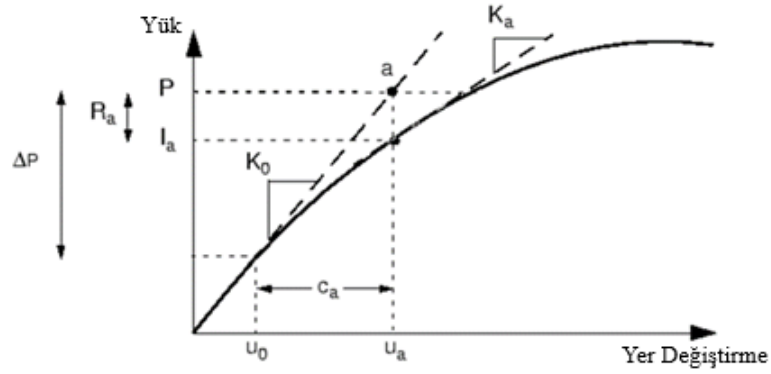
yönlerde artması anlamına gelir ve yükleme geçmişinden bağımsız, simetrik bir pekleşme davranışı sergiler. Ancak bu model, yükleme yönünün tersine çevrilmesi durumunda malzemenin akma gerilmesinde gözlemlenen azalmayı, yani Bauschinger etkisini, temsil edemez. Bu nedenle, izotropik pekleşme modeli, tekrarlı yüklemeler altında anizotropik etkileri ve yükleme yönüne bağlı gerilme asimetrisini dikkate almaz. Bu etkilerin birlikte ele alınabilmesi için, tekrarlı yükler altında, kinematik ve izotropik pekleşme tanımlarının birleşimi olan birleşik pekleşme modelinin uygulanması uygun olacaktır (Kumar ve diğ, 2015). Bu model, akma yüzeyinin hem yer değiştirmesini (kinematik pekleşme) hem de boyutunun genişlemesini (izotropik pekleşme) aynı anda tanımlar. Böylece, tekrarlı yüklemeler altında malzemenin davranışı daha gerçekçi bir şekilde modellenenir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : İzotropik, kinematik ve birleşik pekleşme.

5.2 Doğrusal Olmayan Analiz

ABAQUS, doğrusal olmayan sistemlerin çözümünde Newton-Raphson yöntemini kullanmaktadır (Şekil 5.2). Bu yöntemde, dış yükler sisteme küçük artışlarla uygulanır ve her adımda sistemin dengeye ulaşabilmesi için iç kuvvetlerin dış yüklerle dengelenmesi gerekir. Sayısal çözüm, bu denge koşulu sağlanana kadar iteratif olarak güncellenir.



Şekil 5.2 : Newton Raphson yöntemi.

Başlangıçtaki yük artışında, sistemin başlangıç rijitliği kullanılarak dış yükler altındaki yer değiştirme hesaplanır. Bu yer değiştirmelere karşılık gelen eleman iç kuvvetleri belirlenir ve dış yüklerle karşılaştırılır. Eğer iç ve dış kuvvetler arasındaki fark, ABAQUS programında tanımlanan toleranslar içinde kalıyorsa iterasyon sona erer ve bir sonraki yük artışına geçilir. Ancak bu fark tolerans sınırlarının dışındaysa, güncellenmiş rijitlik matrisi dikkate alınarak yeni bir iterasyon başlatılır. İç kuvvetler ile dış kuvvetler dengelene kadar iterasyonlar tekrarlanır. Yakınsama sağlandığında, yük artırımına geçilir ve aynı işlem tekrarlanır.

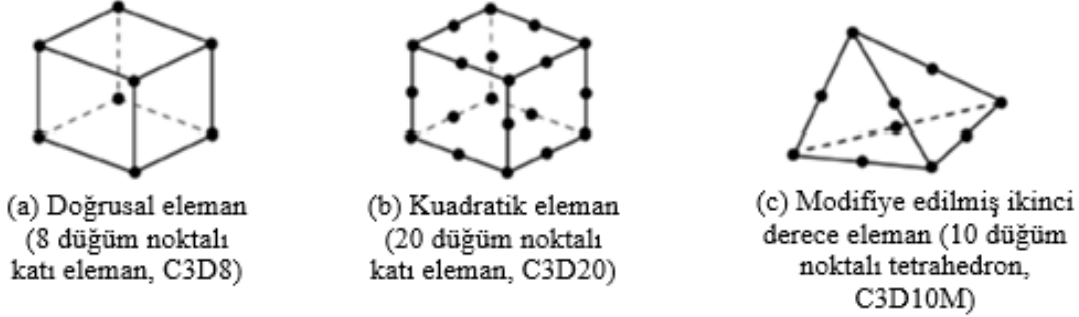
Doğrusal olmayan statik itme (pushover) analizleri ile tekrarlı yükler altındaki analizler, statik çözüm temelli yarı dinamik (quasi-static) bir yöntemle gerçekleştirilecektir. Bu yaklaşım, dinamik etkilerin hesaplama süresi ve karmaşıklığını artırmadan, yapının doğrusal olmayan davranışlarını daha etkin ve verimli biçimde inceleme imkanı sunar. Özellikle, deprem gibi tekrarlı yüklerin etkisi altındaki yapısal performansın değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

5.3 Katı Eleman Özellikleri

5.3.1 Katı eleman tipi

ABAQUS, katı elemanlar için farklı eleman tiplerinin kullanımını sunmaktadır. Yalnız köşelerde düğüm noktaları bulunan ve her bir yönde doğrusal interpolasyon kullanan elemanlar, doğrusal elemanlar veya birinci derece elemanlar olarak tanımlanır. Köşe düğümlerine ek olarak kenarların orta noktalarında da düğüm noktalarına sahip olan ve kuadratik interpolasyon kullanan elemanlar, ikinci derece (kuadratik) elemanlar olarak tanımlanır. Bu elemanlar, her kenarında bir orta düğüm noktası içerir ve

kuadratik şekil fonksiyonları kullanarak daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlar. Üçgensel elemanlar ise hem köşe hem de kenar ortası düğüm noktalarına sahiptir ve değiştirilmiş ikinci derece interpolasyon tekniğiyle tanımlanır (Şekil 5.3).

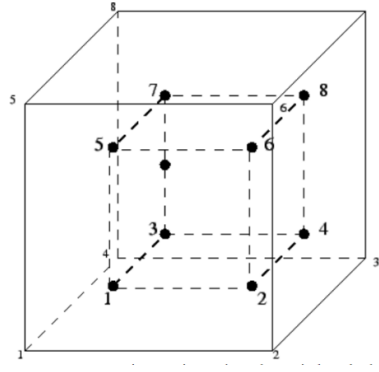


Şekil 5.3 : ABAQUS katı elemanlardan örnekler.

Kuadratik elemanlar, doğrusal elemanlara kıyasla daha fazla integrasyon noktasına sahip olduklarından, daha hassas ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Ancak bu elemanların kullanımı, düğüm noktalarının sayısını ve buna bağlı olarak serbestlik derecesini artırarak analiz süresinin uzamasına neden olabilir. Bu nedenle, büyük ve karmaşık modellerin analizinde, doğrusal elemanlar daha uygun bir seçenek olabilir; çünkü bu elemanlar, daha hızlı çözüm imkanı sunarak hesaplama süresini önemli ölçüde azaltır ve mevcut kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar.

5.3.2 İntegrasyon yöntemi

Elemanların tipi, doğrusal veya kuadratik olmasının yanı sıra, formülasyon ve integrasyon düzeyinin doğru bir şekilde seçilmesi, analizin doğruluğu için kritik öneme sahiptir. ABAQUS sonlu eleman programında iki farklı integrasyon yöntemi bulunmaktadır: tam integrasyon yöntemi (full integration) ve azaltılmış integrasyon (reduced integration) yöntemi. Tam integrasyon terimi, elemanın düzgün bir geometriye sahip olduğu durumlarda, rijitlik matrisindeki polinom terimlerini doğru şekilde entegre edebilmek için gereken Gauss noktalarının sayısını ifade eder. Tam integrasyonlu doğrusal elemanlar, her yönde iki integrasyon noktası kullanır. Örneğin, 8 (sekiz) düğüm noktasına sahip C3D8 katı elemanında, $2 \times 2 \times 2$ düzeninde toplam 8 Gauss noktasıyla integrasyon yapılmaktadır (Şekil 5.4).



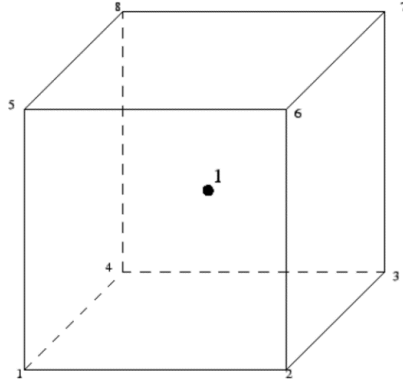
Şekil 5.4 : C3D8 katı elemanı.

Doğrusal elemanların tam integrasyon tanımı ile kullanıldığı, özellikle eğilme etkilerinin belirleyici olduğu analiz türlerinde, sonlu eleman ağının yoğunluğundan bağımsız olarak analiz sonuçlarında yakınsama sorunları ortaya çıkabilir. Bu gibi durumlarda, elde edilmesi gereken sonuçlara kıyasla önemli ölçüde düşük değerler elde edilmesi yaygın bir problemdir. Tam integrasyon yönteminin kullanıldığı doğrusal elemanlarda bu sonuçların elde edilmesine, “shear locking” adı verilen gerçekte oluşmayan hayali kayma deformasyonları sebep olur. Bu problem, elemanların eğilmeye neden olan yüklemeler altında olması gerekenden çok daha rijit davranmasına neden olur. Bu durumu daha iyi anlamak için, bir elemanın içinde integrasyon noktalarından geçen düşey ve yatay lifler düşünülebilir. Eğilme sırasında, düşey liflerin boyu değişmezken; yatay lifler çekme bölgesinde uzar, basınç bölgesinde ise kısalır. Gerçek bir elemanın davranışı bu şekildeyken, tam integrasyon yöntemiyle yapılan modellemede, bu lifler arasındaki 90 derecelik açı korunamaz. Bu açı bozulması, eleman içinde gerçekte oluşmayan bir kayma gerilmesinin hesaplanmasına yol açar (Şekil 5.5). Bu durum, eğilme kaynaklı şekil değiştirme yerine, yapay bir kayma şekil değiştirmesi oluşmasına ve elemanın olduğundan çok daha rijit davranmasına neden olur.



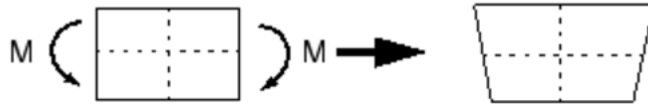
Şekil 5.5 : Tam integrasyon yönteminde eleman davranışı.

Azaltılmış integrasyon yöntemiyle kullanılan doğrusal elemanlarda, elemanın merkezinde yalnızca bir adet integrasyon noktası bulunur (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 : C3D8R (linear brick element) integrasyon noktası.

Bu yöntemle tanımlanan elemanlar, genellikle daha esnek bir davranış sergileme eğilimindedir. Bu esneklik, sayısal bir sorun olan ve hourglassing olarak bilinen istenmeyen modların oluşmasına neden olabilir. Eğilme etkilerinin baskın olduğu analizlerde, azaltılmış integrasyon yönteminin kullanıldığı doğrusal elemanlarda, eleman merkezindeki tek bir integrasyon noktasından geçen düşey ve yatay liflerin uzunlukları değişmeden kalır ve aralarındaki açı sabit kalır. Bu durum, eleman içerisinde şekil değiştirme enerjisinin oluşmamasına ve dolayısıyla hourglass modlarının ortaya çıkmasına yol açar (Şekil 5.7). Bu nedenle bu tür elemanlara analizin başlangıcında ABAQUS yazılımı tarafından, hourglass modlarını önlemek amacıyla hourglass rijitliği adı verilen düşük seviyeli yapay bir rijitlik tanımlanır.



Şekil 5.7 : Azaltılmış integrasyon yönteminde eleman davranışı.

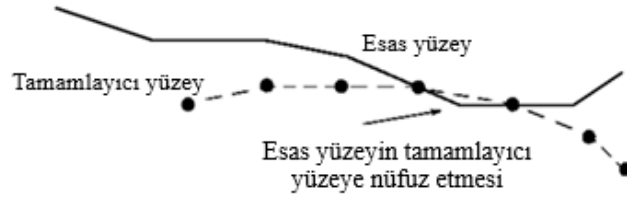
Ayrıca, azaltılmış integrasyon yöntemini kullanan doğrusal elemanlarla yapılan analizlerde, elemanın kalınlığı boyunca yalnızca bir katman eleman kullanıldığında, tüm integrasyon noktaları tarafsız eksenin üzerinden geçer. Bu durumda, elemanlar eğilme etkilerine karşı yeterli dayanım gösteremez. Dolayısıyla, daha doğru sonuçlar elde edebilmek için eğilme analizlerinde kalınlık boyunca birden fazla eleman katmanı kullanılması gerekmektedir.

Azaltılmış integrasyon yönteminde kayma kilitlenmesi (shear locking) problemi oluşmadığından, doğrusal azaltılmış integrasyon özelliğine sahip, sekiz düğüm noktalı ve tek integrasyon noktalı C3D8R katı elemanlar; kalınlık boyunca en az dört katman

olacak şekilde modellenmeleri durumunda, eğilme etkilerinin temsilinde uygun bir seçenek sunmaktadır.

5.4 Elemanlar Arasındaki Temas Etkileşimi Modeli

ABAQUS yazılımında elemanlar arasındaki temas etkileşimlerinin tanımlanabilmesi için esas yüzey (master surface) ve tamamlayıcı yüzey (slave surface) olmak üzere iki farklı yüzey türü kullanılmaktadır. Temas algoritması kapsamında, tamamlayıcı yüzeyin esas yüzeye nüfuz etmesine izin verilmezken, teorik olarak esas yüzeyin tamamlayıcı yüzey içine sınırlı miktarda nüfuz etmesine tolerans gösterilebilir (Şekil 5.8). Ancak bu nüfuz miktarı genellikle çok küçük düzeylerde gerçekleştiğinden çözüm kararlılığını önemli ölçüde etkilemez.



Şekil 5.8 : Esas ve tamamlayıcı yüzeyler.

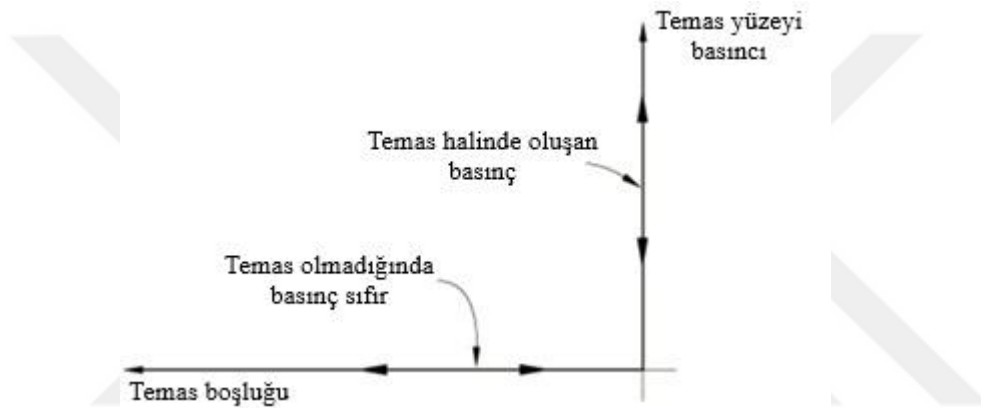
Yüzey-yüzey temas etkileşim modelinde, temas eden her iki yüzeyin de geometrisi dikkate alınarak temas koşulları tanımlanır. Bu model, sadece tamamlayıcı yüzeyin kendi düğüm noktalarını değil, bu düğüm noktalarının yakınındaki yüzey şekillerini de hesaba katarak temas davranışını daha doğru bir şekilde temsil etmeyi amaçlar. Böylece, temas alanında daha sürekli ve gerçekçi bir temas basıncı dağılımı elde edilir.

ABAQUS sonlu eleman programında “küçük kayma etkisi” (small sliding) tanımı kullanıldığında, analiz başlangıcında esas (master) yüzey ile tamamlayıcı (slave) yüzey arasında temas etkileşimi kurulur ve bu ilişki analiz süresince devam eder. Program, esas yüzeyin hangi bölümünün tamamlayıcı yüzeydeki hangi noktalarla temas kuracağını ilk adımda belirler. Eğer modelde geometrik doğrusal olmayan bir durum tanımlanmışsa, küçük kayma etkisi algoritması, esas yüzeydeki herhangi bir dönme ve şekil değiştirmeyi dikkate alarak, temas kuvvetlerinin iletildiği yük iletim yolunu günceller.

5.5 Temas Eden Yüzeyler Arasındaki Etkileşimin Tanımlanması

Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanmaktadır.

Temas yüzeyleri arasındaki etkileşimin normal bileşeni için ABAQUS yazılımında “Hard Contact” tanımı kullanılmıştır. Bu tanım kapsamında, iki yüzey temas ettikten sonra birbirinden ayrılmasına izin verilir. Temas davranışı, iki yüzey arasındaki mesafenin sıfırlandığı anda devreye girer. Yüzeyler arasındaki basınç sıfırlandığında veya negatif bir değer aldığı anda ise, temasın normal bileşenine ilişkin davranış sonlanır (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 : Temas yüzeyinin normal bileşeni için kabuller.

Teğetsel temas davranışı, ABAQUS yazılımında Coulomb sürtünme modeli kullanılarak tanımlanır. Yüzeyler arasındaki sürtünme, “Penalty” formülasyonu ile modellenir ve sürtünme katsayısı kullanıcı tarafından tanımlanarak programa girilir. Coulomb sürtünme modeli, sürtünme davranışını sadece sürtünme katsayısı (μ) ile karakterize eder. ABAQUS yazılımında varsayılan sürtünme katsayısı sıfır olduğundan, temas yüzeyleri arasında gerçekçi bir etkileşim tanımlanabilmesi için bu değer doğru seçilmesi büyük önem taşır. Teğetsel hareket, temas yüzeyinde oluşan kayma gerilmesi, kritik kayma gerilmesi değerine ulaşmadan meydana gelmez. Kritik kayma gerilmesi, yüzeye dik yönde etki eden temas basıncı ile doğru orantılıdır (5.1).

$$\tau_{crit} = \mu P \quad (5.1)$$

Burada μ sürtünme katsayısını; P temas basıncını temsil etmektedir. Kritik kayma gerilmesi aşılmadığı sürece temas yüzeyleri arasında kayma davranışı meydana gelmez.

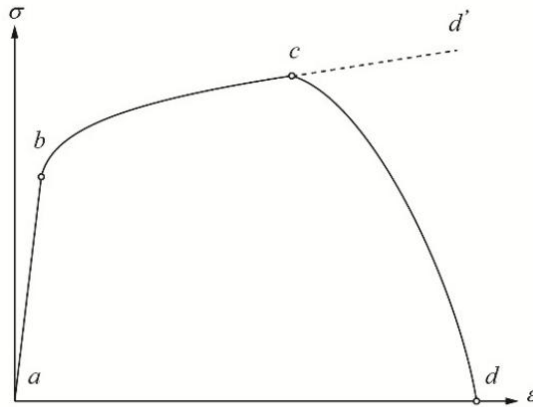
5.6 Sonlu Eleman Noktaları Arasında Yer Değiştirmelerin Sınırlandırılması

ABAQUS sonlu eleman programında, elemanların yüzeyleri arasındaki etkileşim, yüzeylerin birbirine bağlanarak birlikte hareket etmesini sağlayacak şekilde tanımlanabilir. Bu bağlamda, her iki yüzey de aynı serbestlik derecesine sahip olmakta ve aralarında görelî yer değiştirme oluşmamaktadır. Kaynakla teşkil edilen birleşimler, kaynak malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünöldüğünde güvenli bir yaklaşımla sonlu eleman noktaları arasında yer değiştirmelerin sınırlandırılması (tie constraint) tanımı ile modellenenebilir.

5.7 Hasar ve Dayanım Kaybının Modellenmesi

5.7.1 Modellemeye genel bakış

Malzemenin çekme testi sırasında gerilme - şekil değiştirme eğrisi, şekil 5.10'da gösterilen aşamalardan oluşmaktadır.



Şekil 5.10 : Çekme testi sırasında tipik bir metal numunesinin davranışı.

Malzeme davranışı başlangıçta doğrusal elastiktir (a-b), ardından plastik akma davranışı ile pekleşme davranışı (b-c) ile devam eder. “c” noktası sonrasında taşıma kapasitesinde belirgin bir azalma meydana gelir ve bu azalma kırılma (kopma) noktası (d) ile sonuçlanır. Son aşamadaki şekil değiştirme, numunenin boyun bölgesi olarak adlandırılan sınırlı bir bölgede yoğunlaşır.

“c” noktası, malzemede hasarın başladığı durumu tanımlar ve bu durum hasar başlatma kriteri (damage initiation criterion) olarak adlandırılır. Bu noktadan sonra, gerilme - şekil değiştirme ilişkisi, şekil değiştirmenin gerçekteleğiğî bölgede rijitlik azalmasının ilerlemesi ile kontrol edilir. Hasar mekanığı bağlamında, (c-d) eğrisi, malzemenin

hasar gelişmemiş olsaydı izleyeceği ideal gerilme - şekil değiştirme eğrisinin (c-d') dayanım kaybı oluşmuş hali (degraded response) olarak kabul edilebilir.

ABAQUS yazılımında hasar oluşum modelinin tanımlanması dört ayrı bileşenden oluşur:

- Etkin (veya hasarsız) malzeme davranışının tanımlanması (a-b-c-d' eğrisi)
- Hasar başlatma kriteri (c noktası)
- Hasar ilerleme yasası (c-d eğri parçası)
- Eleman silme seçeneği, yani malzeme rijitliği tamamen azaldığında elemanların hesaplama dışı çıkarılabilmesi (d noktası)

5.7.2 Sünek metaller için hasar modeli

ABAQUS yazılımı, sünek metallerde hasarın başlangıcını öngörme ile hasarın gelişimi ve göçmenin modellenmesine olanak vermektedir. Bu tür bir modellemenin gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki bileşenlerin modelde tanımlanması gerekmektedir:

- Malzemenin dayanım kaybı dikkate alınmadan elastik ve plastik davranışı
- Hasar başlatma kriteri
- Hasar gelişimi davranışı (damage evolution) ve sonlu eleman silme seçeneği (mesh deletion)

Sünek metallerde çatlak oluşumunun başlayabilmesine yönelik hasar başlatma kriteri

ABAQUS yazılımı, sünek metallerde çatlak oluşumunun başlayabilmesine yönelik hasar başlatma kriteri olarak sünek hasar başlatma kriteri (ductile criterion) tanımını sunmaktadır. Sünek hasar başlatma kriteri, boşlukların oluşumu, büyümesi ve birleşmesi sonucu meydana gelen hasarın başlangıcını tahmin etmeye yönelik gözleme dayalı bir modeldir. Bu model, hasarın başlangıcındaki eşdeğer plastik şekil değiştirmenin ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$), gerilme üç eksenliliği (η) (stress triaxiality) ve şekil değiştirme hızının ($\dot{\epsilon}_0^{pl}$) (strain rate) bir fonksiyonu olduğunu varsayar (5.2).

$$\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}_0^{pl}) \quad (5.2)$$

Gerilme üç eksenliliği denklem 5.3 ile hesaplanır.

$$\eta = -\frac{p}{q} \quad (5.3)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

p : Basınç gerilmesi, MPa.

q : Eşdeğer von Mises gerilmesi, MPa.

Rice ve Tracey (1969) hasar gelişim hızının η parametresine bağlılığını tanımlayan eksponansiyel 5.4 denklemini sunmuşlardır (Krolo, 2017’de atıfta bulunulduğu gibi).

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = \varepsilon_0^{pl} e^{[-1.5(\eta-1/3)]} \quad (5.4)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε_0^{pl} : Deney sonucunda elde edilen hasarın başladığı andaki plastik şekil değiştirme, tek eksenli çekme testi için $\eta = 1/3$.

η : Gerilme üç eksenliliği.

Hasar başlatma kriteri, denklem 5.5’in sağlanmasıyla birlikte gerçekleşmiş kabul edilir.

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}_0^{pl})} = 1 \quad (5.5)$$

ω_D : Plastik şekil değiştirme ile birlikte artan durum değişkeni.

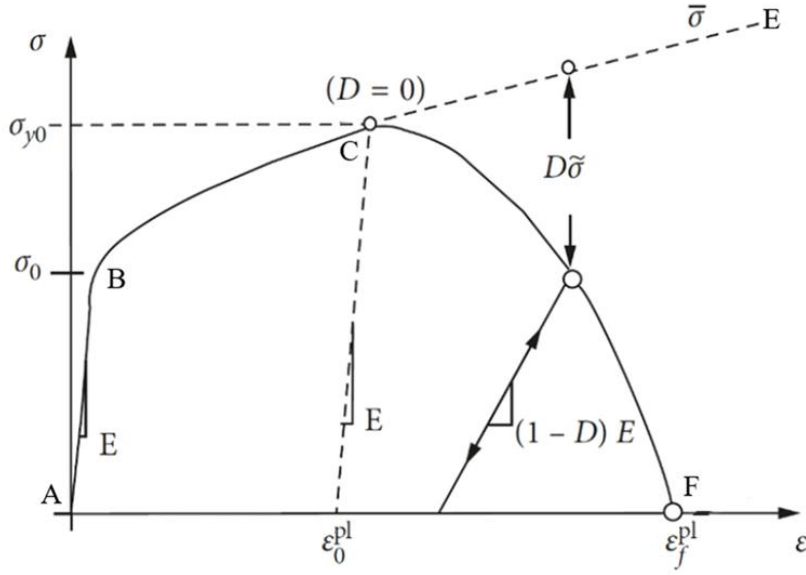
Analiz sırasında her adımda, ω_D değerindeki artış denklem 5.6 ile hesaplanır.

$$\Delta\omega_D = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}_0^{pl})} \geq 0 \quad (5.6)$$

Sünek metallerde hasar gelişimi

Sünek metaller için hasar gelişimi modeli, hasarın, malzeme rijitliğinin kademeli olarak azalmasıyla karakterize edildiğini ve bunun nihai olarak malzeme göçmesine yol açtığını varsayar. Hasar gelişimi modeli, sünek metaller için tanımlanmış bir hasar başlatma kriteri ile birlikte kullanılmalıdır.

Hasar gelişimi sürecindeki sünek bir malzemenin karakteristik gerilme–şekil değiştirme davranışı şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : Yapısal çeliğin gerilme - şekil değiştirme davranışı.

Yapısal çeliğin davranışı, Şekil 5.11'de gösterildiği üzere dört aşamadan oluşan bir malzeme modeli ile ifade edilebilir:

- A-B eğri parçasında malzeme doğrusal elastik davranış sergiler.
- B-C eğri parçasında hasar oluşmaksızın pekleşmenin eşlik ettiği plastik akma davranışı gözlemlenir.
- C noktası, malzeme içinde hasarın başladığı noktayı temsil eder.
- C-F eğri parçasında ise, hasarın ilerlemesiyle birlikte dayanım ve rijitlik azalır, süreç F noktasında kopma ile sonlanır.
- Eğer hasar modeli dikkate alınmazsa, çeliğin davranışı C-D eğrisi boyunca ilerlemesi beklenir.

Sünek bir malzemede hasar iki şekilde oluşur: dayanım azalması (softening of the yield stress) ve elastisite modülünün daha küçük değerlere düşmesi (degradation of elasticity). Şekildeki düz eğri, hasarlı gerilme-şekil değiştirme davranışını temsil ederken, kesikli eğri, hasar olmaksızın elde edilen davranışı göstermektedir. σ_{y0} hasarın başlangıcındaki akma gerilmesini, ϵ_0^{pl} ise hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirmeyi temsil eder. ϵ_f^{pl} hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaştığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme düzeyidir.

Hasar başlatma kriteri sağlandıktan sonra, plastik yer değiştirme ($\bar{u}_i^{pl}$) hasar gelişimi denklemi ile tanımlanır (5.7).

$$\bar{u}_i^{pl} = L\bar{\varepsilon}_i^{pl} \quad (5.7)$$

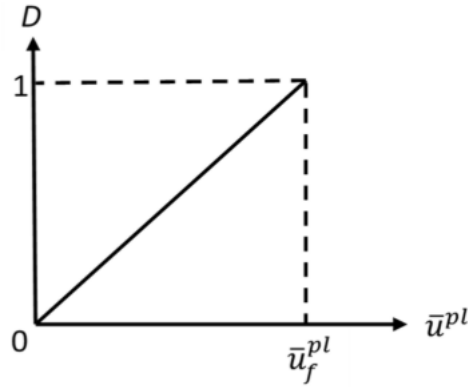
Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L : Sonlu eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\varepsilon}_i^{pl}$: Toplam hasar değişkeni $0 < D < 1$ olması durumunda, araştırılan “i” durumundaki eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\varepsilon_i^{pl} - \varepsilon_0^{pl}$.

Katı sonlu elemanlar için, sonlu eleman karakteristik uzunluğu (L), elemanın hacminin küp kökü alınarak belirlenir. Çatlak oluşumunun hangi yönde gerçekleşeceğinin önceden bilinmemesi nedeniyle bu şekilde bir hesaplama yöntemi tercih edilir. Yönden bağımsız bir karakteristik uzunluk tanımı sayesinde, hasar modelleri izotropik bir şekilde uygulanabilir ve eleman geometrisine bağlı sonuçlardaki duyarlılık azaltılmış olur.

Hasar değişkeninin (D) görelî plastik yer değiştirmeye bağılı değişimi; tablo biçiminde, doğrusal ya da üstel formda tanımlanabilir (Şekil 5.12). Kırılma anındaki plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) sıfır olarak tanımlanırsa, anlık göçme meydana gelir; ancak bu seçenek stabilite problemlerine yol açabileceğinden önerilmemektedir.



Şekil 5.12 : Hasar değişkeninin görelî plastik yer değiştirmeye bağılı değişimi.

Hasar oluşumu başlamadan önce ($D = 0$), eşdeğer plastik yer değiştirme sıfır olarak $\bar{u}^{pl} = 0$; hasar başladıktan sonra ($0 < D < 1$) ise $\bar{u}^{pl} = L\bar{\varepsilon}^{pl}$ şeklinde tanımlanır. Hasarın tamamlandığı nokta ise ($D = 1$) denklem 5.8 ile tanımlanmaktadır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} \quad (5.8)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L : Sonlu eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\epsilon}_f^{pl}$: Hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaştığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\epsilon_f^{pl} - \epsilon_0^{pl}$.

Hasar meydana gelen elemanların değerlendirilmesi

ABAQUS yazılımı, hasarın meydana geldiği elemanların nasıl değerlendirileceği konusunda çeşitli kontrol seçenekleri sunmaktadır. Toplam hasar değişkeni D için bir üst sınır değeri (D_{max}) tanımlanıp dayanımda azalmasının en üst seviyesine ulaşıldığında ilgili elemanın silinip silinmeyeceği belirlenebilmektedir.

Hasar değişkeninin en büyük değeri (D_{max}) için varsayılan ayar, elemanların silinmesi söz konusuysa $D_{max} = 0.99$ olarak tanımlanır. Hasar değişkeni D 'nin değeri, SDEG isimli çıktı değişkeni üzerinden analiz süresince izlenebilir. Bir integrasyon noktasında hasar değişkeni maksimum değere ulaştığında, bu noktada daha fazla hasar oluşmaz ve eleman silindiğinde kalan rijitlik de kaybolur.

Varsayılan olarak, maksimum hasar seviyesine ulaşan elemanlar ABAQUS/Standard çözümleyicisinde, tüm kesit noktalarında ve tüm integrasyon noktalarında sonlu eleman ağıdan çıkarılır.

ABAQUS, analiz sürecinde silinebilecek elemanlar için hasarı tüm rijitlik bileşenlerine eşit olarak uygular. Analiz sürecinin herhangi bir anında, malzemenin gerilme tensörü, skaler hasar denklemi ile tanımlanır (5.9).

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (5.9)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

D : Hasar değişkeni.

$\bar{\sigma}$: Hasarın dikkate alındığı gerilme tensörü.

σ : Hasarsız (etkin) gerilme tensörü.

Hasar modelinin uygulandığı modellerde karşılaşılan yakınsama problemlerinin bir kısmı, simetrik olmayan sistem matrislerinden kaynaklanabilir. Genel olarak, sünek

hasar modellerinden herhangi biri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi simetrik olmayacaktır. Bu nedenle, yakınsama davranışını iyileştirmek amacıyla simetrik olmayan denklem çözücüsünün kullanılması önerilmektedir.

ABAQUS yazılımında, standart çıktı değişkenlerine ek olarak hasar gelişiminin tanımlandığı analizlerde “STATUS” ve “SDEG” gibi özel çıktı değişkenleri de kullanılmaktadır.

STATUS : Elemanın durumu (bir elemanın durumu, eleman aktifse 1 (bir) aktif değilse 0 (sıfır)’dır.

SDEG : Hasar değişkeni, D . Elemanın rijitlik azalmasını skaler bir değer olarak ifade eder. 0 (sıfır) değeri, hasarın henüz başlamadığını; 1 (bir) değeri ise elemanın tamamen hasar görerek rijitliğini kaybettiğini gösterir.



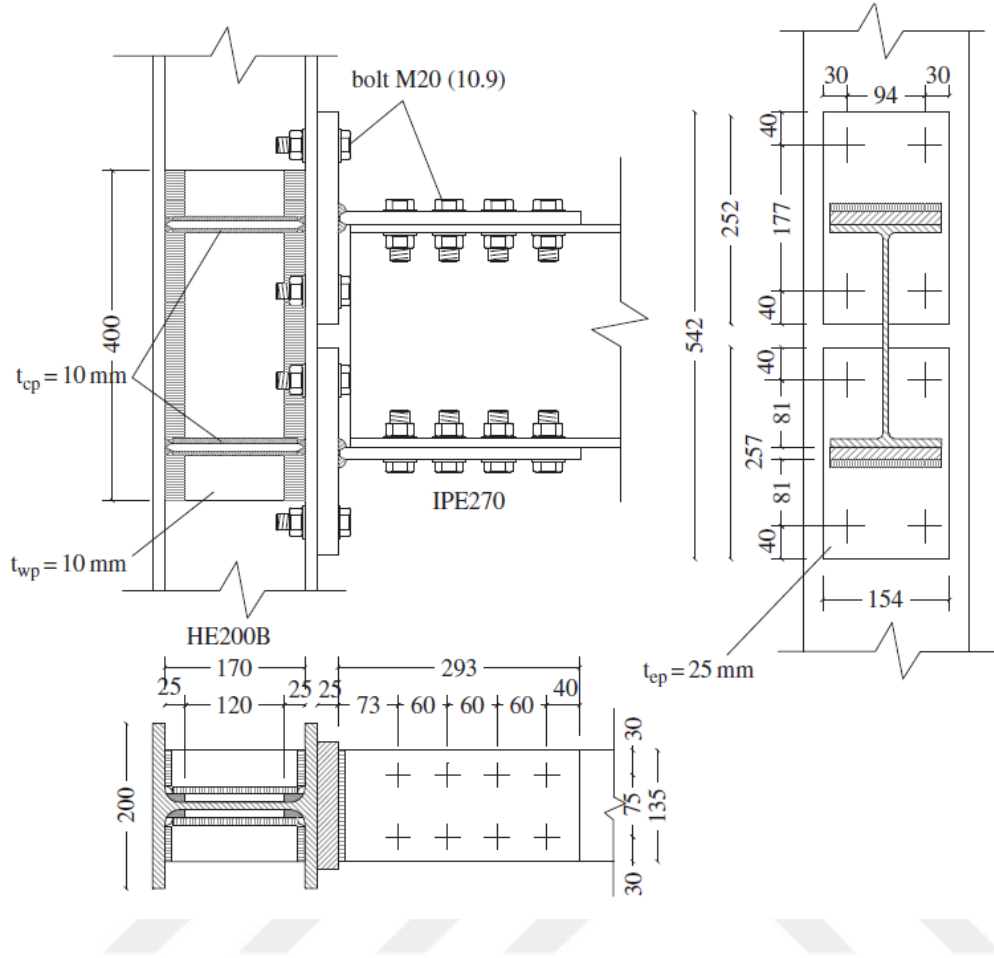
6. SONLU ELEMAN MODELLEME ESASLARININ DOĞRULANMASI

6.1 Bulonlu T-Parçalı Birleşim Modellerinin Doğrulanması

Bu çalışma kapsamında, bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin ABAQUS sonlu eleman modellerinin analizinde kullanılacak olan malzeme davranışı, katı eleman tipleri, yüzey etkileşimleri gibi modelleme esasları, daha önce deneyi yapılan benzer bir kiriş-kolon birleşimi dikkate alınarak doğrulanacaktır.

6.1.1 Esas alınan deneysel çalışma

Doğrulama çalışması için Iannone ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma esas alınmıştır. Bu araştırmanın amacı, geliştirilen kiriş-kolon birleşimlerindeki birleşim elemanlarının, çevrimsel yükler altında, birleşimin toplam dönme kapasitesine olan etkisini değerlendirmektir. Birleşimler, plastik deformasyonların birleşimde kullanılan bağlantı elemanlarında oluşmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada toplam 4 (dört) adet numune test edilmiştir. Bu tez kapsamında, bu numunelerden biri olan TS-CYC 04 adlı T-parçalı bulonlu kirişin kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı kiriş-kolon birleşimi doğrulama çalışması için referans alınmıştır. Geliştirilen T-parçalı birleşimde, plastik şekil değiştirmelerin kirişte oluşması yerine, kontrollü bir şekilde T-parçalarda yoğunlaşması prensibi esas alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, deprem sonrasında yalnızca T-parçaların değiştirilmesi yeterli olacak ve yapının kullanımına devam edilebilecektir. Birleşimde, kiriş elemanı olarak IPE 270; kolon elemanı için ise HE 200 B profili kullanılmıştır. T-parça, iki levhanın birbirine kaynak uygulamasıyla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Birleşimin geometrisi ve kullanılan elemanların boyutları Şekil 6.1’de gösterilmektedir. T-parçaların başlıkları ile kolon başlıkları arasındaki bulonlu birleşimde 4 (dört) adet; T-parçaların gövdeleri ile kiriş başlıkları arasındaki bulonlu birleşimde ise 8 (sekiz) adet M20 10.9 sınıfı bulon kullanılmıştır.

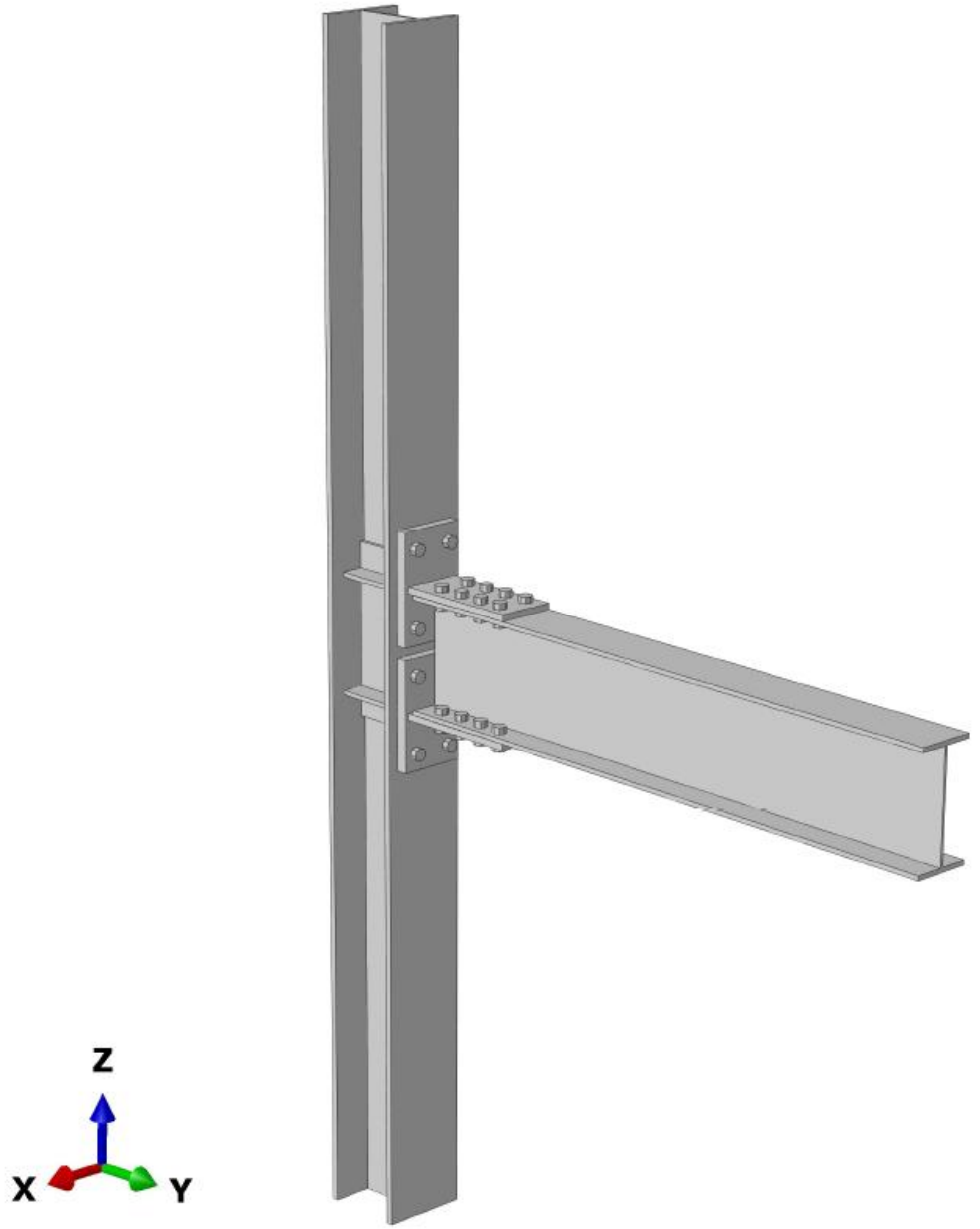


Şekil 6.1 : TS-CYC 04 numunesinin geometrisi.

Kirişin kolon yüzünden yük uygulama noktasına kadar olan uzunluğu 1,59 m; kolonun mesnetleri arasındaki mesafe 2,70 m olarak belirtilmiştir. Yük uygulaması, kirişin ucuna bağlanan bir kriko vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

6.1.2 Birleşimin sonlu eleman modeli

Makalede belirtilen geometrik özellikler kullanılarak oluşturulan birleşimin sonlu eleman modeli Şekil 6.2’de görülmektedir.

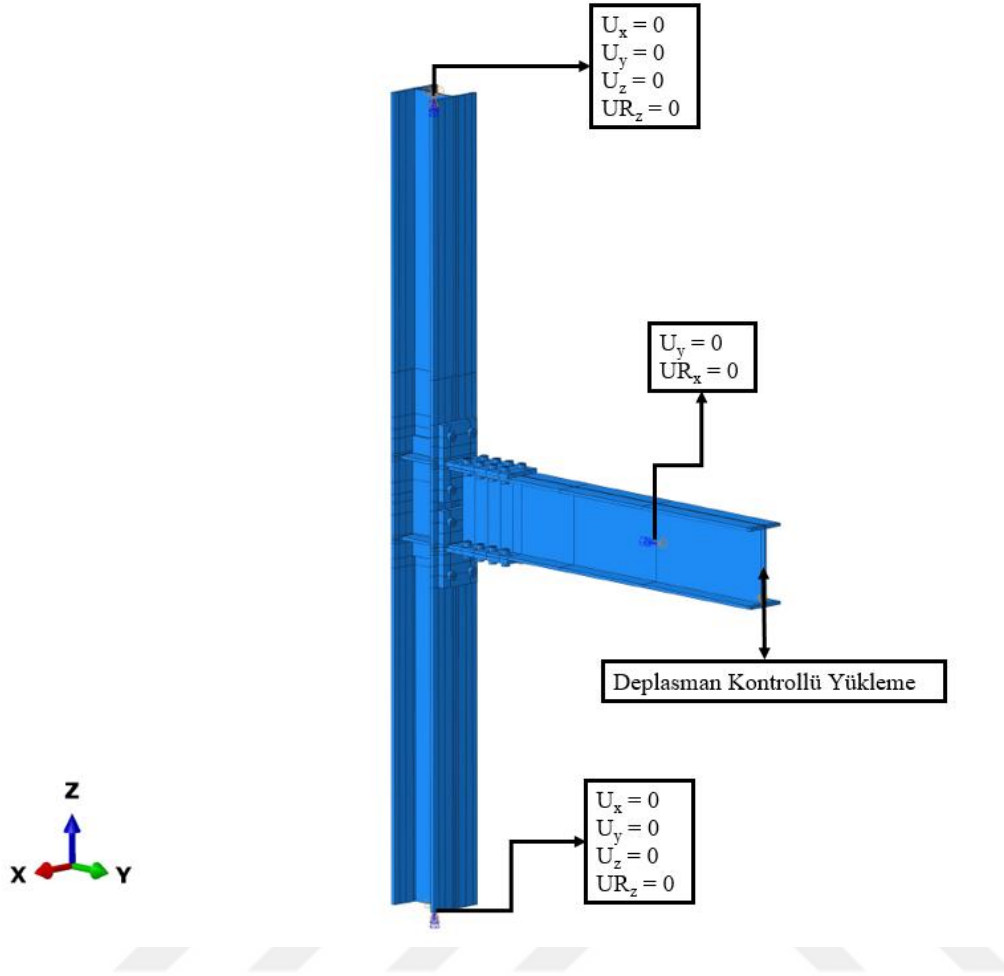


Şekil 6.2 : TS-CYC 04 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.

6.1.3 Mesnetlerin modellenmesi

Sonlu eleman modellerinde kolon alt ve üst uçlarının kesitlerine basit mesneti temsil edecek sınır koşulları uygulanmıştır. ABAQUS yazılımında ilgili kesit yüzeyleri “Rigid Body” komutu ile bir referans noktasına bağlanmaktadır. Böylece yüzeydeki her bir noktanın beraber hareket etmesi amaçlanmıştır.

Kiriş, burulma deformasyonu yaparak yanal burkulmasını önlemek amacıyla, orta bölgesinden yanal olarak desteklenmiştir. (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 : TS-CYC 04 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları.

6.1.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli

Deneysel çalışma kapsamında yapılan çekme deneyi sonuçları dikkate alındığında T-parçanın akma gerilmesi (F_y), çekme dayanımı (F_u), yapısal çelik elastisite modülü (E), pekleşmenin başladığı anda elde edilen şekil değiştirme değeri (ϵ_h) ve çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_u) çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların malzeme özellikleri.

Numune İsmi	F_y [MPa]	F_u [MPa]	E [MPa]	ϵ_h/ϵ_y	ϵ_u/ϵ_y
TS-CYC 04	295	520	210000	12,2	486

Deneysel çalışmanın makalesinde, kiriş elemanının S275; kolon elemanının ise S355 yapı çeliği sınıfı kullanılarak üretildiği belirtilmiştir. Çekme deneyi sonucunda, kiriş ve kolon malzemelerinin gövde ve başlık parçaları için farklı akma gerilmesi ve çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Nümerik modelde malzeme modeli oluşturulurken, kiriş ve kolon başlık parçaları için elde edilen değerler dikkate alınmıştır (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş ve kolon malzemesinin karakteristik akma gerilmesi ve çekme dayanımları.

Elemanlar	F_{yf} [MPa]	F_{uf} [MPa]	F_{yw} [MPa]	F_{uw} [MPa]
Kiriş	405	546	387	534
Kolon	430	523	383	522

Kiriş ve kolon elemanlarının malzemesi için elastisite modülü belirtilmediğinden, alın levhası malzemesi için elde edilen 210000 MPa değeri kullanılmıştır. Kiriş ve kolon elemanları için çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ε_u) belirtilmemiştir. Bu nedenle bu değer $\varepsilon_u = 120\varepsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş ve kolon malzemesinin birim şekil değiştirme değerleri.

Elemanlar	E [MPa]	ε_y	ε_u
Kiriş	210000	0,002	0,231
Kolon	210000	0,002	0,246

Bulon malzemesi için de çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ε_u) belirtilmemiştir. Bu değer $\varepsilon_u = 8\varepsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.4).

Çizelge 6.4 : TS-CYC 04 numunesindeki birleşimde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.

Elemanlar	E [MPa]	F_{yb} [MPa]	F_{ub} [MPa]	ε_y	ε_u
10.9 Bulon	210000	900	1000	0,004	0,034

Birleşim davranışının doğru bir şekilde simüle edilebilmesi için, nümerik modelde kullanılan malzeme modelinin dikkatli bir şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki çalışmaların çoğunda, malzemelerin mekanik özellikleri tek eksenli yükleme esasına dayanan standart çekme deneylerinin sonuçlarına dayanmakta ve gerilme–şekil değiştirme ilişkisi genellikle iki doğrusal bölge (bilinear) veya çoklu doğrusal (multilinear) modellerle tanımlanmaktadır. Bu tür deney sonuçları, basit elastik problemler veya sınırlı plastik şekil değiştirme içeren elastoplastik problemler için yeterli olabilir. Ancak, bu modeller çelik malzemelerin

tekrarlı yükleme etkisindeki davranışını doğru bir şekilde temsil edememektedir. Bu nedenle, çevrimsel yükleme altındaki malzeme davranışını temsil edebilmek için, malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediği doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilen Ramberg-Osgood denklemi kullanılmıştır (Ramberg ve Osgood, 1943). Ramberg-Osgood denklemi, özellikle plastik şekil değiştirme sırasında pekleşme gösteren sünek metallerin elastik davranıştan plastik davranışa geçişini temsil etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Dissanayake ve diğ, 2025). Tekrarlı yükler altında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen gerilme - şekil değiştirme değerleri, K ve n katsayıları ile Ramberg-Osgood denklemi kullanılarak elde edilen gerilme şekil değiştirme değerleri ile iyi derecede eşleşmektedir (Kaufmann ve diğ, 2001).

Ramberg-Osgood denklemi, toplam şekil değiştirme ile gerilme arasındaki bağıntıyı ifade etmektedir (6.1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (6.1)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε : Toplam şekil değiştirme.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

σ : Mühendislik gerilmesi, MPa.

K : Denklem sabiti.

n : Pekleşmeyi dikkate alan malzeme sabiti.

Denklemdeki σ/E terimi elastik şekil değiştirme bileşenini ifade ederken, $K(\sigma/E)^n$ terimi plastik şekil değiştirme bileşenini tanımlar. Böylece, elastik ve plastik davranış aynı bağıntı içerisinde birlikte değerlendirilmiş olur.

Ramberg-Osgood denklemi kullanılarak oluşturulan malzeme modeli yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, iki parametrelili yapısından dolayı K ve n parametrelerinin belirlenmesi genellikle kolay olmamaktadır. Bu sorunu ele almak amacıyla, Hill (1944), akma gerilmesini doğrudan denkleme dahil ederek, parametrelerin tahmin edilmesini kolaylaştıran bir uyarlama önermiştir (6.2).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{F_y} \right)^n \quad (6.2)$$

Uyarlanan denklem incelendiğinde, elastik şekil değiştirme bileşeni olan σ/E teriminin aynı şekilde kaldığı görülmektedir. Ancak, plastik şekil değiştirme bileşeni olan terimi değişikliğe uğramış ve bilinmeyen olarak K terimi yerine akma gerilmesi (σ_y) yer almaktadır. Bu uyarlamanın yapılması, akma gerilmesinin kolayca erişilebilen bir malzeme özelliği olması nedeniyle, parametre tahminini daha pratik hale getirmektedir.

Akma gerilmesi, yapı çeliği malzemenin önemli ölçüde kalıcı şekil değiştirme yaşamadan dayanabileceği en yüksek gerilme düzeyini ifade eder. Bu sınır genellikle %0,2 oranında plastik şekil değiştirme ile tanımlanır. Söz konusu plastik şekil değiştirme düzeyi, malzemenin elastik bölgeden plastik davranışa geçtiği noktayı belirlemede kritik öneme sahiptir. Akma gerilmesi aşıldığında, malzeme plastik şekil değiştirmeye başlar ve bu durum, yük kaldırıldığında malzemenin başlangıçtaki şekline tam olarak geri dönemeyeceği anlamına gelir.

Hill (1944) tarafından önerilen denklemde, akma gerilmesine karşı gelen plastik şekil değiştirmenin %0,2 olduğu tanımı kabul edilir. Sonuç olarak, plastik şekil değiştirmenin sıfır olduğu gerilme, akma gerilmesinden daha düşük olacaktır. Bu gerilme, orantılılık sınır olarak tanımlanır.

Eğrinin doğruluğu açısından n parametresinin belirlenmesi büyük önem taşır. Bu parametre, malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin plastik bölgesini doğru şekilde temsil edebilmesi için dikkatle hesaplanmalıdır. Çekme dayanımı (F_u), akma gerilmesi (F_y), çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ε_u) ve yapısal çelik elastisite modülü (E) gibi tek eksenli çekme deneyleri sonucunda elde edilebilen mekanik malzeme özellikleri kullanılarak, n değeri denklem 6.3 ile hesaplanır.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} \quad (6.3)$$

Denklem 6.2, mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekil değiştirmesi değerlerini tanımlanmaktadır. Bu değerlerin ABAQUS yazılımında kullanılmak üzere gerçek

gerilme ve gerçek şekil değıştirme değerlerine dönüştürölmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, sonlu eleman modellerinde plastik bölgede daha gerçekçi bir malzeme tanımı yapılabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (6.4, 6.5).

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng}(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (6.5)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

σ_{true} : Gerçek gerilme değeri, MPa.

σ_{eng} : Mühendislik gerilme değeri, MPa.

ε_{true} : Gerçek şekil değıştirme.

ε_{eng} : Mühendislik şekil değıştirmesi.

T-parçaların gerilme - şekil değıştirme değeri belirlenmesi için n katsayısı hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_u = 0,683$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 520 \text{ MPa}$$

$$F_y = 295 \text{ MPa}$$

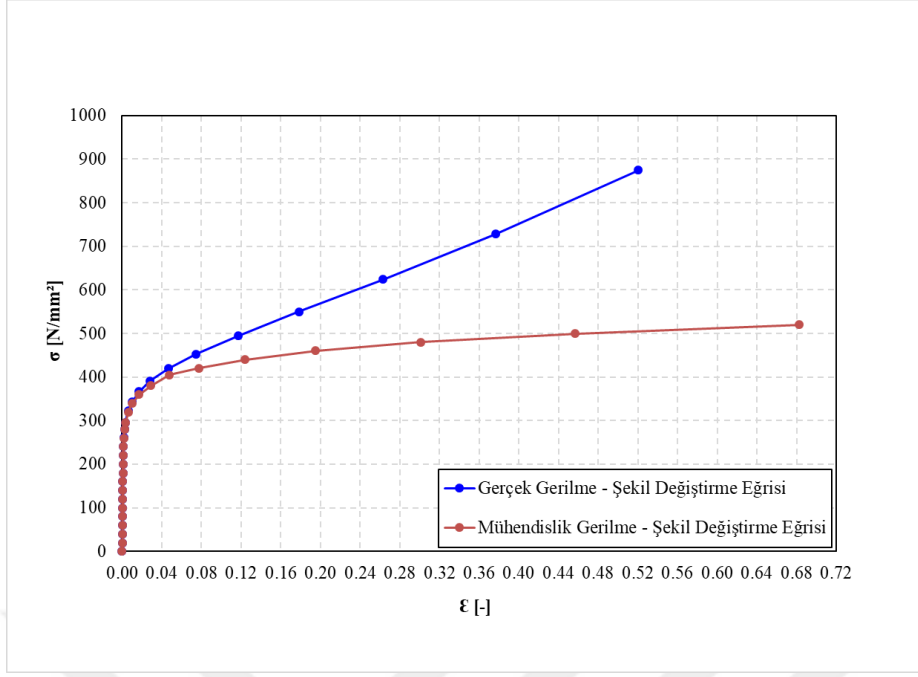
$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,683 - \frac{520}{210000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{520}{295}\right)} = 10,3$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değıştirme değeri elde edilmiş ve bu değeri kullanarak gerçek gerilme - şekil değıştirme değeri hesaplanmıştır (Çizelge 6.5).

Çizelge 6.5 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçalar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

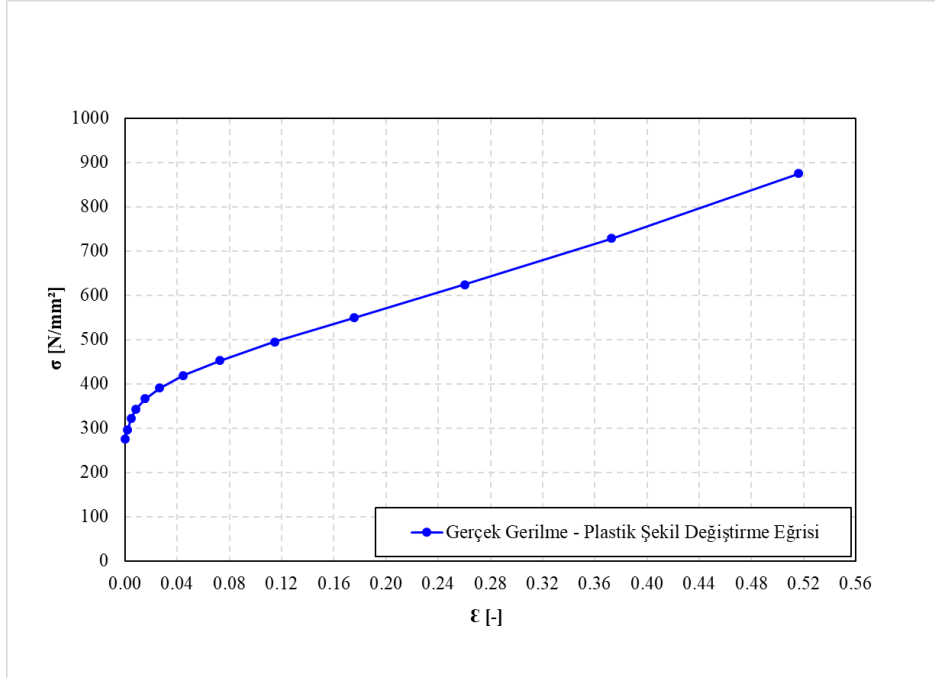
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0014	240	0,0014
260	0,0018	260	0,0018
280	0,0025	281	0,0025
295	0,0034	296	0,0034
320	0,0061	322	0,0061
340	0,0102	343	0,0102
360	0,0172	366	0,0171
380	0,0288	391	0,0284
400	0,0477	419	0,0466
420	0,0777	453	0,0748
440	0,1242	495	0,1170
460	0,1950	550	0,1781
480	0,3009	624	0,2631
500	0,4568	728	0,3763
520	0,6827	875	0,5204

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.4'te gösterilmektedir.



Şekil 6.4 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrisi.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.5'te gösterilmektedir.



Şekil 6.5 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.

Referans alınan çalışmada, deneysel sonuçlar doğrultusunda T-parçanın başlığında, gövde ile başlığın kaynakla birleştirildiği ısıl olarak etkilenmiş bölgede (heat affected zone – HAZ) kırılma meydana geldiği vurgulanmaktadır. Isıl olarak etkilenmiş bölgede kalan kısımlar, esas metale kıyasla daha gevrek bir davranış sergileme eğilimindedir. Bu durum, T-parçanın başlığında yer alan kaynaklı birleşim bölgesinde, çekme dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme değerinin $\varepsilon_{u,HAZ} = 0,80\varepsilon_u$ olarak tanımlanmasıyla malzeme modeline yansıtılmıştır. Bu doğrultuda, ilgili bölgeye ait n parametresi bu yeni kabul üzerinden yeniden hesaplanmıştır.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{u,HAZ} - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,683 \times 0,80 - \frac{520}{210000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{520}{295}\right)} = 9,1$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.6).

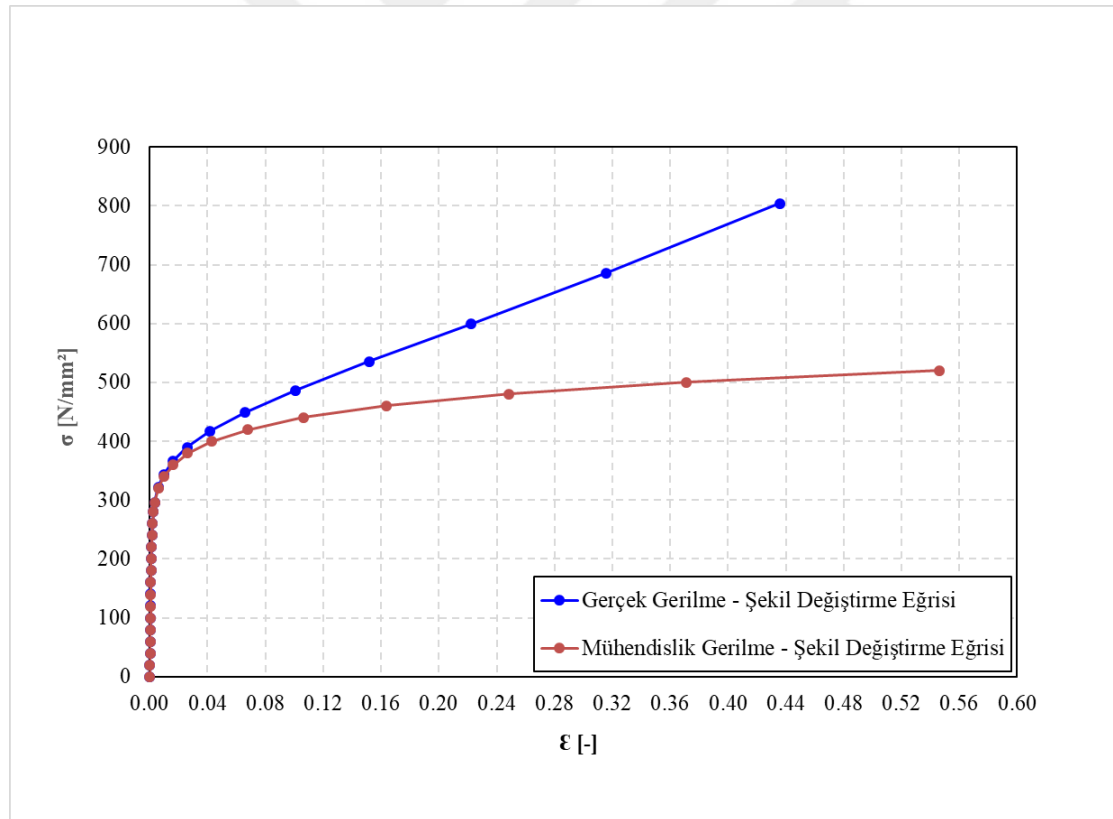
Çizelge 6.6 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısıl olarak etkilenmiş bölgesi için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0012	220	0,0012
240	0,0014	240	0,0014
260	0,0018	260	0,0018
280	0,0025	281	0,0025
295	0,0034	296	0,0034
320	0,0060	322	0,0060
340	0,0098	343	0,0097

Çizelge 6.6 (Devam): TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısı olarak etkilenmiş bölgesi için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
360	0,0160	366	0,0159
380	0,0263	390	0,0259
400	0,0425	417	0,0416
420	0,0678	448	0,0656
440	0,1063	487	0,1010
460	0,1639	535	0,1518
480	0,2487	599	0,2221
500	0,3713	686	0,3158
520	0,5462	804	0,4358

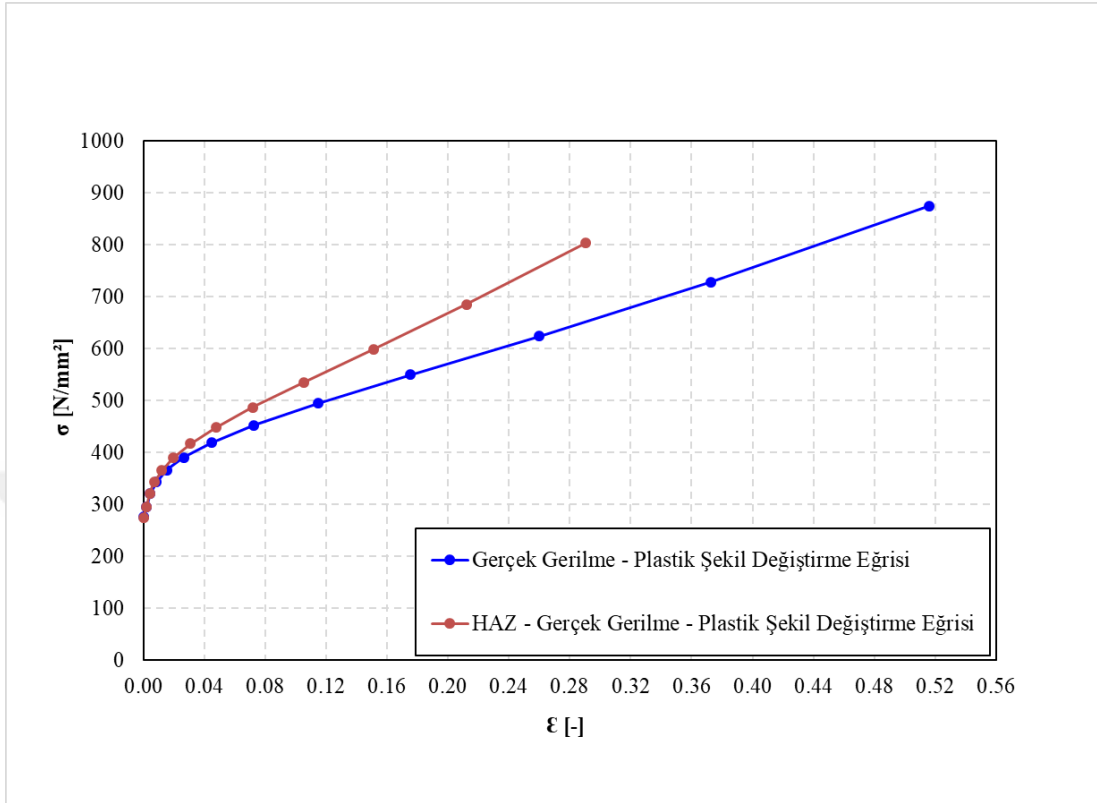
Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.6’da gösterilmektedir.



Şekil 6.6 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısı olarak etkilenmiş bölgesi için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrileri.

Isıl olarak etkilenmiş bölgede ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi, bu bölge dışındaki kısımlardaki gerçek

gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisiyle birlikte karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.7’de gösterilmektedir.



Şekil 6.7 : TS-CYC 04 numunesindeki T-parçaların ısıl olarak etkilenmiş ve etkilenmemiş kısımları için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

Kiriş elemanının gerilme - şekil değiştirme değerleri de benzer şekilde n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,231$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 546 \text{ MPa}$$

$$F_y = 405 \text{ MPa}$$

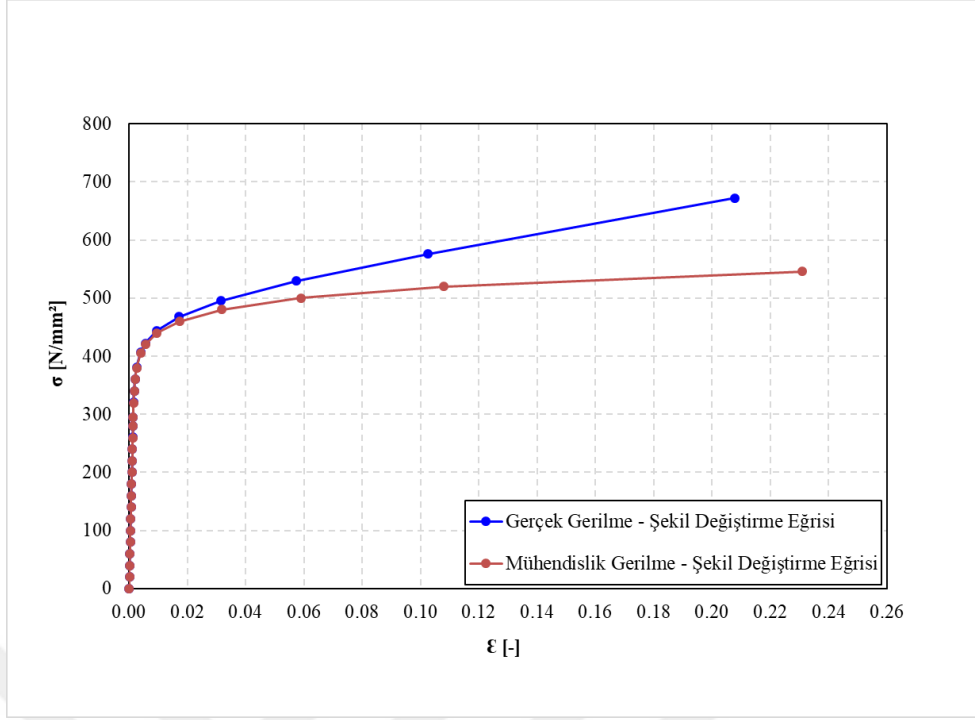
$$n = 15,9$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.7).

Çizelge 6.7 : TS-CYC 04 numunesindeki kırış için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

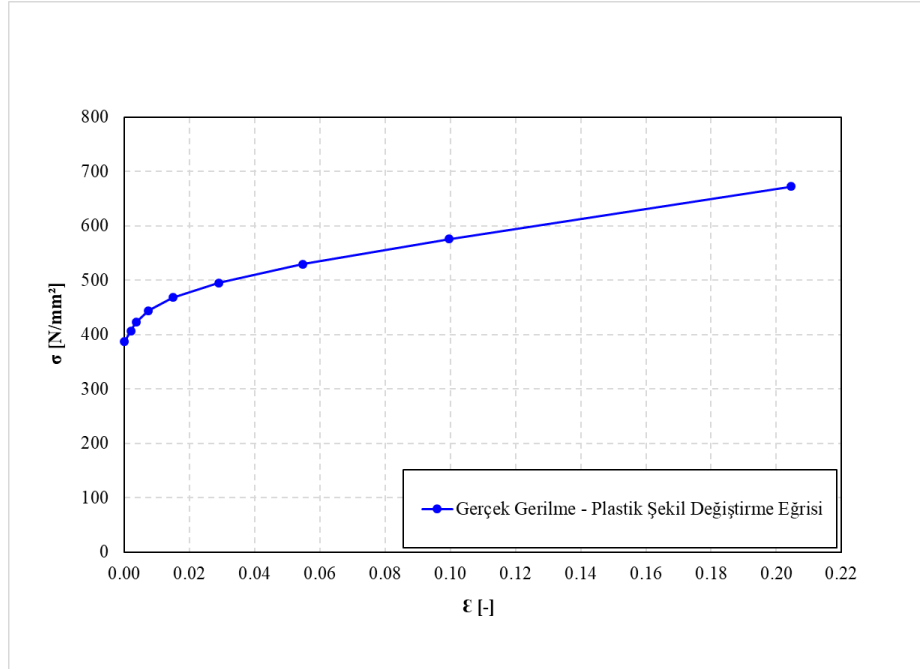
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0010	220	0,0010
240	0,0011	240	0,0011
260	0,0012	260	0,0012
280	0,0013	280	0,0013
295	0,0014	295	0,0014
320	0,0016	321	0,0016
340	0,0017	341	0,0017
360	0,0020	361	0,0020
380	0,0025	381	0,0025
405	0,0039	407	0,0039
420	0,0056	422	0,0055
440	0,0095	444	0,0095
460	0,0173	468	0,0171
480	0,0319	495	0,0314
500	0,0589	529	0,0573
520	0,1078	576	0,1024
546	0,2310	672	0,2078

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.8’de gösterilmektedir.



Şekil 6.8 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.9’da gösterilmektedir.



Şekil 6.9 : TS-CYC 04 numunesindeki kiriş için elde edilen gerçek gerilme –plastik şekil değiştirme eğrisi.

Kolon için de gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,246$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 523 \text{ MPa}$$

$$F_y = 430 \text{ MPa}$$

$$n = 15,9$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.8).

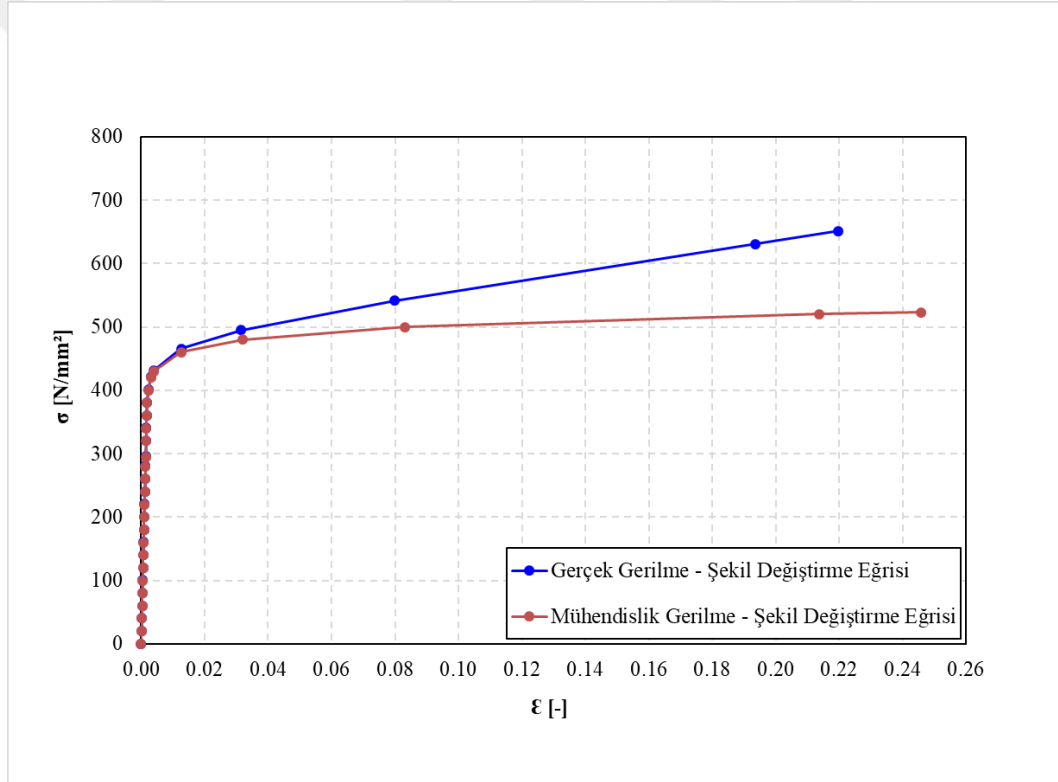
Çizelge 6.8 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0010	220	0,0010
240	0,0011	240	0,0011
260	0,0012	260	0,0012
280	0,0013	280	0,0013
295	0,0014	295	0,0014
320	0,0016	321	0,0016
340	0,0017	341	0,0017
360	0,0020	361	0,0020
380	0,0025	381	0,0025
405	0,0039	407	0,0039
420	0,0056	422	0,0055

Çizelge 6.8 (Devam): TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

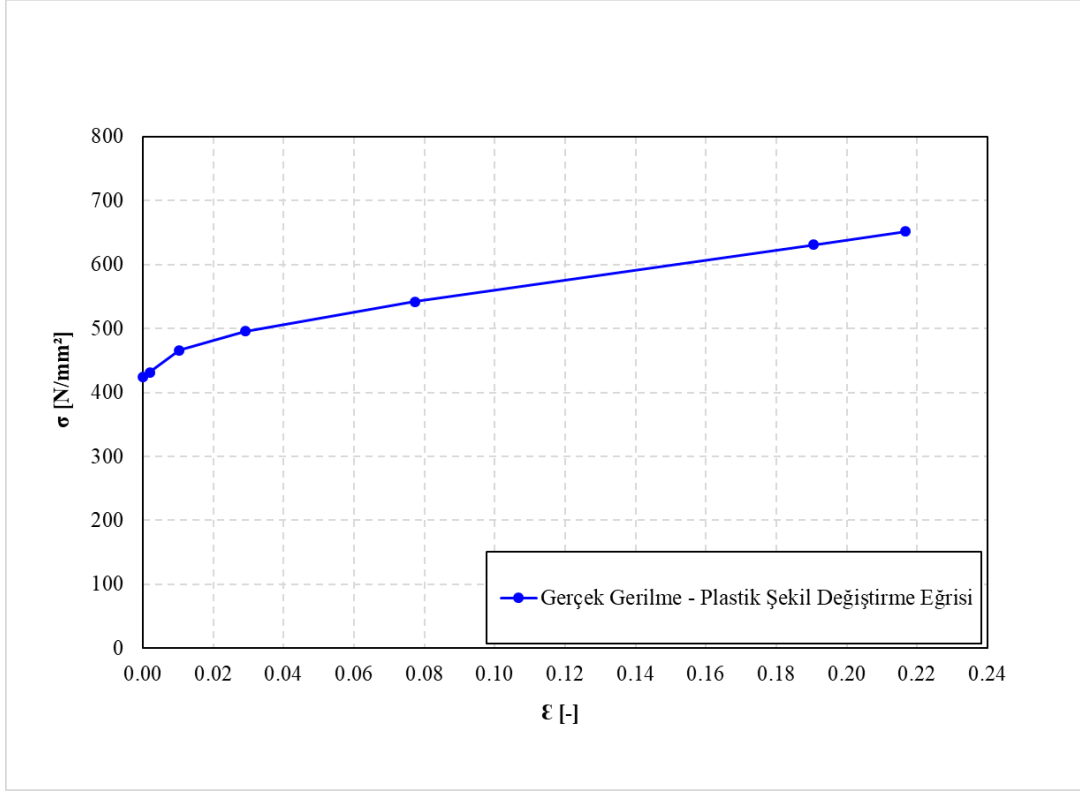
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
440	0,0095	444	0,0095
460	0,0173	468	0,0171
480	0,0319	495	0,0314
500	0,0589	529	0,0573
520	0,1078	576	0,1024
546	0,2310	672	0,2078

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.10’da gösterilmektedir.



Şekil 6.10 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.11’de gösterilmektedir.



Şekil 6.11 : TS-CYC 04 numunesindeki kolon için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,034$$

$$E = 210000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 900 \text{ MPa}$$

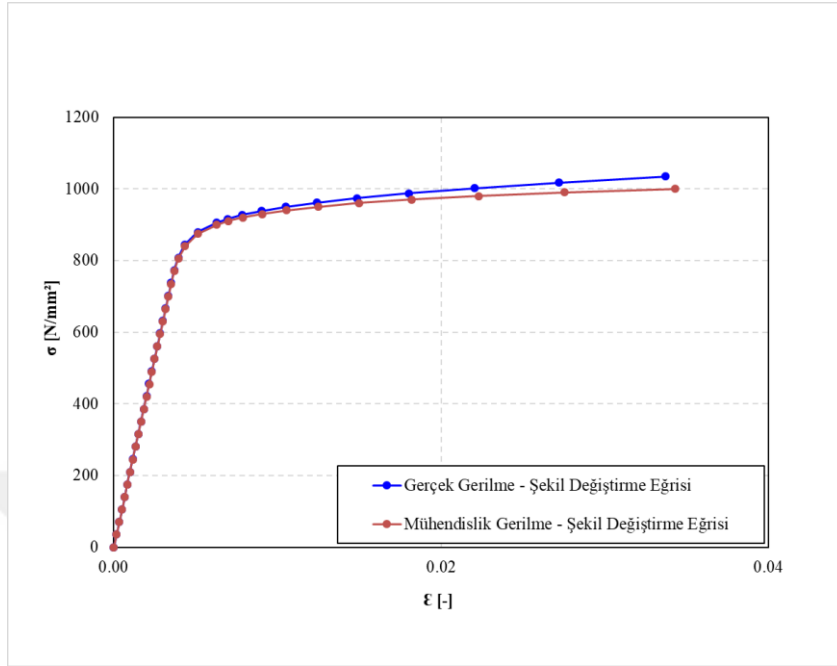
$$n = 25,6$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerlerinin elde edilip, ardından bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

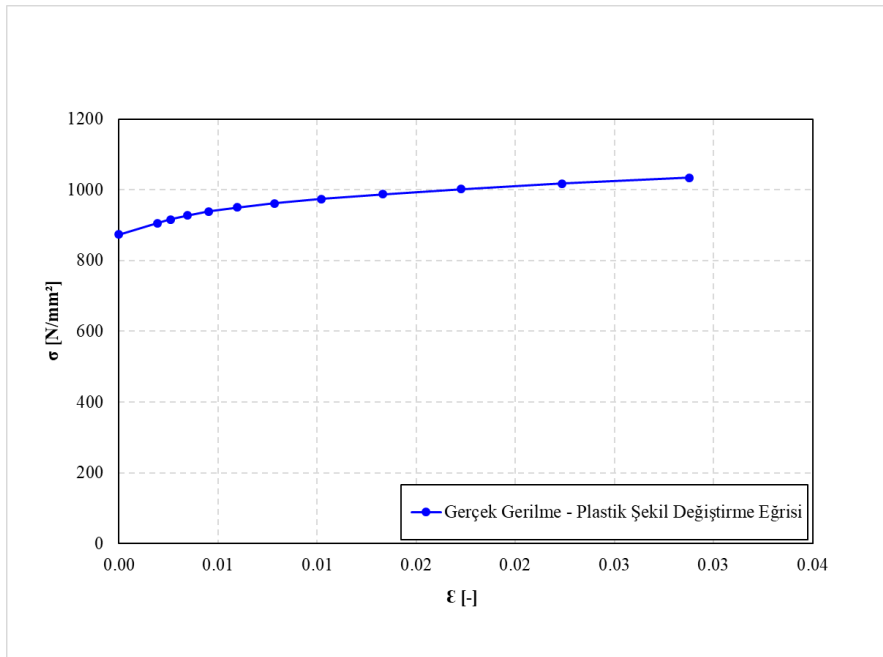
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0003	70	0,0003
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0008	175	0,0008
210	0,0010	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0013	280	0,0013
315	0,0015	315	0,0015
350	0,0017	351	0,0017
385	0,0018	386	0,0018
420	0,0020	421	0,0020
455	0,0022	456	0,0022
490	0,0023	491	0,0023
525	0,0025	526	0,0025
560	0,0027	561	0,0027
595	0,0028	597	0,0028
630	0,0030	632	0,0030
665	0,0032	667	0,0032
700	0,0033	702	0,0033
735	0,0035	738	0,0035
770	0,0037	773	0,0037
805	0,0039	808	0,0039
840	0,0043	844	0,0043
875	0,0051	879	0,0051
900	0,0063	906	0,0063
910	0,0070	916	0,0070
920	0,0079	927	0,0079
930	0,0091	938	0,0090
940	0,0106	950	0,0105
950	0,0125	962	0,0124
960	0,0150	974	0,0149
970	0,0182	988	0,0180
980	0,0223	1002	0,0220
990	0,0276	1017	0,0272
1000	0,0343	1034	0,0337

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.12’de gösterilmektedir.



Şekil 6.12 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.13’te gösterilmektedir.



Şekil 6.13 : TS-CYC 04 numunesindeki bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Elde edilen akma sonrası gerilme - plastik şekil değiştirme değerleri, ABAQUS yazılımında birleşik pekleşme (combined hardening) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Kumar ve diğ. (2015), tekrarlı yükler altındaki davranışta izotropik pekleşme tanımının yetersiz kaldığını, anizotropik durumları ve dayanım azalmasını dikkate alan Bauschinger etkisini temsil edebilen kinematik pekleşme modelinin de dikkate alındığı, yükleme yönünün etkisini göz önünde bulunduran birleşik pekleşme tanımının kullanabileceğini belirtmiştir. Birleşik pekleşme modelinin kinematik pekleşme bileşeni için yarım çevrim (half cycle) modeli esas alınmaktadır. İzotropik pekleşme bileşeni için ise, çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) modeli kullanılmaktadır.

Krolo ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, S275 ve S355 çelikleri için nümerik modellerde kullanılan birleşik pekleşme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre nümerik modeller kalibre edilmiştir (Çizelge 6.10). Bu çalışma sonucunda, birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşenine ait çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) özelliğinin nümerik modelde tanımı için gerekli olan Q ve b parametreleri belirlenmiştir. Bu doğrulama çalışmasında, söz konusu parametreler; T-parçalar ve kiriş elemanları için S275, kolon elemanları için ise S355 yapı çeliği için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.10 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).

Yapısal Çelik Sınıfı	Q [MPa]	b [-]
S275	25,6	4,4
S355	20,8	3,2

Birleşimde hasar oluşumu, sünek hasar modeli (ductile damage model) kullanılarak değerlendirilecektir. Birleşimin tasarımı, plastik deformasyonların T-parçada meydana gelmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle, hasar durumunun gözlenebilmesi için sünek hasar modeli, T-parçaların malzeme davranışının modellenmesinde dikkate alınacaktır.

Hasar oluşum modeli için sünek hasar başlatma kriteri (ductile criterion) kullanılacaktır. Bu kritere göre, hasarın başladığı andaki, hasar katsayısının sıfır olduğu ($D = 0$) eşdeğer plastik şekil değiştirmenin ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$) belirlenmesi gerekmektedir.

Bu değer, tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerine karşı gelen ε_u şekil değiştirme değerine eşit olarak alınabilir (Krolo, 2017). Ancak çevrimsel yükleme etkisindeki bir elemanın incelendiği durumlarda tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar beklenen davranışı yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Krolo (2017) tarafından yapılan çalışmada, çok sayıda çelik levha numunesinin çevrimsel yükler altında analizleri yapılmış ve numuneler için gerilme – şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda, çevrimsel yükleme etkisindeki davranışın nümerik olarak da temsil edilebilmesi için birleşimlerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve deney sonucu elde edilen gerilme - şekil değiştirme değerlerine yakınsayacak eşdeğer plastik şekil değiştirme değerleri ($\bar{\varepsilon}_D^{pl}$) kalibre edilmiştir. Kalibrasyon çalışmasının S355 yapı çeliği için gerçekleştirildiği, ancak S275 yapı çeliği için de S355 yapı çeliği için elde edilen değerlerin kullanılmasının uygun olduğu belirtilmektedir.

Referans alınan çalışmada, çelik malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, tekrarlı yükler altındaki davranışın karakterize edilmesine yönelik çekme-basınç testleri ile ilgili bir bilgi bulunmadığından, Krolo (2017) tarafından doktora tezi kapsamında kalibre edilen parametrelerden yararlanılmıştır. (Çizelge 6.11).

Doğrulama modelindeki elemanlar çok eksenli gerilmeler etkisindedir. Bu nedenle, sünek hasar başlatma kriterinin hasarın başlangıcındaki eşdeğer plastik şekil değiştirmenin ($\bar{\varepsilon}_D^{pl}$), gerilme üç eksenliliğinin η bir fonksiyonu olarak ABAQUS yazılımında tanımlanması gerekir. Ayrıca $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$, şekil değiştirme hızına da ($\dot{\varepsilon}_0^{pl}$) bağlıdır. Bu parametreler, deneysel çalışmalarda kullanılan yöntem ve yükleme durumuna bağlı olarak belirlenmektedir. Bu parametreler incelenen çalışmanın makalesinde bulunmadığından literatürde benzer yapı çeliklerinin kullanıldığı bir çalışmadan elde edilecektir. Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çeliği ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar kullanılarak eşdeğer plastik şekil değiştirme değerleri farklı gerilme üç eksenliliği değerlerine göre elde edilmiştir (Çizelge 6.11). Krolo (2017) tarafından yapılan çalışmalarda şekil değiştirme hızı olarak 0,001 değerinin kullanıldığı belirtilmiştir. ABAQUS yazılımında sünek hasar başlatma kriteri değerleri, bu şekil değiştirme hızı değeriyle birlikte tanımlanmıştır.

Çizelge 6.11 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ε_D^{pl}	Gerilme Üç Eksenliliği	Şekil Değiştirme Hızı
0,6308	0,330	0,001
0,6249	0,380	0,001
0,6188	0,430	0,001
0,6124	0,480	0,001
0,6061	0,520	0,001
0,5996	0,570	0,001
0,5931	0,610	0,001

Hasar başlangıcı ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra, hasarın gelişimi ile ilgili gerekli modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. Malzemede hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri (ε_f^{pl}), Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çelikleri için gerçekleştirilen çekme testleri kapsamında elde edilmiştir. Bu değer, S275 yapı çeliği için çekme dayanımı değerine karşılık gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 2,6 katı; S355 yapı çeliği için ise çekme dayanımına karşı gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 3,0 katı şeklinde verilmektedir. Makalede net olarak belirtilmese de rapor edilen akma gerilmesi değeri dikkate alındığında T-parçanın malzemesinin S275 olduğu tahmin edilmektedir. Bu bilgiler kullanılarak, $\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl}$ olacak şekilde tanımlanmıştır. Ancak, birleşimin tasarımı, plastik deformasyonların T-parçada meydana gelmesi prensibine dayandığından, deney sonucunda hasarın T-parçanın başlığında, başlık ile gövdenin kaynak uygulanarak birleştiği, ısıl olarak etkilenmiş bölgede meydana geldiği belirtilmiştir. Bu nedenle, hasar tanımı T-parçaların başlıklarında yapılmıştır. Bu bölgedeki malzeme modelinde daha gevrek bir davranışın benimsenmesi uygun görülmüştür. Bu nedenle, toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaştığında oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri $\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl}$ %20 azaltılmıştır. Bu değer, sonlu eleman analiziyle yapılan iterasyonlarla kalibre edilmiştir.

$$\varepsilon_f^{pl} = 0,80(2,6\varepsilon_D^{pl}) = 0,20 \times 2,6 \times 0,631 = 1,31$$

Bu değer kullanılarak kırılma anında plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) denklem 6.6 ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} \quad (6.6)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L : Eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$: Hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_D^{pl}$

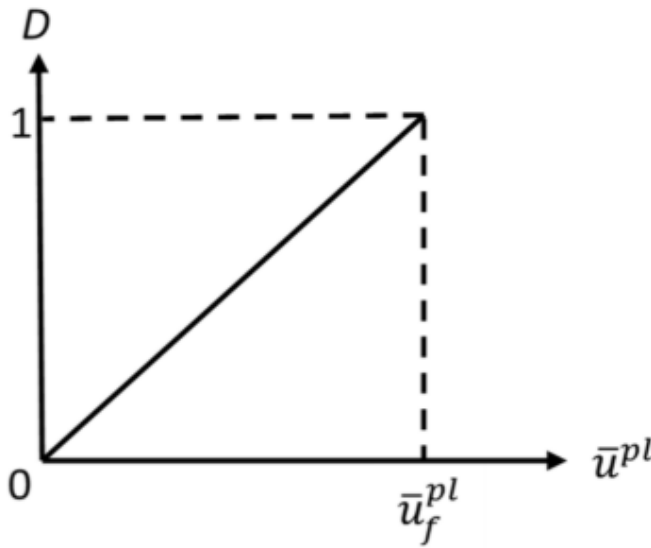
$$\eta = 1/3 \text{ için, } \varepsilon_0^{pl} = \bar{\varepsilon}_D^{pl}$$

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_0^{pl} = 1,31 - 0,63 = 0,68$$

Eleman karakteristik uzunluğu L , elemanın hacminin küp kökü alınarak belirlenir. Sonlu eleman modellerinde en yüksek plastik deformasyonun beklendiği T-parçalarda ortalama eleman uzunluğu $L = 3,50 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerle, kırılma anında plastik yer değiştirme $\bar{u}_f^{pl}$ hesaplanmıştır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} = 3,50 \times 0,68 = 2,40 \text{ mm}$$

Plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) değeri, ABAQUS yazılımında “damage evolution” tanımı altında, hasar değişkeninin (D), plastik yer değiştirme ile ilişkisinin doğrusal olarak tanımlandığı “linear softening” modeli ile tanımlanmıştır (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 : Hasar değişkeni ile plastik yer değiştirmenin doğrusal ilişkisi.

6.1.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar

Makalede çelik elemanlar arasındaki temas yüzeyleri ile ilgili bir bilgi bulunmaması nedeniyle temas yüzeyleri arasında sürtünme katsayısı 0,30 olarak kabul edilmiştir.

Bulonlara tam önçekme kuvvetinin uygulanacağı varsayılmıştır. Bulon başlıkları kolaylık açısından daire şeklinde modellenmiştir. Makalede belirtilmemesi nedeniyle, bulon delikleri standart bulon deliğini yansıtmaması açısından bulon çapından 2 mm toleranslı olacak şekilde modellenmiştir.

6.1.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli

Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmaktadır. Tamamlayıcı yüzeyler içerisine belli ölçüde geçebilen esas yüzeyler, birleştirilen elemanlardan daha rijit ve daha seyrek sonlu eleman ağına sahip olanı olarak seçilir.

6.1.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim

Birleşim modellerinde yer alan bulonlu birleşimlerde, bulonların gövdesinin levhalardaki ve kirişteki delikler ve levhaların temas eden yüzeyleri arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanacaktır.

Birleşim yüzeylerinin normal bileşeninin davranışını belirlemede “Hard Contact” modeli kullanılacaktır. Teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modeli dikkate alınacaktır. Teğetsel davranış modeli, temas yüzeyleri arasında oluşması beklenen sürtünme etkisinin formülasyonu olarak “Penalty” özelliği seçilmek suretiyle, elemanların yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı makalede belirtilmediği için 0,30 olarak varsayılmıştır.

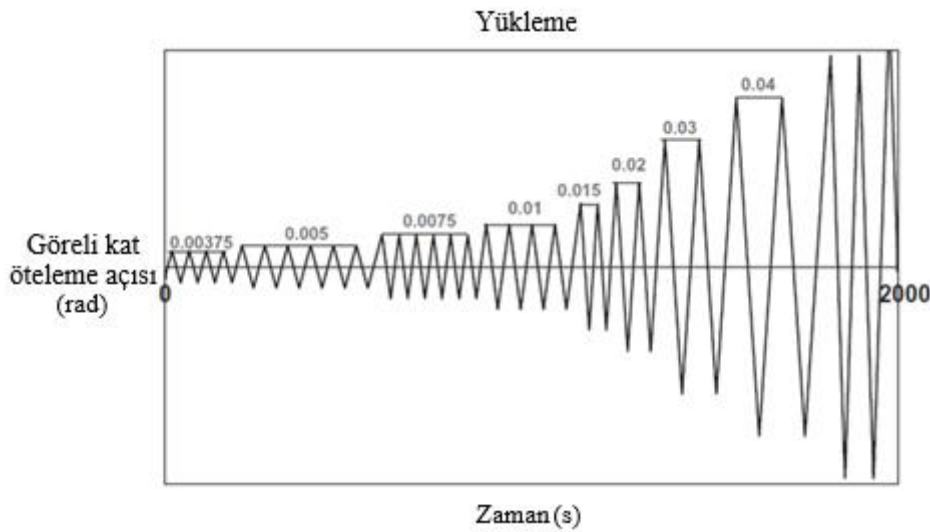
6.1.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması

Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması ile sağlanmaktadır. Kaynak işlemi uygulanarak teşkil edilen birleşimler için, kaynak malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, bu etkileşim modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

6.1.9 Analiz yöntemi

Modelin sonlu eleman analizi için ABAQUS yazılımında temel olarak iki analiz adımı oluşturulmuştur. Mesnet tanımları, malzeme modelleri, eleman tipleri, sonlu eleman ağının uygulanması gibi modellerle ilgili temel özellikler başlangıç adımında (initial step) tanımlanarak analizin diğer adımları için hazır hale getirilmiştir.

AISC 341-22 Bölüm K2b.4'te tanımlanan yükleme protokolü, kiriş ucundaki enkesitin tamamına yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 6.15).



Şekil 6.15 : Yük protokolü.

Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak zaman tanım alanında (direct integration) dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yüklemenin görelî olarak yavaş gerçekleştiği ve atalet etkilerinin sınırlı olduğu durumları temsil eden “quasi-static” (yarı-statik) yaklaşım kapsamında uygulanmıştır. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için “Full Newton-Raphson yöntemi” tercih edilmiştir. Sünek malzeme davranışı içeren hasar modelleri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi genellikle simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu durum, çözüm algoritmasının yakınsama davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ABAQUS yazılımının çözüm seçenekleri arasında yer alan ve simetrik olmayan sistem matrislerinin çözümüne olanak tanıyan “unsymmetric matrix solver” seçeneği, çözüm kararlılığını artırmak ve yakınsama problemlerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

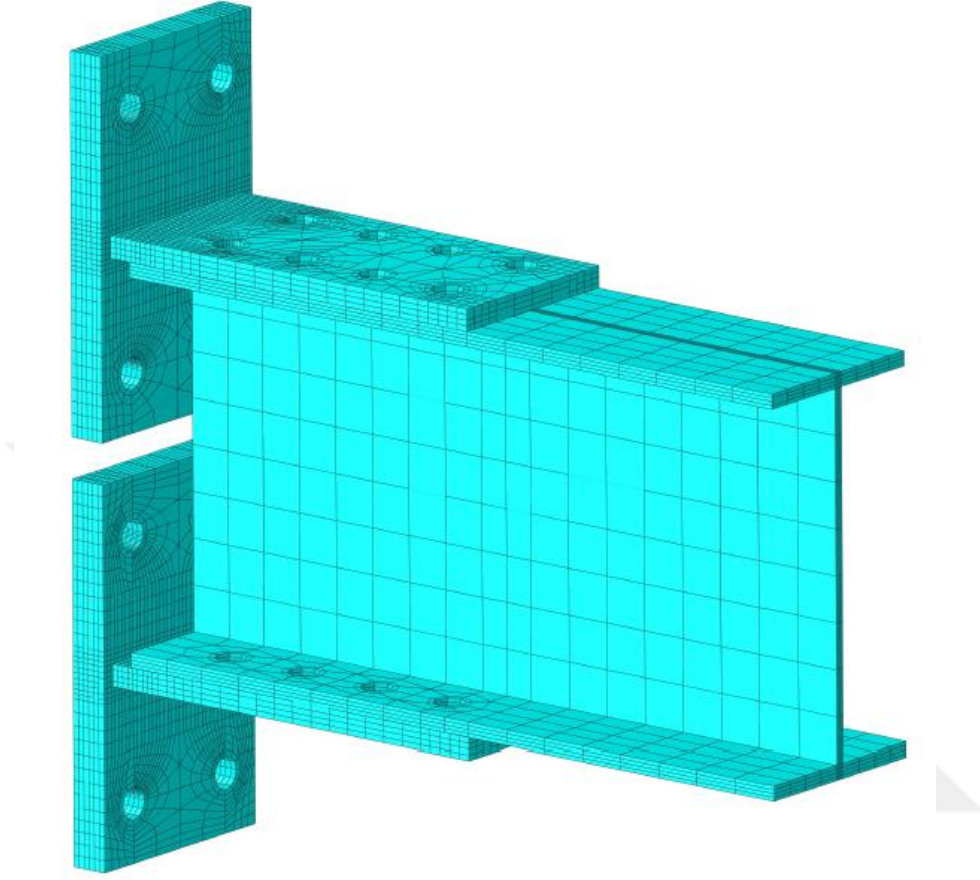
6.1.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı

Modelde, üç boyutlu katı, doğrusal ve azaltılmış integrasyon tanımı kullanılan C3D8R tipi 8 (sekiz) düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların, daha fazla integrasyon noktasına sahip ve dolayısıyla analiz sonucunun doğruluk oranı çok yüksek olan kuadratik eleman olan C3D20 elemanı ile gerilme dağılımları karşılaştırıldığında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, C3D8R elemanlarının kayma kilitlenmesi (shear locking) sorununa neden olmaması ve analiz süresini önemli ölçüde azaltması nedeniyle eğilme etkilerinin belirleyici olduğu yapısal analizlerde tercih edilmesi uygun görülmektedir (Han ve diğ, 2016).

Birleşim bölgeleri, plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı alanlar olduğundan, bu bölgelerde sonlu eleman ağı diğer bölgelere kıyasla daha sık tanımlanmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip bölgeler, çözüme uygun olan yapısal (structural) sonlu eleman ağı oluşturabilmek için, bölümlendirme (partition) özelliği kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Böylece farklı geometrideki bir elemanın bölündüğü düzlem üzerinde iki farklı geometri arasında ortak noktalar oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda oluşturulan ortak düğüm noktaları sayesinde, yazılım aynı eleman üzerinde yer alan farklı geometrileri birbirinden ayırt edebilmekte ve bu sayede düzenli ve uyumlu bir katı eleman ağı oluşturulabilmektedir.

Sonlu eleman modelinin doğru yapısal davranışı yansıtabilmesi açısından, elemanların kalınlığı boyunca kaç katmana bölündüğü son derece kritiktir. Han ve diğ. (2016) tarafından, AISC-358’de tanımlı kirişin kolona doğrudan kaynaklı olduğu kiriş-kolon birleşiminin (WUF-W) tekrarlı yükler altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla birleşimin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan C3D8R elemanlarının kalınlık boyunca katman sayısının analiz sonuçlarına etkisini değerlendirmek için birleşimin belirli bir bölgesi, sırasıyla 1, 2, 4 ve 6 katman kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme dağılımları, 1 katmanlı model referans alınarak karşılaştırılmış ve 4 katmanlı modelin, 6 katmanlı modelle oldukça benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, C3D8R elemanlarıyla yapılan analizlerde kalınlık boyunca en az 4 katman kullanmanın, güvenilir ve istenilen yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmesi açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu bilgiler ışığında, elemanlar kalınlığı boyunca en az 4 katman olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 6.16).

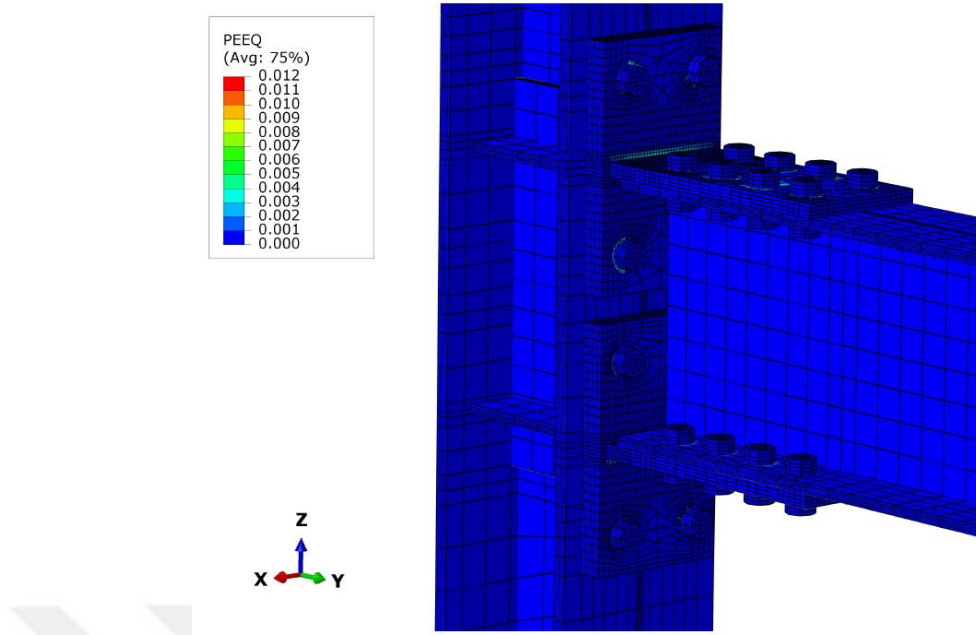


Şekil 6.16 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.

6.1.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

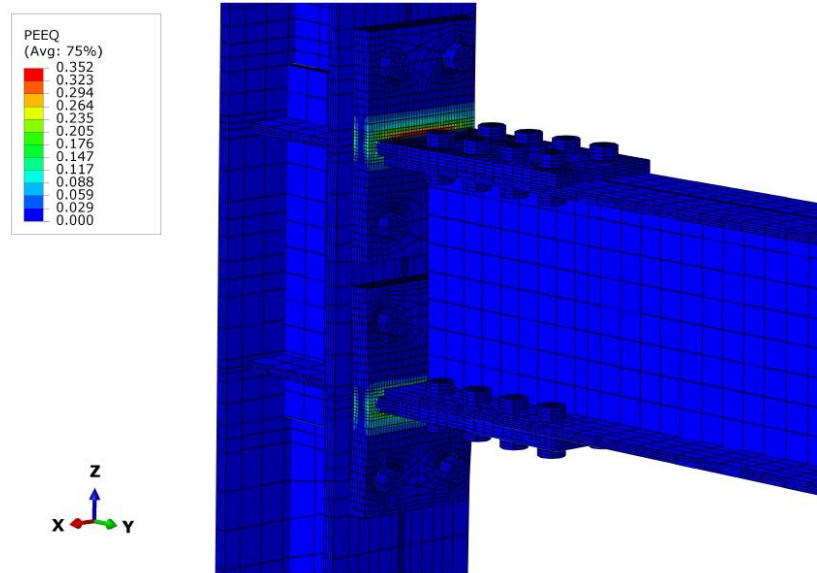
Referans alınan çalışma kapsamında deneyi yapılan TS-CYC 04 numunesinin sonlu eleman modeli, ilgili makalede sunulan verilerden yararlanılarak ve bu bölümde açıklanan modelleme esaslarına uygun şekilde ABAQUS yazılımında oluşturulmuş; model, tekrarlı yükler altında analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, söz konusu çalışmada raporlanan deneysel veriler ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum değerlendirilmiştir.

Analizde %1'lik göreceli kat öteleme açısına ulaşıldığında, T-parçaların başlığında, gövde ile başlığın birleştiği bölgenin ortasında, akma davranışının başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.17).



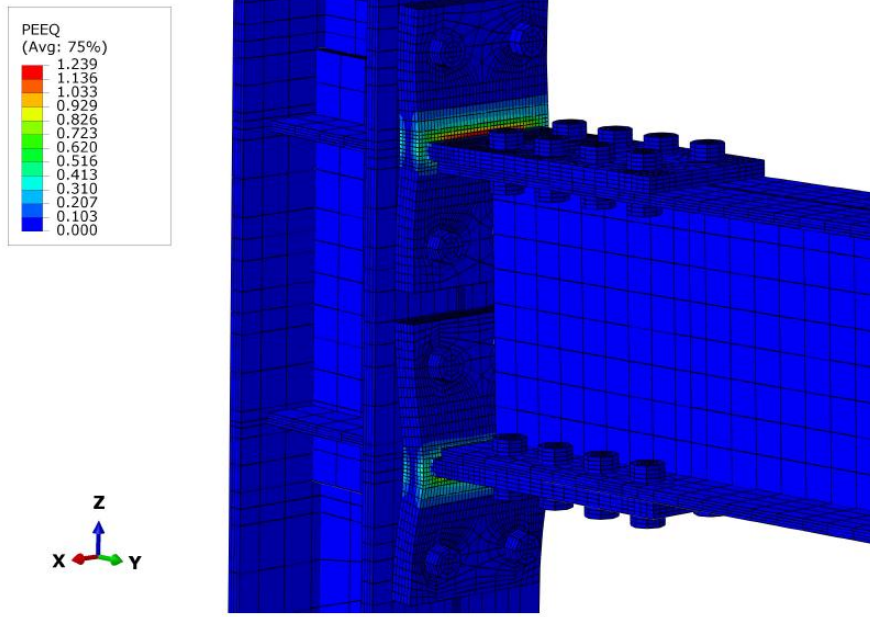
Şekil 6.17 : %1 görelî kat öteleme açısında T-parçanın başlığının orta bölgesinde akma davranışının başlangıcı.

İlerleyen adımlarda, plastik deformasyonların T-parçaların başlığının kenarına ve bulonların bulunduğu bölgeye doğru genişleyerek yayıldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.18).



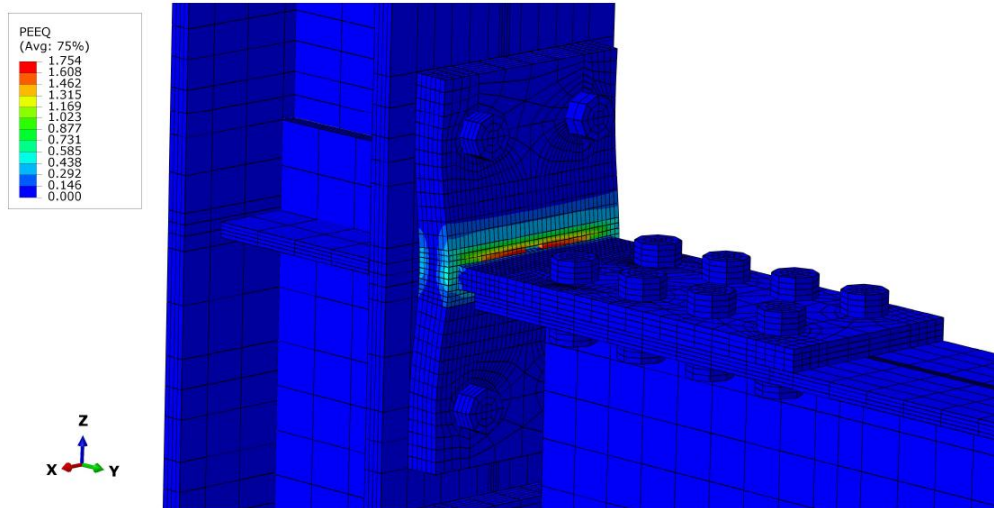
Şekil 6.18 : Plastik deformasyonların ilerleyen adımlarda yayılışı.

%4 görelî kat öteleme açısında, T-parça başlığındaki plastik deformasyonların giderek artmasıyla kalıcı eğilme deformasyonlarının oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.19).



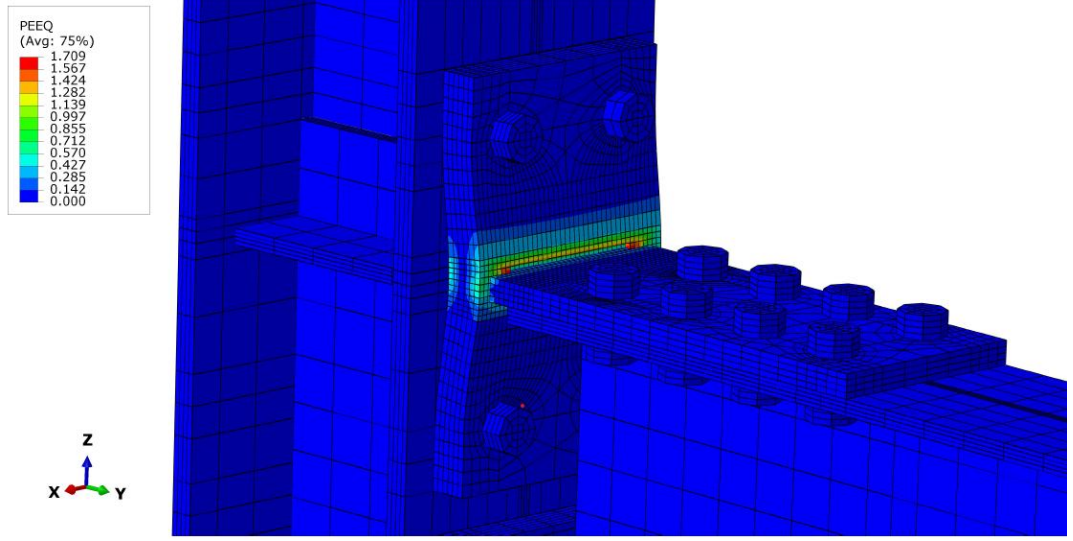
Şekil 6.19 : %4 görel kat öteleme açısında kalıcı eğilme deformasyonlarının oluşumu.

%6 görel kat öteleme açısında, T-parçanın başlığının orta bölgesinde yer alan bazı katı elemanlar, eşdeğer plastik şekil değiştirme değerinin, toplam hasar değişkeninin (D) 1 (bir) olduğu kritik değere ulaşmasıyla birlikte silinmeye başlamıştır. Bu durum, sonlu eleman modelinde T-parçanın başlığının orta bölgesindeki çatlak oluşumunu temsil etmektedir (Şekil 6.20).



Şekil 6.20 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumunun başlangıcı.

Oluşan çatlak, ilerleyen çevrimlerde T-parçaların başlıklarının orta bölgesinden kenarlarına doğru ilerlemiştir (Şekil 6.21).



Şekil 6.21 : Çatlağın levha kenarlarına doğru ilerlemesi.

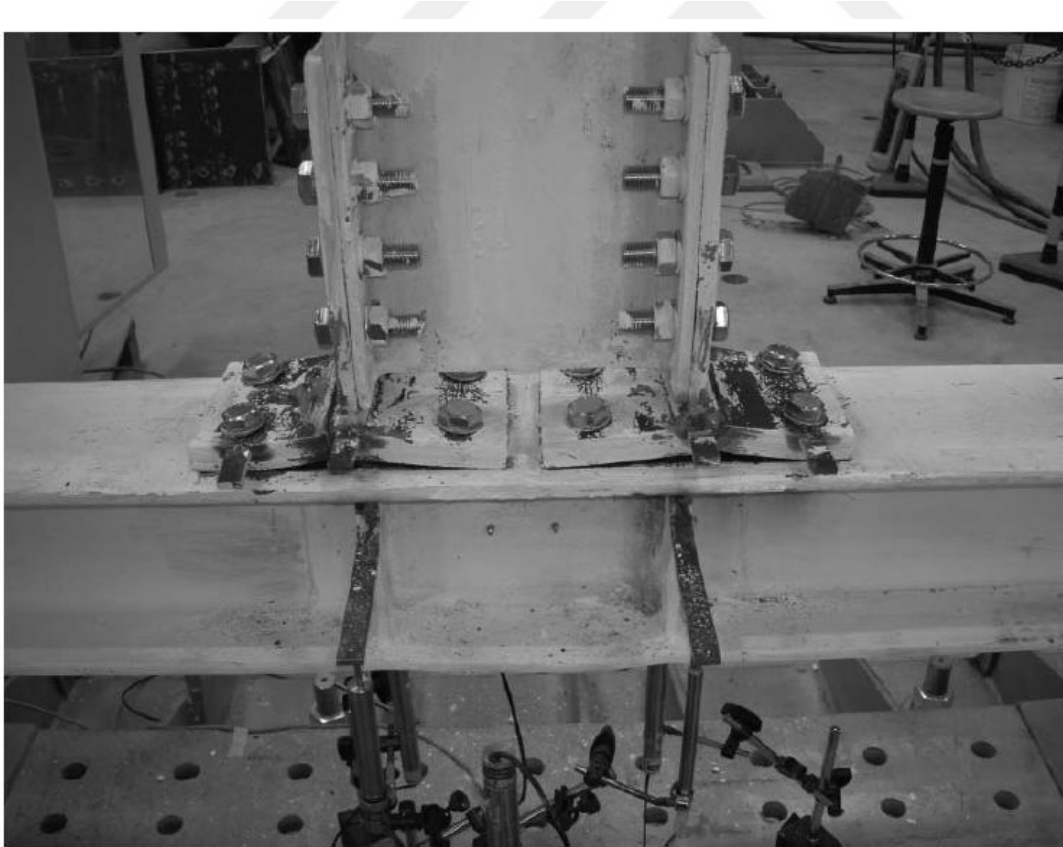
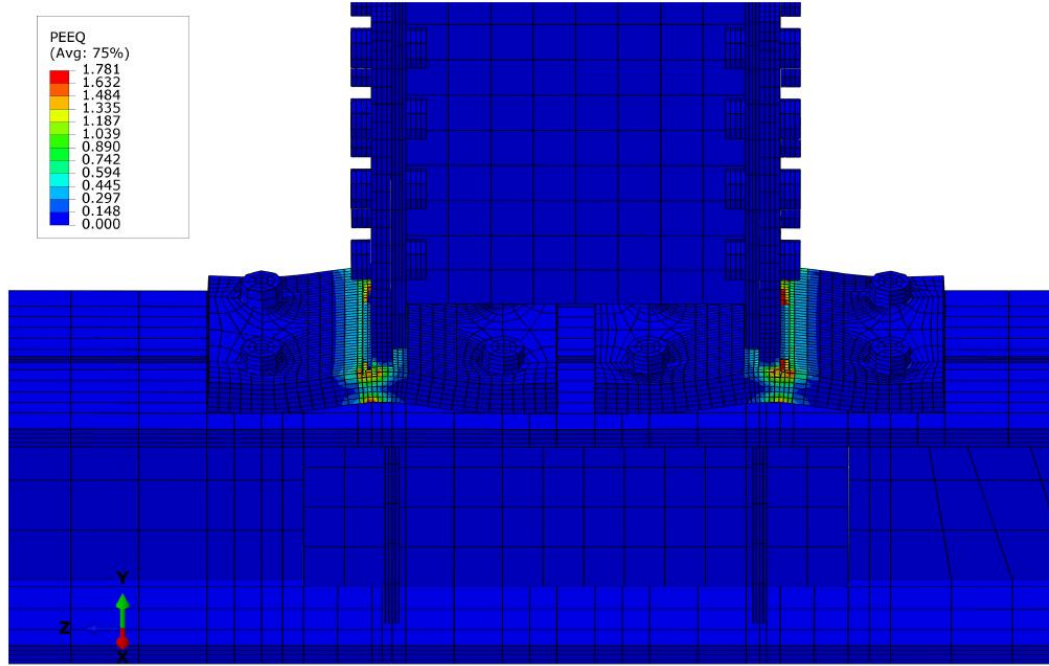
İlerleyen adımlarda, çatlak oluşumu eleman kalınlığı boyunca ilerlemeye başlamış ve analiz %8 göreceli kat öteleme açısında yakınsaklık sağlanamadığından sonlanmıştır.

Deneyisel çalışmada, plastik şekil değiştirmelerin T-parçaların başlıkları ile gövdeleri arasındaki bağlantı bölgesinde, özellikle T-parçaların başlıklarında yoğunlaştığı belirtilmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçları incelendiğinde, plastik deformasyonların söz konusu bölgede oluştuğu ve kiriş ile kolonda herhangi bir plastik deformasyonun oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sonlu eleman analizinin sonuçlarının deney sonuçlarıyla tutarlı olduğunu göstermektedir.

Makalede belirtildiği gibi, hasarın; T-parçanın başlıklarında, gövde ile kaynaklı bağlantının oluşturduğu ısıdan etkilenmiş bölgede meydana gelen çatlakların gelişimiyle ortaya çıktığı ifade edilmiştir. Yükleme çevrimlerinin artmasıyla birlikte, bu çatlakların başlığın iç kısmından kenarlarına doğru ilerlediği ve sürecin başlığın tamamen kırılmasıyla sonuçlandığı rapor edilmiştir. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizinde de hasarın T-parça başlığının orta bölgesinde başladığı ve kenarlara doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Yüklemin ileri adımlarında bu bölgedeki hasarın artmasıyla birlikte analizde yakınsama sağlanamamış; bu durum, başlığın tamamen kırıldığı bir hasar mekanizması olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, sonlu eleman modeli, deneyel sonuçlarla tutarlı şekilde hasar gelişimini yansıtabilmiştir.

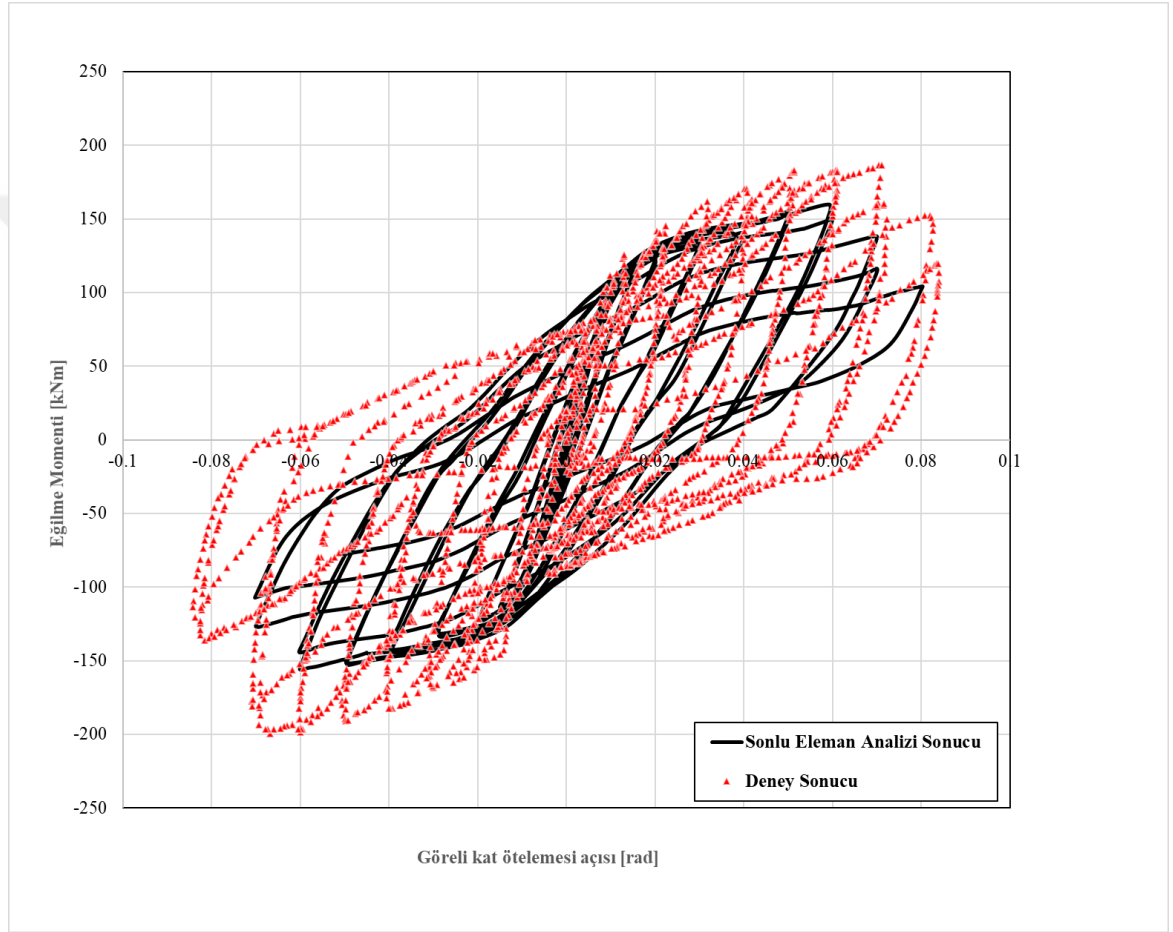
Şekil 6.22`de, makalede yer alan deney sonrasında şekil değiştirmiş ve hasar görmüş numune ile sonlu eleman analizinin son adımında elde edilen plastik deformasyon ve hasar durumu karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, plastik deformasyonların aynı bölgelerde yoğunlaştığı ve hasarın benzer konumlarda

meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, sayısal modelle elde edilen sonuçların deneysel bulgularla yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.22 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.

Analiz sonucunda, tekrarlı yükler altında birleşimin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, kolon merkezindeki normalize moment (M/M_p) ile görel kat ötelemesi açısı arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel eğriler oluşturulmuştur. Normalize eğilme momenti (M/M_p), kiriş merkezinde eğilme oluşan eğilme momentinin (M), kiriş plastik eğilme momenti kapasitesine (M_p) oranı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucu ve deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğriler Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.

Sonlu eleman analizi sonucu elde edilen çevrimsel eğri ile deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğrilerin karakteristiklerinin birbirleriyle yüksek düzeyde uyumlu olduğu görülmektedir.

Analizin ilerleyen adımlarında, T-parçanın başlığında meydana gelen plastik deformasyonların artmasıyla, T-parçanın başlığı ile kolon başlığı arasındaki yüzeyde kayma meydana gelmektedir. Bu durum, eğrilerde düşey doğrultuda gözlenen çevrim sıkışmasının temel nedenidir.

Her iki eğri de benzer genel davranış karakteristiği sergilemekte olup, deneysel eğrideki çevrim sıkışmasının daha yatay seyirli olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkın, bulonlara uygulanan ön çekme kuvveti ile temas yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısına oldukça duyarlı olduğu ve söz konusu parametrelere ilişkin detayların makalede net bir şekilde belirtilmediğinden, sonlu eleman analizi ile deney sonuçları arasındaki bu farkın kabul edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.

Eğriler incelendiğinde, eğilme momenti dayanımının deneysel çalışmada daha yüksek elde edildiği gözlemlenmiştir. Benimsenen modelleme esasları doğrultusunda oluşturulan sayısal modelin analiz sonuçlarında elde edilen eğilme momenti dayanımının daha düşük olması ise, güvenli tarafta kalındığının bir göstergesidir.

T-parçanın başlık levhasının orta bölgesinde meydana gelen çatlak oluşumu ve bu çatlağın levhanın kenarına doğru ilerlemesi deneyde elde edilen sonuçla benzer şekilde elde edilmiştir. Buna ek olarak, çevrimsel eğriler incelendiğinde çatlak oluşumu nedeniyle meydana gelen dayanım kaybı iyi bir şekilde temsil edilmiştir.

Analitik çalışma ile tam ölçekli deneyin sonuçları arasındaki bu uyumun bir sonucu olarak, doğrulama modelinin analizinde uygulanan modelleme esaslarının; bu çalışma kapsamında geliştirilen bulonlu ve kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş–zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin modellenmesinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.2 Bulonlu Alın Levhalı Birleşim Modelinin Doğrulanması

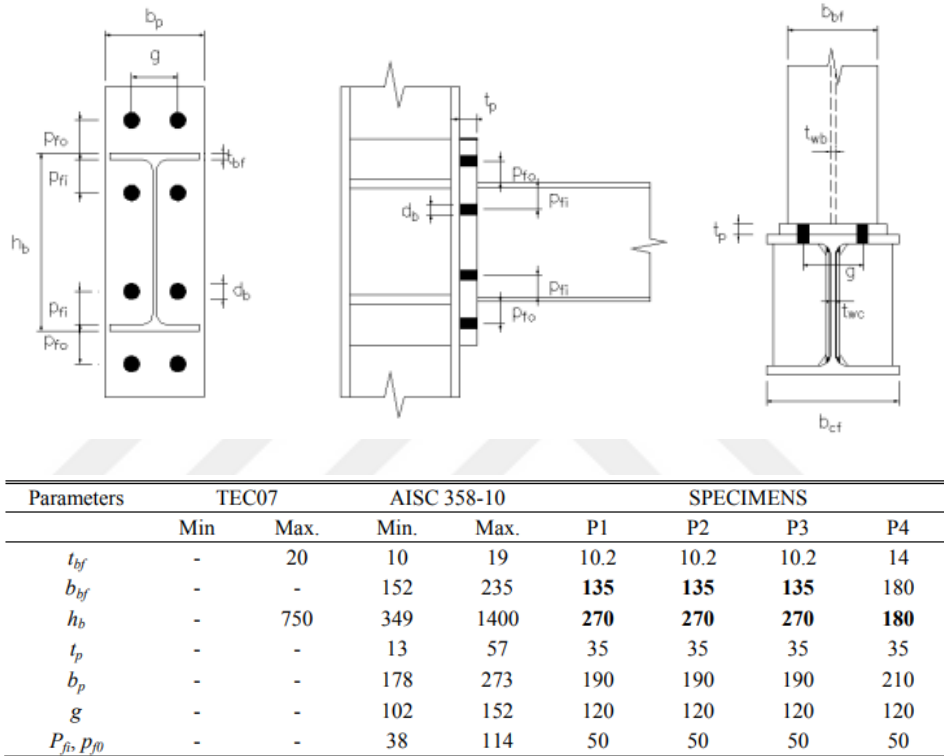
Bu çalışma kapsamında, bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin ABAQUS sonlu eleman modellerinin analizinde kullanılacak olan malzeme davranışı, katı eleman tipleri, yüzey etkileşimleri gibi modelleme esasları, daha önce deneyi yapılan benzer bir kiriş-kolon birleşimi dikkate alınarak doğrulanacaktır.

6.2.1 Esas alınan deneysel çalışma

Doğrulama çalışması için Akgönen ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma esas alınmıştır. Bu araştırmanın amacı, kiriş başlığı genişliği ve toplam kiriş yüksekliği açısından AISC 358-10 standardında belirtilen sınırlamaları karşılamayan Avrupa standardına uygun çelik profillerinden oluşan, rijitleştirici levhanın

kullanılmadığı moment aktaran 4 (dört) bulonlu alın levhalı birleşimlerinin deprem yükleri altındaki uygunluğunu incelemektir.

Çalışmada toplam dört adet numune test edilmiştir. Bu tez kapsamında, bu numunelerden biri olan P3 adlı birleşim ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiştir. Birleşimde, kiriş elemanı olarak IPE 270; kolon elemanı için ise HE 320 B profili kullanılmıştır. Birleşim detayı değişkenleri ve birleşimlerin geometrileri Şekil 6.24'te gösterilmektedir.



Şekil 6.24 : Birleşim numunelerinin geometrisi.

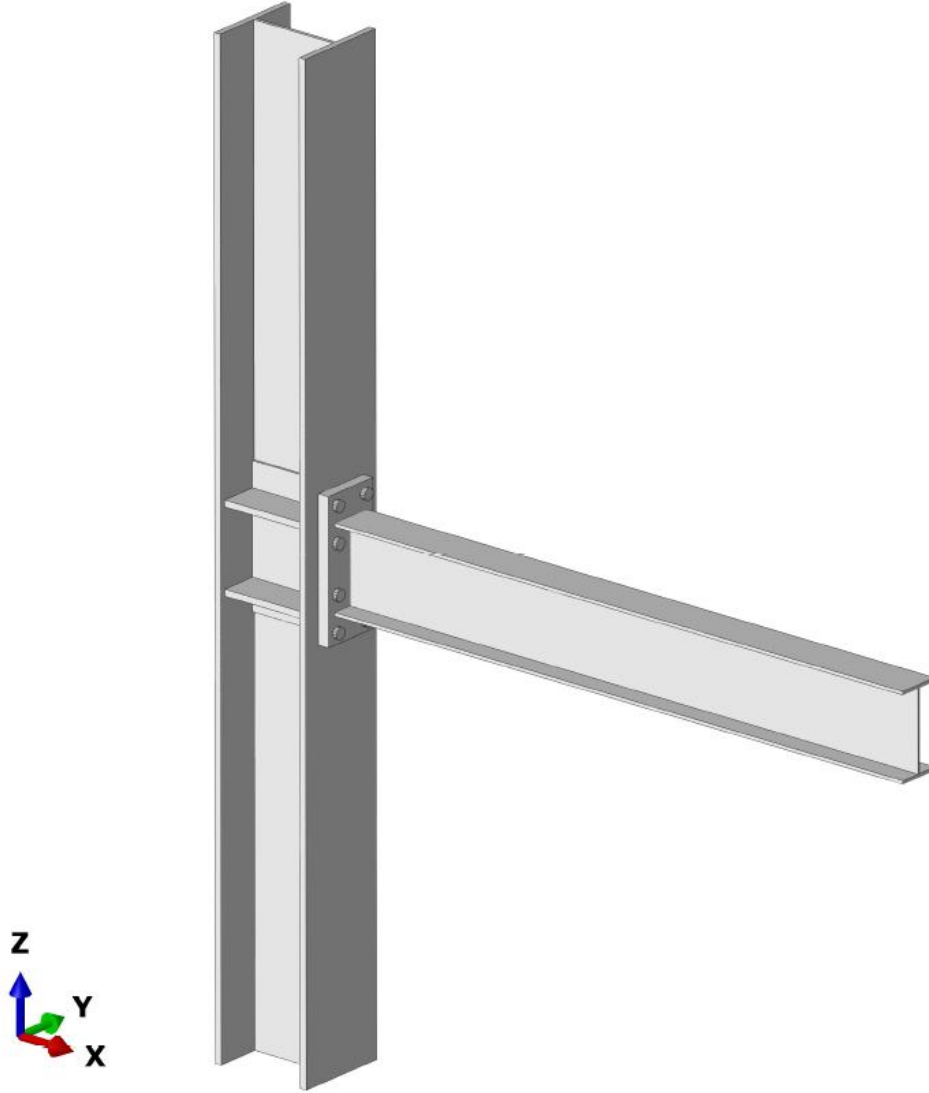
Makalede verilen bilgilere dayanarak, kirişin kolon yüzünden yük uygulama noktasına kadar olan uzunluğu 1,75 m; kolonun mesnetleri arasındaki mesafe 3,00 m olarak dikkate alınmıştır. Yük uygulaması, kirişe bağlanan bir kriko vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Kolon panel bölgesi 8 mm kalınlığındaki takviye levhaları ile güçlendirilmiştir. Kiriş başlıkları hizasında 20 mm kalınlığında süreklilik levhaları kullanılmıştır.

Alın levha ile kolon başlığı arasındaki bulonlu birleşimde toplam 8 (sekiz) adet M24 10.9 sınıfı bulon kullanılmıştır. Birleşim modellerindeki bulonlara tam ön çekme kuvveti uygulanmıştır.

6.2.2 Birleşimin sonlu eleman modeli

Makalede belirtilen geometrik özellikler kullanılarak oluşturulan birleşimin sonlu eleman modeli Şekil 6.25’te görülmektedir.

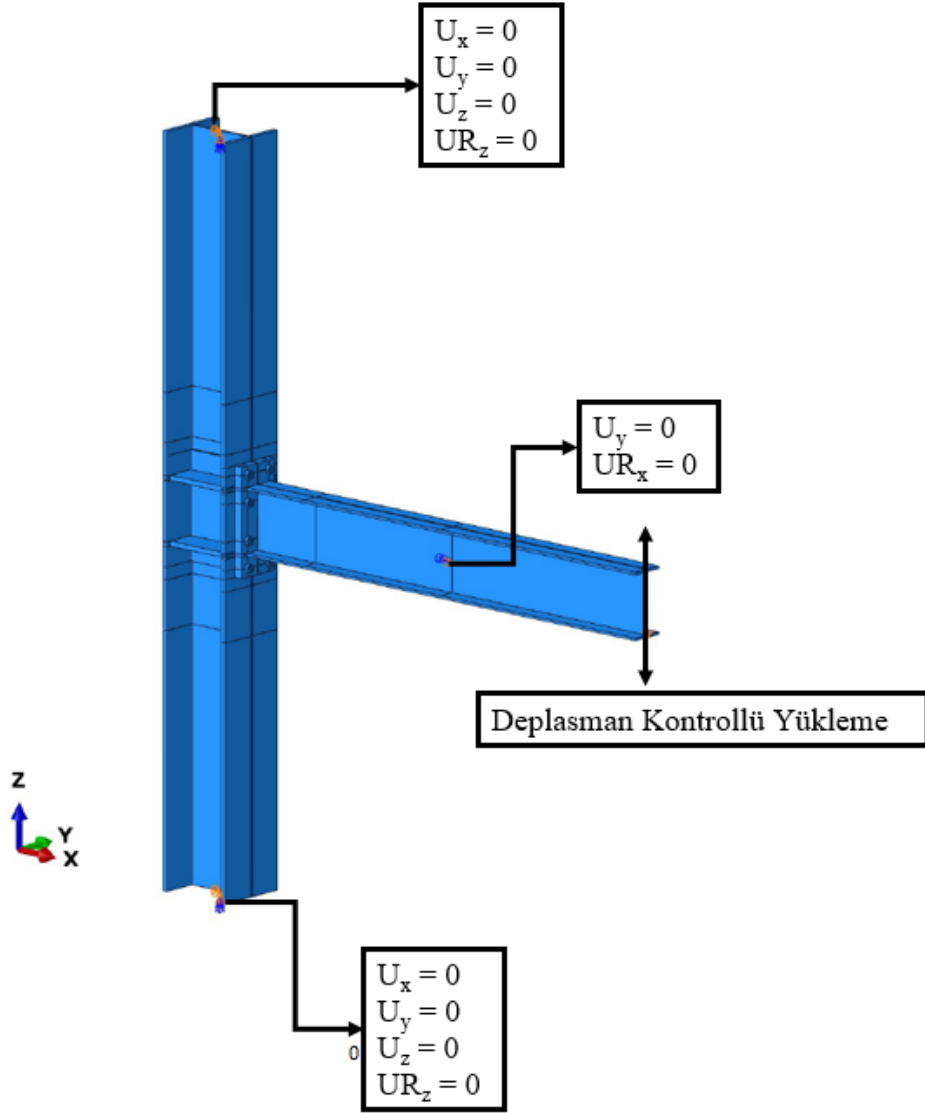


Şekil 6.25 : P3 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.

6.2.3 Birleşim modelinin mesnet koşulları

Modellerde kolonların alt ve üst uçlarının kesitleri basit mesnetler olarak tanımlanmaktadır. ABAQUS yazılımında ilgili kesit yüzeyleri “Rigid Body” komutu ile bir referans noktasına bağlanmaktadır. Böylece yüzeydeki her bir noktanın beraber hareket etmesi amaçlanmıştır.

Kolon üst ve alt kesiti basit mesneti temsil edecek sınır koşulları uygulanmıştır. Kiriş, burulma deformasyonu yaparak yanal burkulmasının önlenmesi amacıyla, uzunluğu boyunca belirli noktalardan orta bölgesinden yanal olarak desteklenmiştir (Şekil 6.26).



Şekil 6.26 : P3 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları.

6.2.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli

Deneysel çalışma kapsamında yapılan çekme deneyi sonuçları dikkate alındığında elemanların malzeme özellikleri iki grup altında değerlendirilmiştir. Akma gerilmesi (F_y), çekme dayanımı (F_u) ve yapısal çelik elastisite modülü (E) çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12 : P3 numunesindeki malzemesinin özellikleri.

Elemanlar	F_y [MPa]	E [MPa]	F_u [MPa]
Alın levhası	401	200000	533
Diğer elamanlar	337	200000	455

Çalışmada kullanılan çelik malzemeler için çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_u) belirtilmemiştir. Bu nedenle bu değer $\epsilon_u = 120\epsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.13).

Çizelge 6.13 : P3 numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.

Elemanlar	ϵ_y	ϵ_u
Alın levhası	0,00201	0,2406
Diğer elamanlar	0,00169	0,2024

10.9 sınıfı bulon için de çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_u) belirtilmemiştir. Bu değer $\epsilon_u = 11\epsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.14).

Çizelge 6.14 : Birleşimde kullanılan bulonların malzemesinin özellikleri.

Elemanlar	E [MPa]	F_{yb} [MPa]	F_{ub} [MPa]	ϵ_y	ϵ_u
10.9 Bulon	200000	900	1000	0,005	0,036

Çevrimsel yükleme etkisindeki malzeme davranışını temsil edebilmek için malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediği doğrusal olmayan gerilme – şekil değiştirme davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilen denklem 6.7 kullanılacaktır (Ramberg ve Osgood, 1943).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (6.7)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ϵ : Toplam şekil değiştirme.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

σ : Mühendislik gerilmesi, MPa.

K : Denklem sabiti.

n : Pekleşmeyi dikkate alan malzeme sabiti.

Ramberg–Osgood denklemi ile elde edilen sonuçlar yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, K ve n parametrelerinin belirlenmesi genellikle kolay olmamaktadır. Bu nedenle Hill (1944) tarafından, akma gerilmesinin doğrudan denkleme dahil edildiği denklem 6.8 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{F_y} \right)^n \quad (6.8)$$

Çekme dayanımı (F_u) ve maksimum uzama (ε_u) gibi bilinen mekanik parametreler kullanılarak, n değeri denklem 6.9 ile hesaplanır.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} \quad (6.9)$$

Alın levhası malzemesi için gerilme - şekil değiştirme değerlerinin belirlenmesi için n katsayısı hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_u = 0,2406$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 533 \text{ MPa}$$

$$F_y = 401 \text{ MPa}$$

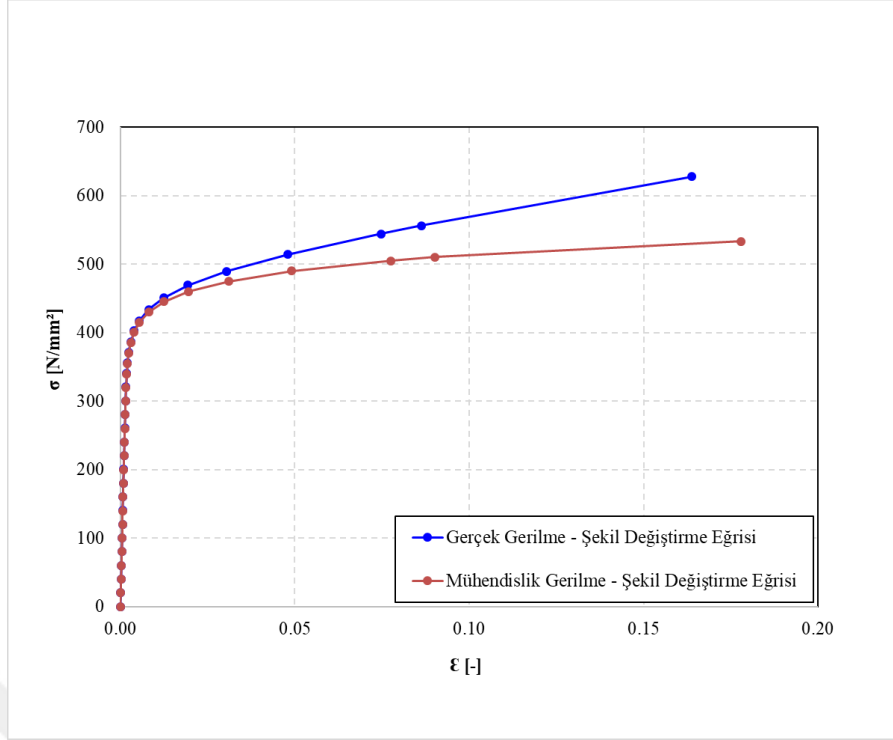
$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,2406 - \frac{533}{200000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{533}{401}\right)} = 15,7$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.15).

Çizelge 6.15 : P3 numunesindeki alın levhası için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

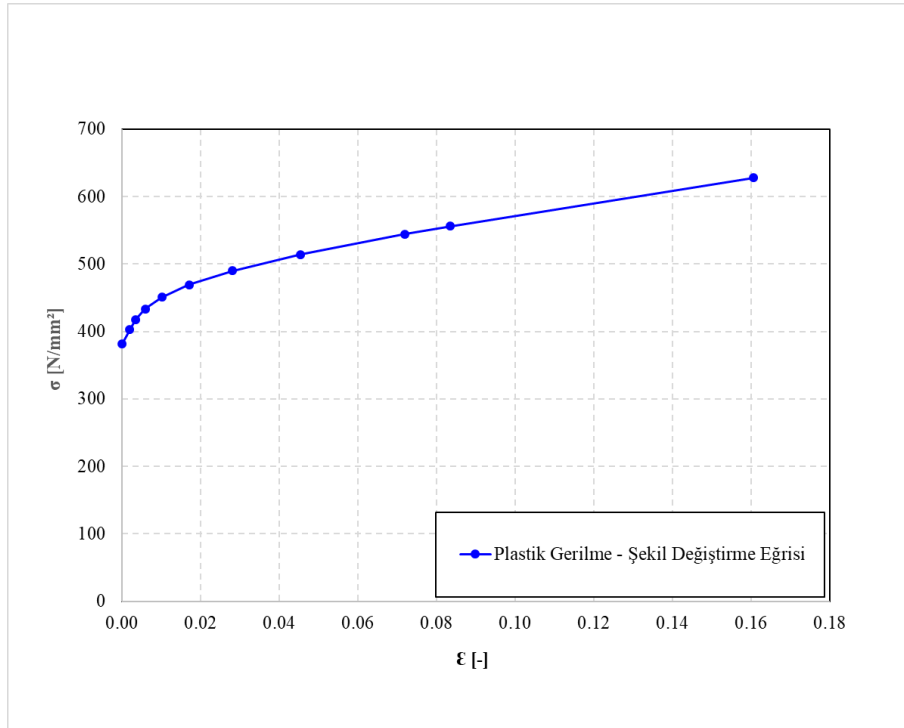
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0014	280	0,0014
300	0,0015	300	0,0015
320	0,0017	321	0,0017
340	0,0018	341	0,0018
355	0,0021	356	0,0021
370	0,0024	371	0,0024
385	0,0030	386	0,0030
401	0,0040	403	0,0040
415	0,0055	417	0,0055
430	0,0081	434	0,0081
445	0,0125	451	0,0124
460	0,0196	469	0,0194
475	0,0310	490	0,0306
490	0,0492	514	0,0480
505	0,0775	544	0,0747
510	0,0901	556	0,0863
533	0,1779	628	0,1637

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.27’de gösterilmektedir.



Şekil 6.27 : P3 numunesindeki alın levhasının gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.28’de gösterilmektedir.



Şekil 6.28 : P3 numunesindeki alın levhasının gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.

Diğer elemanlar için benzer şekilde gerilme - şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,169$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 455 \text{ MPa}$$

$$F_y = 337 \text{ MPa}$$

$$n = 14,7$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerlerinin edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.16).

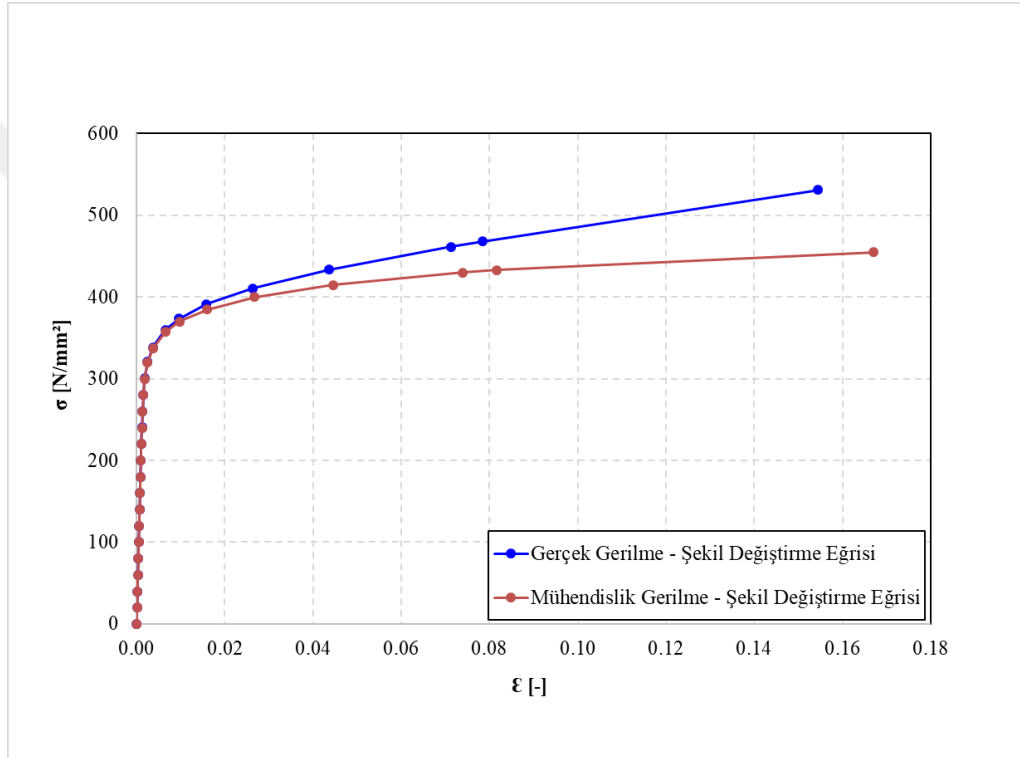
Çizelge 6.16 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0015	280	0,0015
300	0,0019	301	0,0019
320	0,0025	321	0,0025
337	0,0037	338	0,0037
358	0,0065	360	0,0065
370	0,0097	374	0,0096
385	0,0160	391	0,0159
400	0,0267	411	0,0264
415	0,0446	433	0,0436

Çizelge 6.16 (Devam): P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

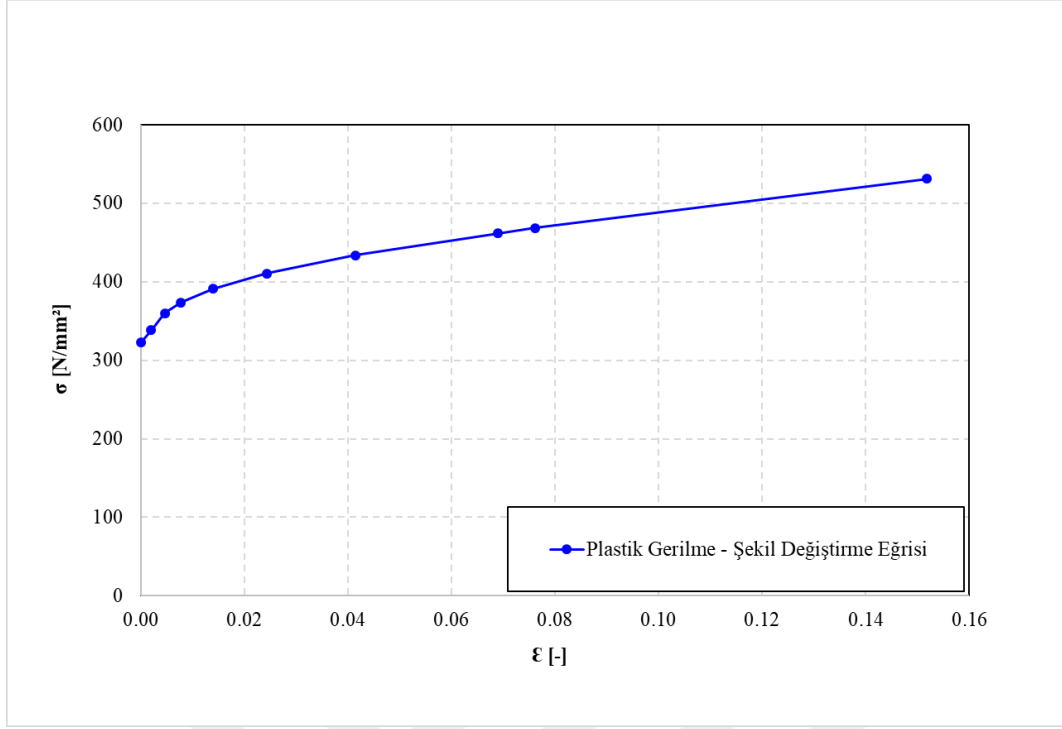
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
430	0,0738	462	0,0712
433	0,0816	468	0,0784
455	0,1671	531	0,1545

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.29’da gösterilmektedir.



Şekil 6.29 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.30’da gösterilmektedir.



Şekil 6.30 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,036$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 900 \text{ MPa}$$

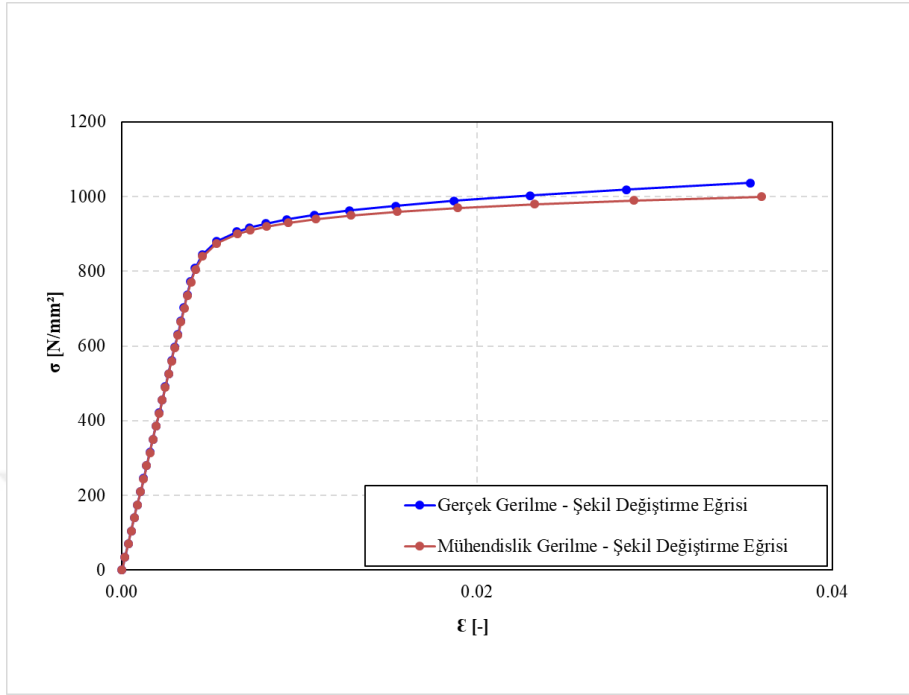
$$n = 26$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.17).

Çizelge 6.17 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

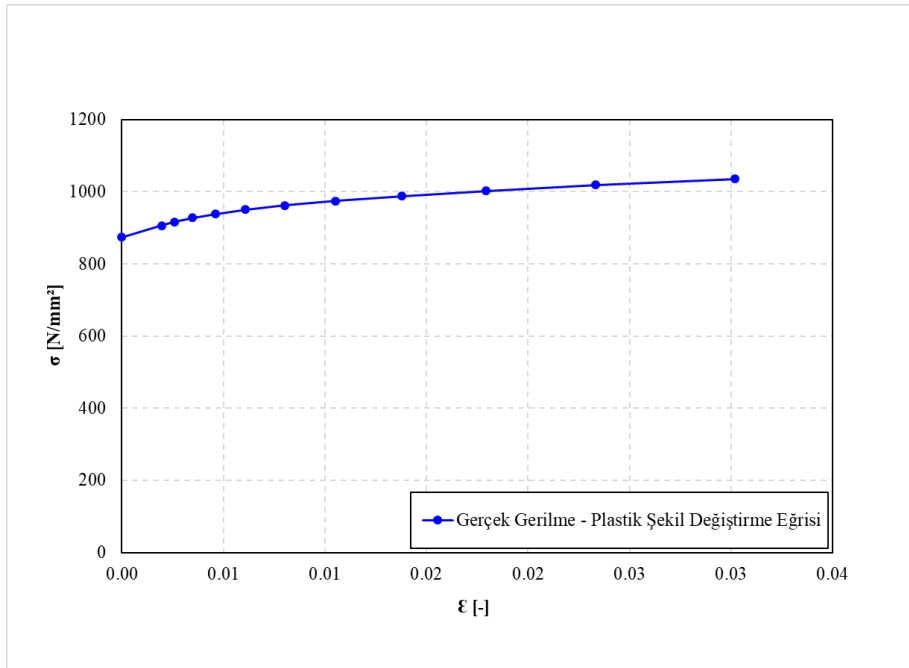
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0004	70	0,0003
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0009	175	0,0009
210	0,0011	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0014	280	0,0014
315	0,0016	315	0,0016
350	0,0018	351	0,0017
385	0,0019	386	0,0019
420	0,0021	421	0,0021
455	0,0023	456	0,0023
490	0,0025	491	0,0024
525	0,0026	526	0,0026
560	0,0028	562	0,0028
595	0,0030	597	0,0030
630	0,0032	632	0,0031
665	0,0033	667	0,0033
700	0,0035	702	0,0035
735	0,0037	738	0,0037
770	0,0039	773	0,0039
805	0,0041	808	0,0041
840	0,0045	844	0,0045
875	0,0053	880	0,0053
900	0,0065	906	0,0065
910	0,0072	917	0,0072
920	0,0081	927	0,0081
930	0,0093	939	0,0093
940	0,0109	950	0,0108
950	0,0129	962	0,0128
960	0,0155	975	0,0154
970	0,0189	988	0,0187
980	0,0232	1003	0,0230
990	0,0288	1019	0,0284
1000	0,0360	1036	0,0354

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.31’de gösterilmektedir.



Şekil 6.31 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.32’de gösterilmektedir.



Şekil 6.32 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Elde edilen akma sonrası gerilme - plastik şekil değiştirme değerleri, ABAQUS yazılımında birleşik pekleşme (combined hardening) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Birleşik pekleşme modeli kinematik pekleşme bileşeni half cycle tanımı ile, izotropik pekleşme bileşeni ise “cyclic hardening” tanımı ile yapılacaktır. Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşenine ait çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) özelliğinin nümerik modelde tanımı için gerekli olan Q ve b parametreleri, Krolo ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada S275 yapı çeliği için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 6.18).

Çizelge 6.18 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).

Yapısal Çelik Sınıfı	Q [MPa]	b [-]
S275	25,6	4,4
S355	20,8	3,2

Birleşimde hasar oluşumu, sünek hasar modeli (ductile damage) kullanılarak değerlendirilecektir. Birleşimin tasarımı, plastik deformasyonların kirişte meydana gelmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle, hasar durumunun gözlenebilmesi için sünek hasar modeli, kiriş elemanlarının malzeme davranışının modellenmesinde dikkate alınacaktır. Referans alınan çalışmada, çelik malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, tekrarlı yükler altındaki davranışın karakterize edilmesine yönelik çekme-basınç testleri ile ilgili bir bilgi bulunmadığından, hasar başlatma kriteri için, Krolo (2017) tarafından doktora tezi kapsamında kalibre edilen parametrelerden yararlanılmıştır (Çizelge 6.19).

Çizelge 6.19 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ϵ_D^{pl}	Gerilme Üç Eksenliliği	Şekil Değiştirme Hızı
0,6308	0,330	0,001
0,6249	0,380	0,001
0,6188	0,430	0,001
0,6124	0,480	0,001
0,6061	0,520	0,001
0,5996	0,570	0,001
0,5931	0,610	0,001

Hasar başlangıcı ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra, hasarın gelişimi ile ilgili gerekli modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. Malzemede hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri (ε_f^{pl}), Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çelikleri için gerçekleştirilen çekme testleri kapsamında elde edilmiştir. Bu değer, S275 yapı çeliği için çekme dayanımı değerine karşılık gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 2,6 katı; S355 yapı çeliği için ise çekme dayanımına karşı gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 3,0 katı şeklinde verilmektedir. Kiriş elemanının malzeme sınıfı S275 olduğundan, hasarın tamamlandığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri $\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl}$ şeklinde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl} = 2,6 \times 0,6308 = 1,64$$

Hasar başlama kriteri sağlandıktan sonra, kırılma anında plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) denklem 6.10 ile tanımlanır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} \quad (6.10)$$

L : Eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$: Hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaştığında oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_D^{pl}$.

$$\eta = 1/3 \text{ için, } \varepsilon_0^{pl} = \varepsilon_D^{pl}$$

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_0^{pl} = 1,64 - 0,631 = 1,01$$

Eleman karakteristik uzunluğu L , elemanın hacminin küp kökü alınarak belirlenir.

Sonlu eleman modellerinde en yüksek plastik deformasyonun beklendiği bölgelerde ortalama eleman uzunluğu $L = 2,20 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerle, kırılma anında plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) hesaplanmıştır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} = 2,20 \times 1,01 = 2,22 \text{ mm}$$

Plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) değeri, ABAQUS yazılımında “damage evolution” tanımı altında, hasar değişkeninin (D), plastik yer değiştirme ile ilişkisinin doğrusal olarak tanımlandığı “linear softening” modeli ile tanımlanmıştır.

6.2.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar

Makalede elik elemanlar arasındaki temas yüzeyleri ile ilgili bir bilgi bulunmaması nedeniyle temas yüzeyleri arasında sürtünme katsayısı 0,30 olarak kabul edilmiştir. Bulon başlıkları kolaylık açısından daire şeklinde modellenmiştir. Makalede belirtilmemesi nedeniyle, bulon delikleri standart bulon deliğini yansıtmaması açısından bulon çapından 2 mm toleranslı olacak şekilde modellenmiştir.

6.2.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli

Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmaktadır. Tamamlayıcı yüzeyler içerisine belli ölçüde geçebilen esas yüzeyler, birleştirilen elemanlardan daha rijit ve daha seyrek sonlu eleman ağına sahip olanı olarak seçilmiştir.

6.2.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim

Birleşim modellerinde yer alan bulonlu birleşimlerde, bulonların gövdesinin levhalardaki ve kirişteki delikler ve levhaların temas eden yüzeyleri arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanacaktır.

Birleşim yüzeylerinin normal bileşeninin davranışını belirlemede “Hard Contact” modeli kullanılacaktır. Teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modeli dikkate alınacaktır. Teğetsel davranış modeli, temas yüzeyleri arasında oluşması beklenen sürtünme etkisinin formülasyonu olarak “Penalty” özelliği seçilmek suretiyle, elemanların yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı makalede belirtilmediği için 0,30 olarak varsayılmıştır.

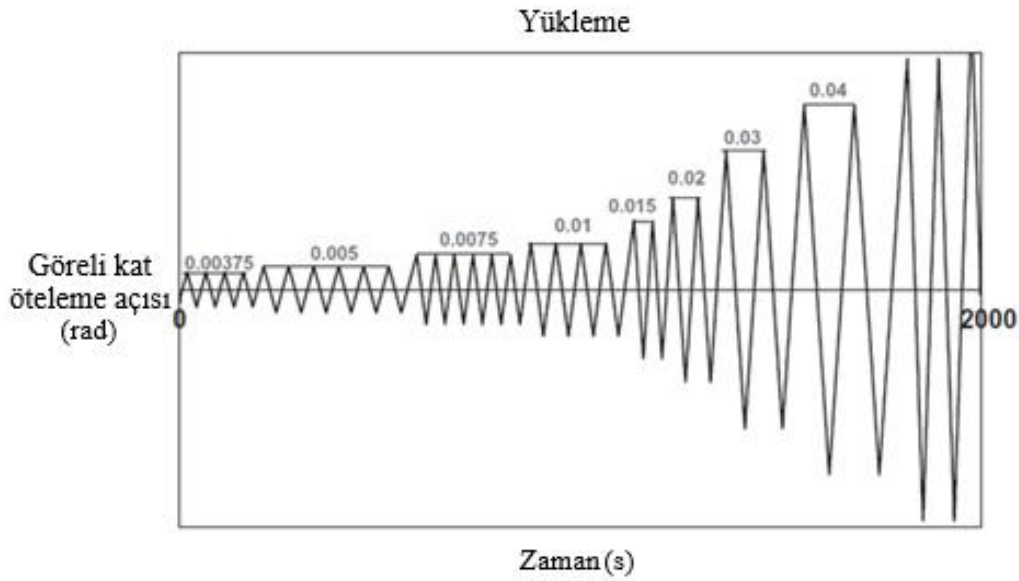
6.2.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması

Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması ile sağlanmaktadır. Kaynak işlemi uygulanarak teşkil edilen birleşimler için, kaynak

malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, bu etkileşim modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

6.2.9 Analiz yöntemi

Modelin sonlu eleman analizi tek bir adımda gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolü olarak, AISC 341-22 Bölüm K2b.4’te tanımlanan prosedür esas alınmış ve analiz bu protokole uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.33).



Şekil 6.33 : AISC 358-22’de tanımlanan yük protokolü.

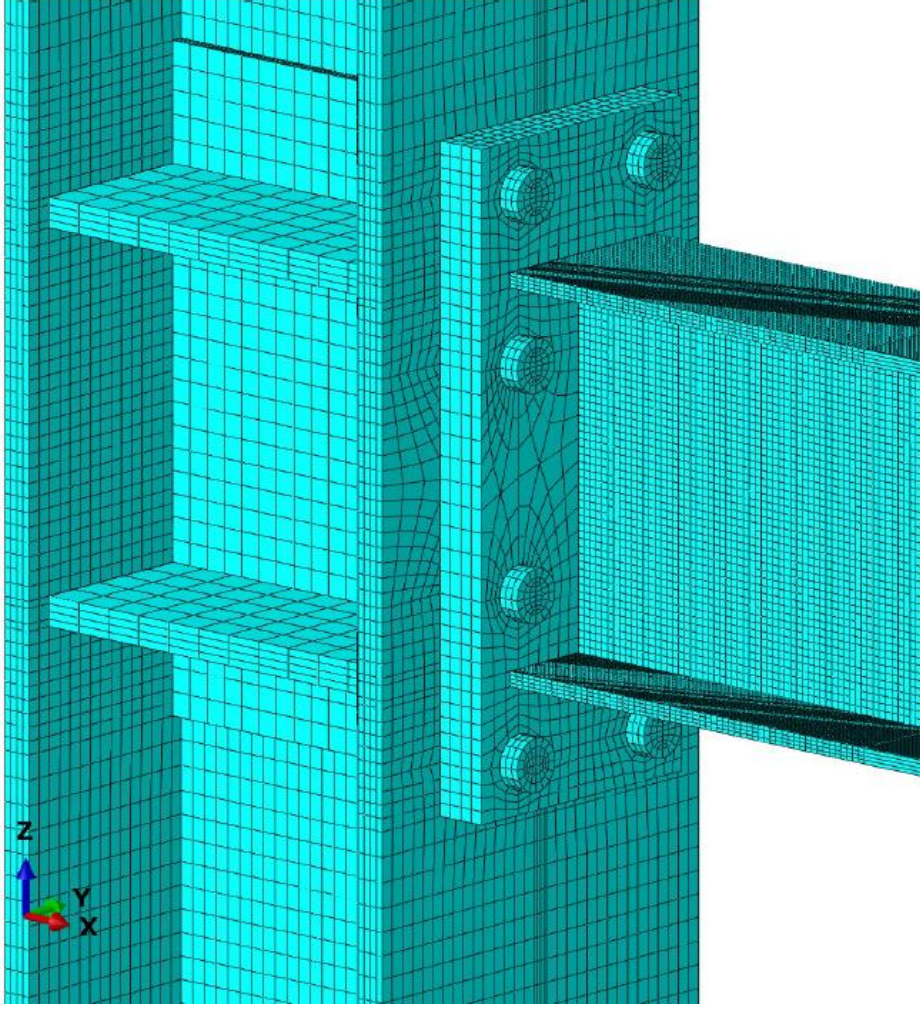
Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak zaman tanım alanında (direct integration) dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yüklemenin görelî olarak yavaş gerçekleştiği ve atalet etkilerinin sınırlı olduğu durumları temsil eden “quasi-static” (yarı-statik) yaklaşım kapsamında uygulanmıştır. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için “Full Newton-Raphson yöntemi” tercih edilmiştir. Sünek malzeme davranışı içeren hasar modelleri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi genellikle simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu durum, çözüm algoritmasının yakınsama davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ABAQUS yazılımının çözüm seçenekleri arasında yer alan ve simetrik olmayan sistem matrislerinin çözümüne olanak tanıyan “unsymmetric matrix solver” seçeneği, çözüm kararlılığını artırmak ve yakınsama problemlerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

6.2.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı

Modelde, üç boyutlu katı, doğrusal ve azaltılmış integrasyon tanımı kullanılan C3D8R tipi 8 (sekiz) düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların, daha fazla integrasyon noktasına sahip ve dolayısıyla analiz sonucunun doğruluk oranı çok yüksek olan kuadratik eleman olan C3D20 elemanı ile gerilme dağılımları karşılaştırıldığında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, C3D8R elemanlarının kayma kilitlenmesi (shear locking) sorununa neden olmaması ve analiz süresini önemli ölçüde azaltması nedeniyle eğilme etkilerinin belirleyici olduğu yapısal analizlerde tercih edilmesi uygun görülmektedir (Han ve diğ, 2016).

Birleşim bölgeleri, plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı alanlar olduğundan, bu bölgelerde sonlu eleman ağı diğer bölgelere kıyasla daha sık tanımlanmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip bölgeler, çözüme uygun olan yapısal (structural) sonlu eleman ağı oluşturabilmek için, bölümlendirme (partition) özelliği kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Böylece farklı geometrideki bir elemanın bölündüğü düzlem üzerinde iki farklı geometri arasında ortak noktalar oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda oluşturulan ortak düğüm noktaları sayesinde, yazılım aynı eleman üzerinde yer alan farklı geometrileri birbirinden ayırt edebilmekte ve bu sayede düzenli ve uyumlu bir katı eleman ağı oluşturulabilmektedir.

Sonlu eleman modelinin doğru yapısal davranışı yansıtabilmesi açısından, elemanların kalınlığı boyunca kaç katmana bölündüğü son derece kritiktir. Han ve diğ. (2016) tarafından, AISC-358’de tanımlı kirişin kolona doğrudan kaynaklı olduğu kiriş-kolon birleşiminin (WUF-W) tekrarlı yükler altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla birleşimin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan C3D8R elemanlarının kalınlık boyunca katman sayısının analiz sonuçlarına etkisini değerlendirmek için birleşimin belirli bir bölgesi, sırasıyla 1, 2, 4 ve 6 katman kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme dağılımları, 1 katmanlı model referans alınarak karşılaştırılmış ve 4 katmanlı modelin, 6 katmanlı modelle oldukça benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, C3D8R elemanlarıyla yapılan analizlerde kalınlık boyunca en az 4 katman kullanmanın, güvenilir ve istenilen yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmesi açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bilgiler ışığında, elemanlar kalınlığı boyunca en az 4 katman olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 6.34).

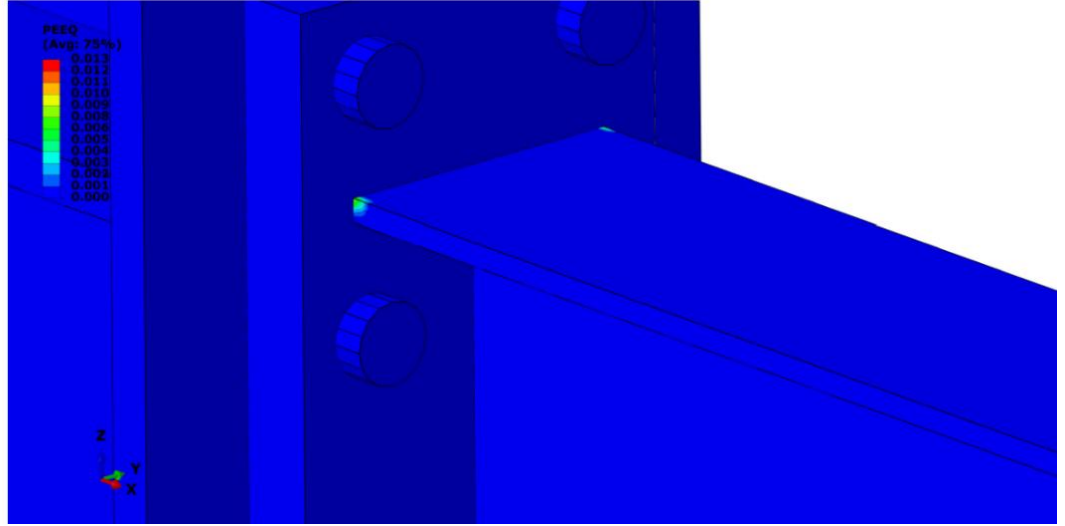


Şekil 6.34 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.

6.2.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

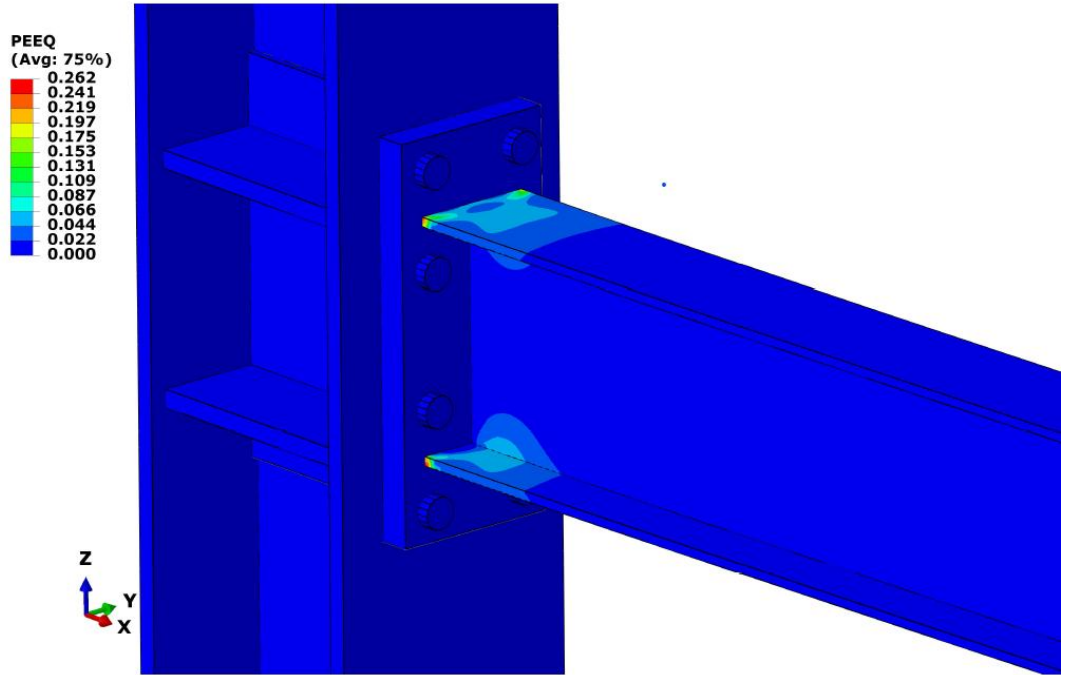
Referans alınan çalışma kapsamında deneyi yapılan P3 numunesinin sonlu eleman modeli, ilgili makalede sunulan verilerden yararlanılarak ve bu bölümde açıklanan modelleme esaslarına uygun şekilde ABAQUS yazılımında oluşturulmuş; model, tekrarlı yükler altında analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, söz konusu çalışmada raporlanan deneysel veriler ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum değerlendirilmiştir.

Analizde %0,75 göreceli kat öteleme açısına ulaşıldığında, kiriş ucu enkesitinde, kiriş başlıklarının kenarında, akma davranışının başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.35).



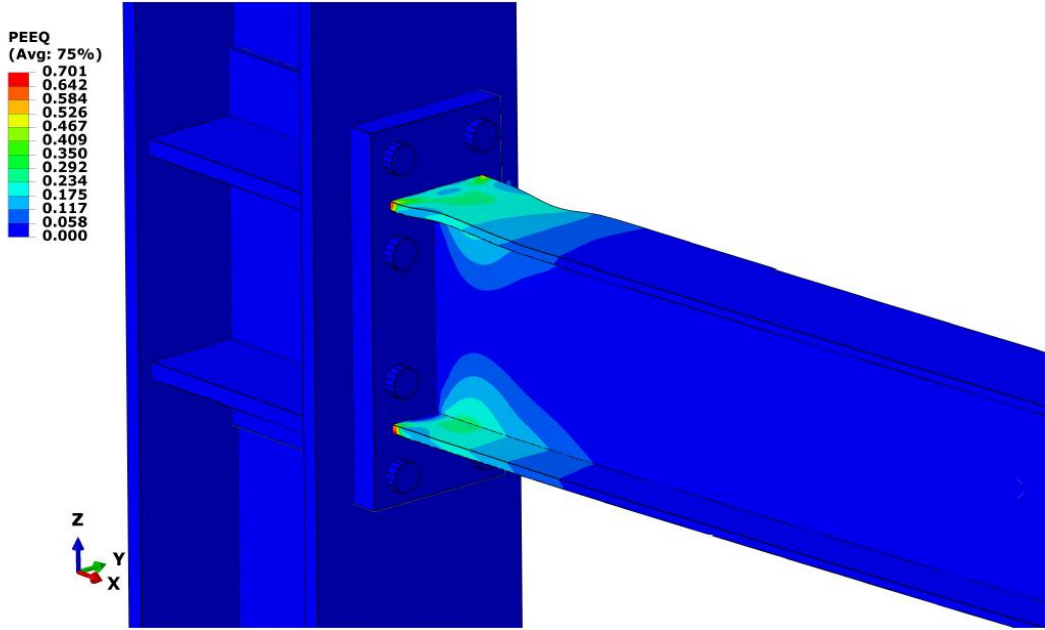
Şekil 6.35 : %0,75 görelî kat öteleme açısında kiriş başlıklarında akma davranışı.

%2 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik deformasyonların kiriş başlıklarının kenarlarından, kiriş başlıklarının orta bölgesinde ve kiriş gövdesine doğru yayılmaya başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.36).



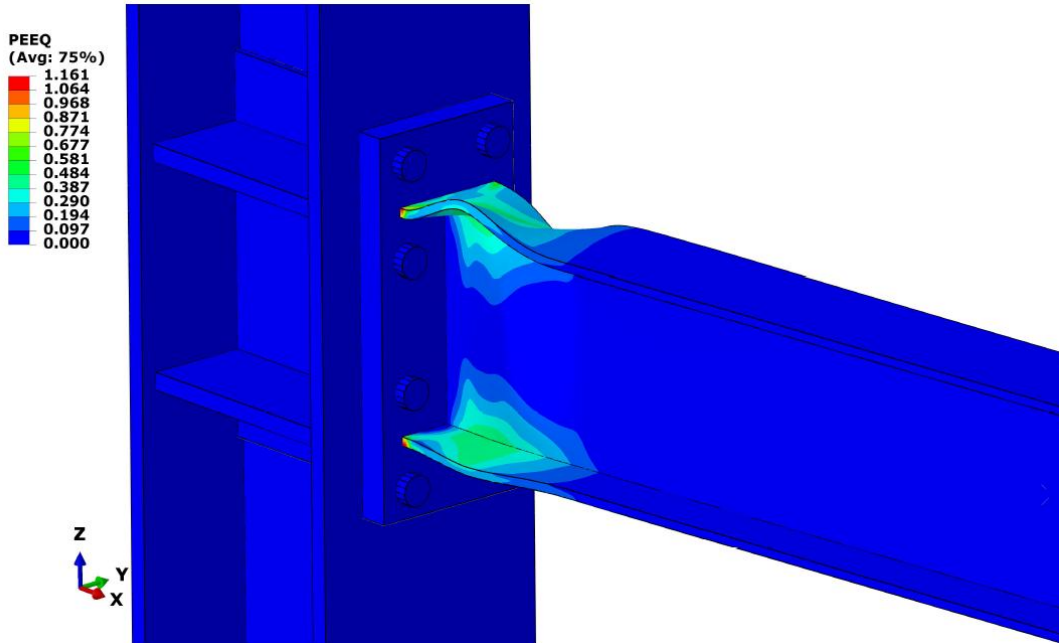
Şekil 6.36 : %2 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonların yayılışı.

%4 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik deformasyonların kiriş ucunda genişlemeye devam ettiği ve kiriş başlıklarında yerel burkulmanın başladığı tespit edilmiştir (Şekil 6.37).



Şekil 6.37 : %4 görel kat öteleme açısında kiriş başlığı yerel burkulması.

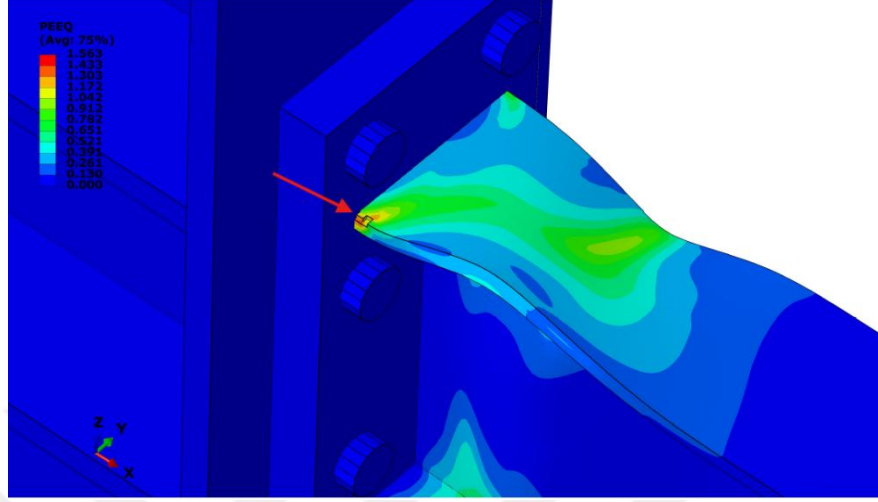
%5 görel kat öteleme açısında, kiriş başlıklarında meydana gelen yerel burkulma deformasyonları artmış ve kiriş gövdesinde de yerel burkulma davranışı başlamıştır (Şekil 6.38).



Şekil 6.38 : %5 görel kat öteleme açısında kiriş başlıkları ve gövdesinde yerel burkulma deformasyonu.

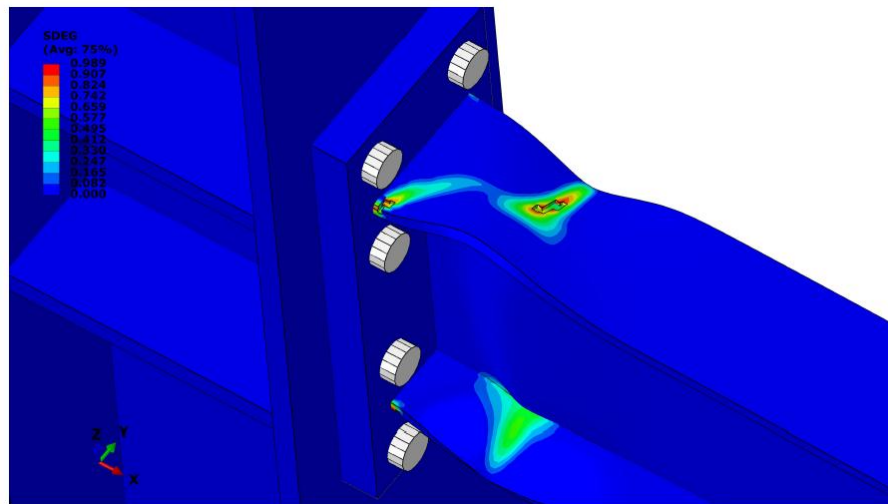
%6 görel kat ötelemesi açısının ilk yükleme döngüsünde, plastik deformasyonların artması ve hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, kiriş ucu

enkesitinde kiriş başlıklarının köşelerindeki elemanlar silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 6.39).

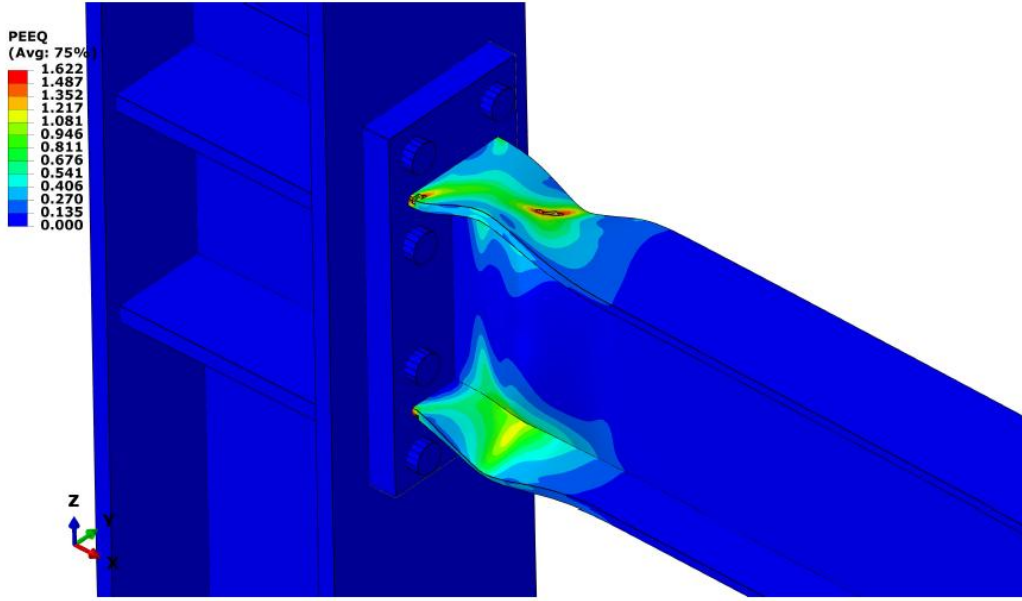


Şekil 6.39 : %6 görelî kat öteleme açısında kiriş ucu enkesitinde çatlak oluşumu.

%6'lık görelî kat ötelemesi açısındaki son yükleme döngüsünde, kiriş başlıkları ve gövdesinde meydana gelen burkulma deformasyonları daha belirgin hale gelmiştir. Kiriş ucundaki enkesitte, kiriş başlıklarının köşelerinde oluşan çatlaklar, başlıkların ortasına doğru ilerleme göstermiştir. Aynı adımda, alın levhası yüzeyinden yaklaşık 120 mm uzaklıkta, kiriş başlığında ikinci bir çatlak oluşum bölgesi daha tespit edilmiştir (Şekil 6.40).



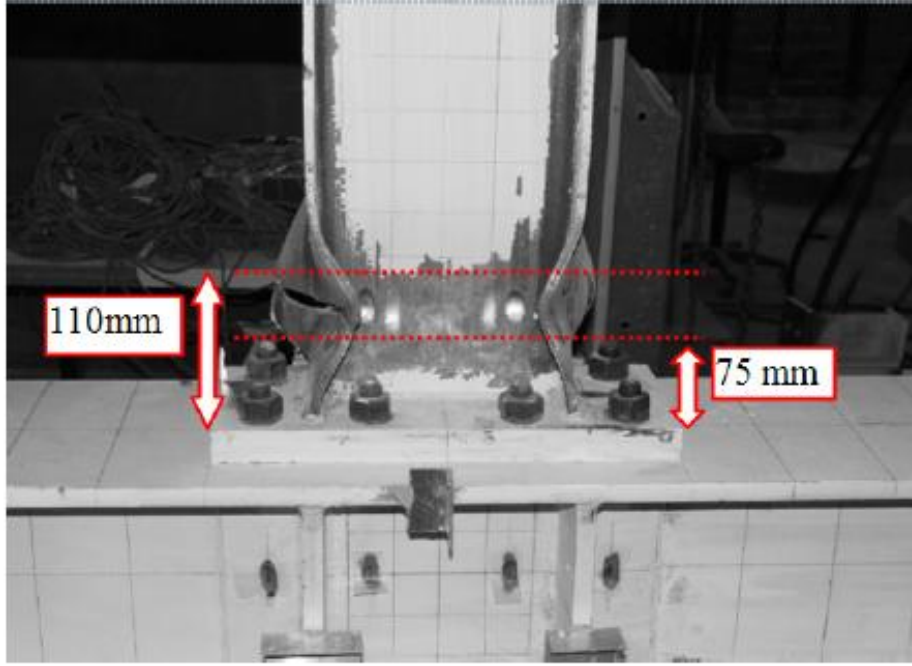
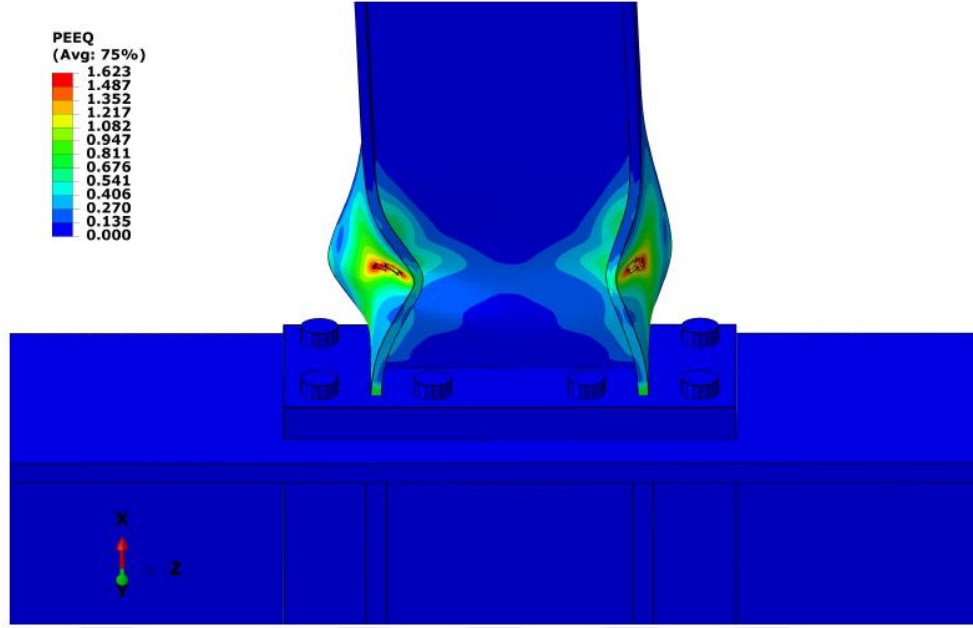
Şekil 6.40 : %6 görelî kat öteleme açısında kiriş başlıklarında çatlakların oluştuğu ikinci bölge.



Şekil 6.40 (devam): %6 göreceli kat öteleme açısında kiriş başlıklarında çatlakların oluştuğu ikinci bölge.

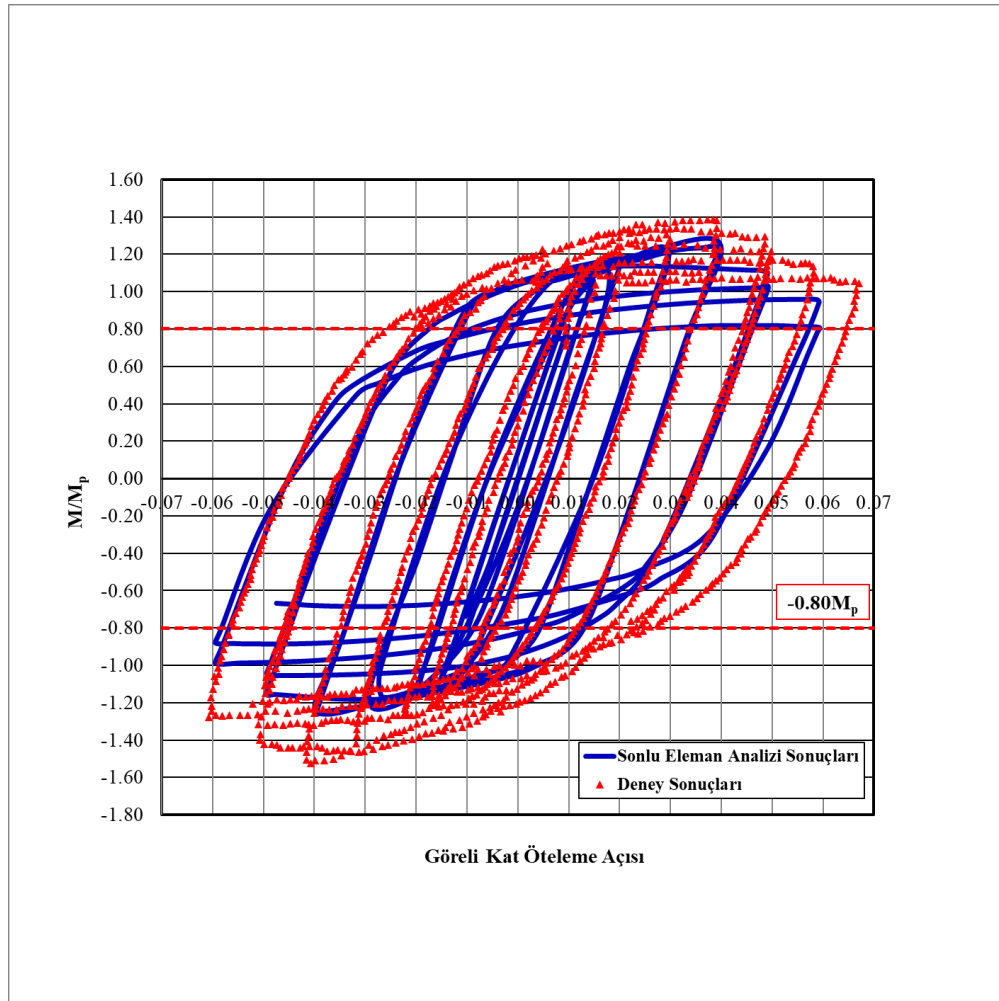
Deneyisel çalışmada, plastik şekil değiştirmelerin kiriş ucundaki plastik mafsallık bölgesinde yoğunlaştığı belirtilmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçları incelendiğinde, plastik deformasyonların söz konusu bölgede oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sonlu eleman analizinin sonuçlarının deney sonuçlarıyla tutarlı olduğunu göstermektedir.

Numunede çatlak oluşumunun, kiriş başlığı bölgesinde yer alan iki farklı konumda - biri kiriş ucu enkesitinde, diğeri ise alın levhası yüzeyinden 110 mm mesafe uzaklıkta - meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 6.41'de, makalede yer alan deney sonrasında şekil değiştirmiş ve hasar görmüş numune ile sonlu eleman analizinin son adımında elde edilen plastik deformasyon ve hasar durumu karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Analiz sonuçları incelendiğinde, plastik deformasyonların aynı bölgede yoğunlaştığı, yerel burkulma deformasyonlarının çok benzer olarak elde edildiği ve çatlak oluşumlarının aynı konumlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, sayısal modelleme ile elde edilen sonuçların deneysel bulgularla yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.41 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.

Analiz sonucunda, tekrarlı yükler altında birleşimin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, kolon merkezindeki normalize moment (M/M_p) ile görelî kat ötelemesi açısı arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel eğriler oluşturulmuştur. Normalize eğilme momenti (M/M_p), kiriş merkezinde eğilme oluşan eğilme momentinin (M), kiriş plastik eğilme momenti kapasitesine (M_p) oranı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucu ve deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğriler Şekil 6.42’de gösterilmiştir.



Şekil 6.42 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.

Sonlu eleman analizi sonucu elde edilen çevrimsel eğri ile deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğrilerin karakteristiklerinin birbirleriyle yüksek düzeyde uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Referans alınan çalışmada, yerel burkulma deformasyonlarına bağlı olarak dayanım kaybının %5 görel kat ötelemesi açısında meydana geldiği belirtilmiştir. İlgili grafikler incelendiğinde, sonlu eleman analizinde de benzer bir dayanım düşüşünün aynı öteleme seviyesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmada, %7 görel kat ötelemesi açısına karşılık gelen yüklemenin %75'inin uygulanmasının ardından, kiriş başlığında kırılma meydana gelmiş ve deney sonlandırılmıştır. Sayısal analiz ise, %6 görel kat ötelemesi açısının son döngüsünde çatlak genişliklerinin ve plastik deformasyonların artmasıyla birlikte, çözüm hızının önemli ölçüde yavaşlaması nedeniyle durdurulmuştur.

Birleşimin eğilme momenti dayanımının, deneysel çalışmada daha yüksek elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durumun makale numuneler için belirtilen çekme deneyi testi sonuçlarının ortalama değerler olmasından kaynaklanabileceği öngörülmektedir. Benimsenen modelleme esasları doğrultusunda oluşturulan sayısal modelin analiz sonuçlarında elde edilen eğilme momenti dayanımının daha düşük olması, güvenli tarafta kalındığının bir göstergesidir.

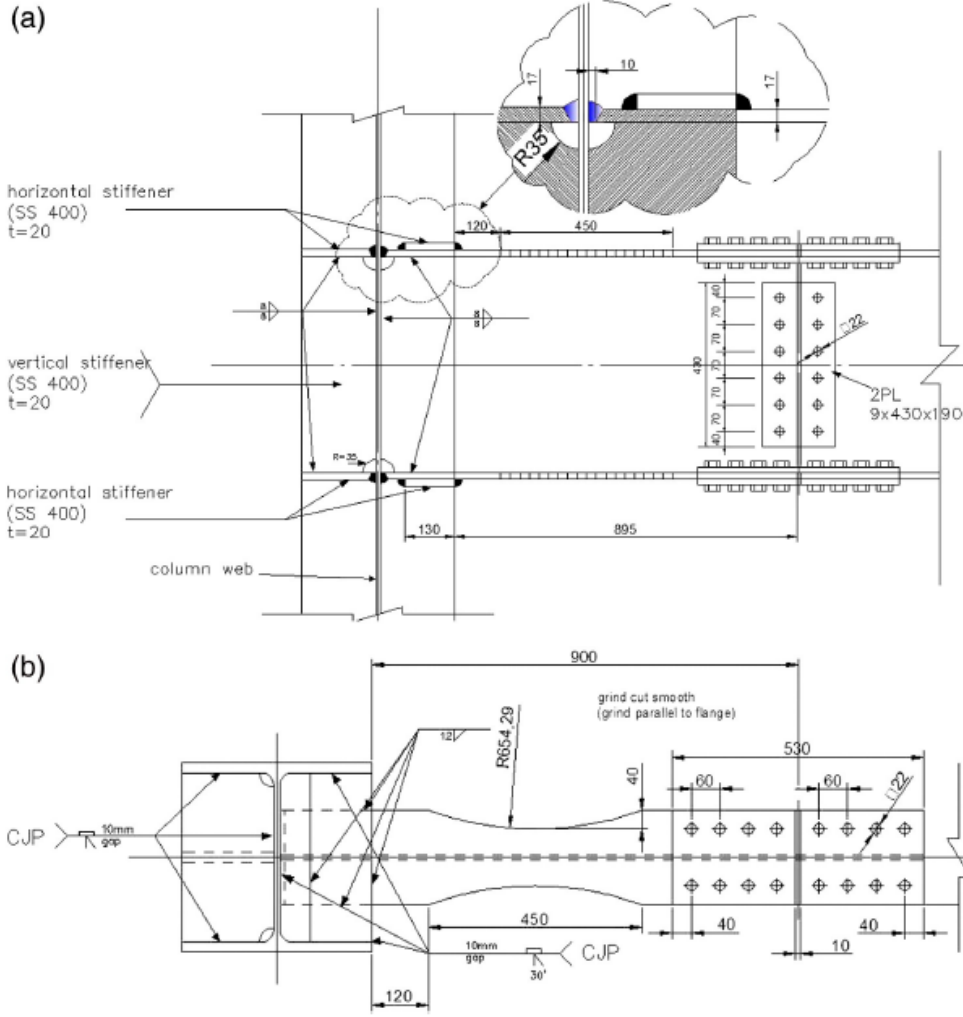
Analitik çalışma ile tam ölçekli deneyin sonuçları arasındaki bu uyumun bir sonucu olarak, doğrulama modelinin analizinde uygulanan modelleme esaslarının; bu çalışma kapsamında geliştirilen bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş–zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin modellenmesinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.3 Kaynaklı Zayıflatılmış ve Tam Penetrasyonlu Küt Kaynaklı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi Modelinin Doğrulanması

Bu çalışma kapsamında, kaynaklı zayıflatılmış ve tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin ABAQUS sonlu eleman modellerinin analizinde kullanılacak olan malzeme davranışı, katı eleman tipleri, yüzey etkileşimleri gibi modelleme esasları, daha önce deneyi yapılan benzer bir kiriş-kolon birleşimi dikkate alınarak doğrulanacaktır.

6.3.1 Esas alınan deneysel çalışma

Doğrulama çalışması için Oh ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma esas alınmıştır. Bu araştırmanın amacı, moment aktaran çelik çerçevelerde yaygın olarak kullanılan kolona kaynaklı konsol kiriş-kiriş birleşimlerinin (column-tree connection) deprem yükleri altındaki performansını değerlendirmektir. Bu çalışma kapsamında, referans numune olarak, Kore’de kullanılmakta olan kaynaklı konsol kiriş-kiriş birleşiminin uyarlandığı, kiriş zayıf eksen kolon birleşiminin (CT-BASE birleşimi) deprem yükleri altındaki performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu numune haricinde iki numune daha test edilmiştir (CT-RBS ve CT-DBRS). AISC şartnamesine uygun olması nedeniyle doğrulama çalışması için CT-RBS numunesi referans alınmıştır (Şekil 6.43).



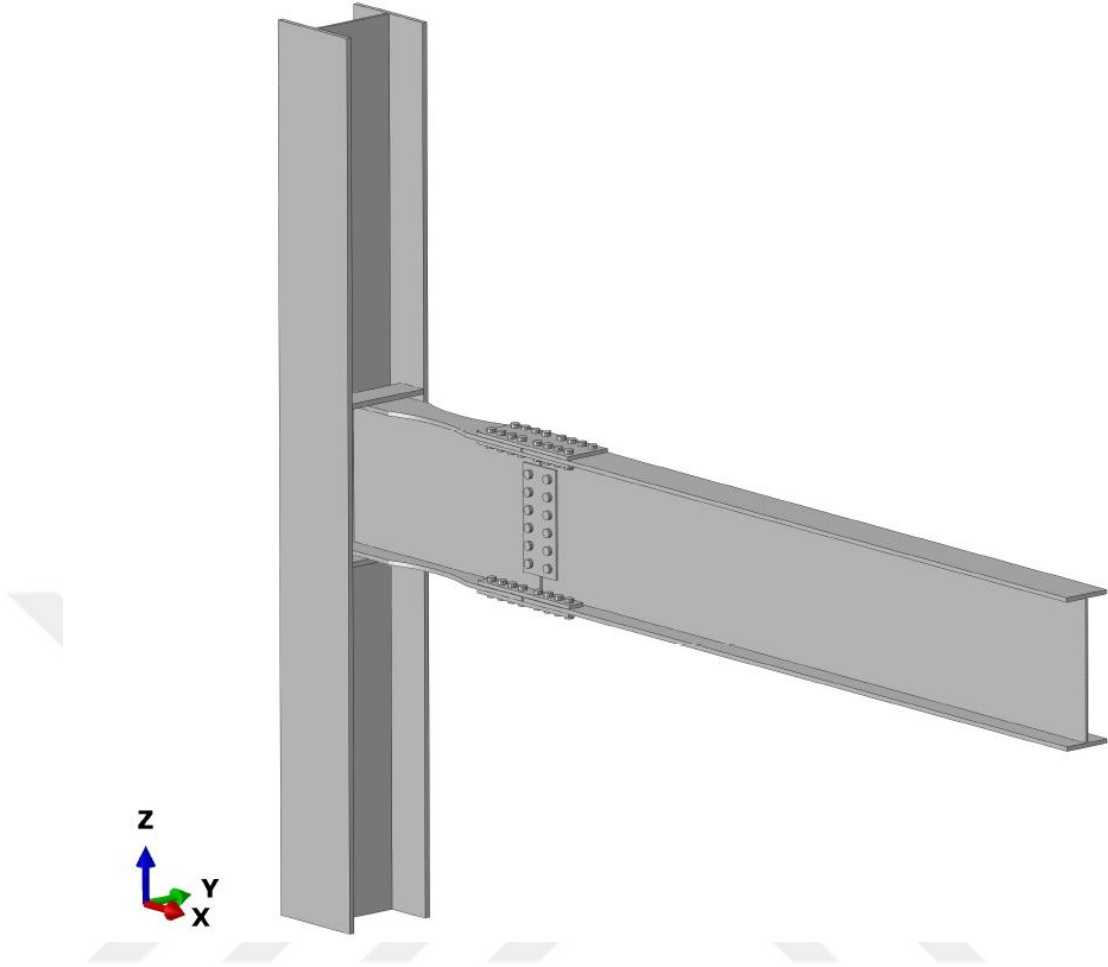
Şekil 6.43 : CT-RBS numunesinin çizimleri.

İncelenen birleşimler, Kore’de kullanılan standart hadde ürünü H-enkesitli çelik elemanlar kullanılarak imal edilmiştir. Kiriş profili olarak H-600×200×11×17; kolon profili olarak ise H-400×400×13×21 kullanılmıştır. Konsol kiriş-kiriş birleşimi tam dayanımlı bulonlu kiriş eki düzenlenerek oluşturulmaktadır. Başlıklarda 16 adet; gövdede ise 12 adet, karakteristik çekme dayanımı 1000 MPa olan F10T-M20 tipi yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır.

Kirişin kolon yüzünden yük uygulama noktasına kadar olan uzunluğu 3,51 m; kolonun mesnetleri arasındaki mesafe 3,00 m olarak belirtilmiştir. Yük uygulaması, kirişin ucuna bağlanan bir kriko vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

6.3.2 Birleşimin sonlu eleman modeli

Makalede belirtilen geometrik özellikler kullanılarak oluşturulan birleşimin sonlu eleman modeli Şekil 6.44’te görülmektedir.

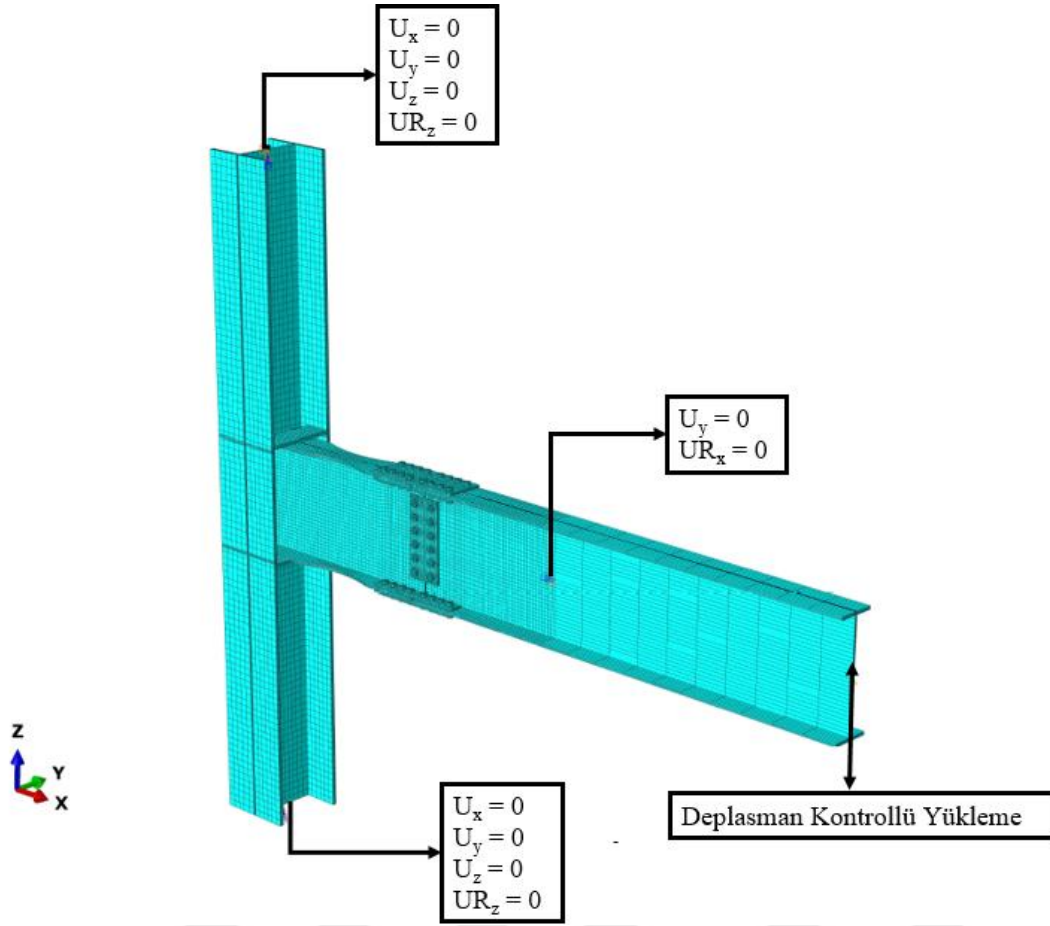


Şekil 6.44 : CT-RBS birleşiminin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.

6.3.3 Mesnetlerin modellenmesi

Modellerde kolonların alt ve üst uçlarının kesitleri basit mesnetler olarak tanımlanmaktadır. ABAQUS yazılımında ilgili kesit yüzeyleri “Rigid Body” komutu ile bir referans noktaya bağlanmaktadır. Böylece yüzeydeki her bir noktanın beraber hareket etmesi amaçlanmıştır.

Kolon üst ve alt kesiti basit mesneti temsil edecek sınır koşulları uygulanmıştır. Kiriş, burulma deformasyonu yaparak yanal burkulmasının önlenmesi amacıyla, uzunluğu boyunca belirli noktalardan orta bölgesinden yanal olarak desteklenmiştir (Şekil 6.45).



Şekil 6.45 : Mesnetlerin ve yük uygulama noktasının model üzerindeki görünüşleri

6.3.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli

Deneysel çalışma kapsamında yapılan çekme deneyi sonuçları dikkate alındığında çelik malzemenin özellikleri iki grup olarak değerlendirilmiştir. Çelik malzemesinin, akma gerilmesi (F_y), çekme dayanımı (F_u) ve yapısal çelik elastisite modülü (E) çizelge 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.20 : CT-RBS numunesindeki elemanların malzeme özellikleri.

Elemanlar	Malzeme	F_y [MPa]	E [MPa]	F_u [MPa]
Kiriş ve kolon	SHN400	276	200000	440
Diğer elemanlar	SS400	305	200000	450

Çalışmada kullanılan çelik malzemeler için çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_u) belirtilmemiştir. Bu değer $\epsilon_u = 120\epsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.21).

Çizelge 6.21 : CT-RBS numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.

Elemanlar	ε_y	ε_u
Kiriş ve kolon	0,00138	0,166
Diğer elemanlar	0,00153	0,183

Bulon malzemesi için de çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ε_u) belirtilmemiştir. Bu değer $\varepsilon_u = 8\varepsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.22).

Çizelge 6.22 : Birleşimde kullanılan bulonların malzemesinin özellikleri.

Elemanlar	E [MPa]	f_{yb} [MPa]	f_{ub} [MPa]	ε_y	ε_u
10.9 Bulon	200000	900	1000	0,005	0,036

Çevrimsel yükleme etkisindeki malzeme davranışını temsil edebilmek için malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediği doğrusal olmayan gerilme–şekil değiştirme davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilen denklem 6.11 kullanılacaktır (Ramberg ve Osgood, 1943).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (6.11)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε : Toplam şekil değiştirme.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

σ : Mühendislik gerilmesi, MPa.

K : Denklem sabiti.

n : Pekleşmeyi dikkate alan malzeme sabiti.

Ramberg–Osgood denklemi ile elde edilen sonuçlar yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, K ve n parametrelerinin belirlenmesi genellikle kolay olmamaktadır. Bu nedenle Hill (1944) tarafından, akma gerilmesinin doğrudan denkleme dahil edildiği denklem 6.12 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{F_y} \right)^n \quad (6.12)$$

Çekme dayanımı (F_u) ve maksimum uzama (ε_u) gibi bilinen mekanik parametreler kullanılarak, n değeri denklem 6.13 ile hesaplanır.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} \quad (6.13)$$

Kiriş ve kolon elemanları için gerilme - şekil değiştirme değerlerinin belirlenmesi gerektiğinden, ilk olarak n katsayısı hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_u = 0,166$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 440 \text{ MPa}$$

$$F_y = 276 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,166 - \frac{440}{200000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{440}{276}\right)} = 9,4$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş

ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.23).

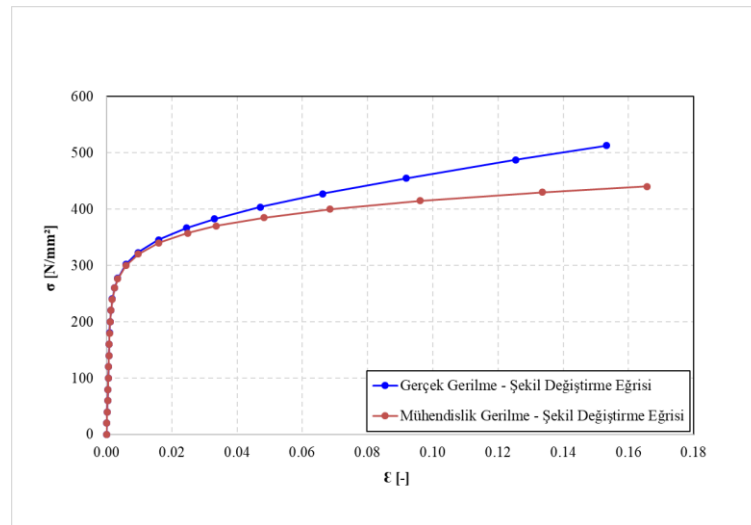
Çizelge 6.23 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004

Çizelge 6.23 (Devam): CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

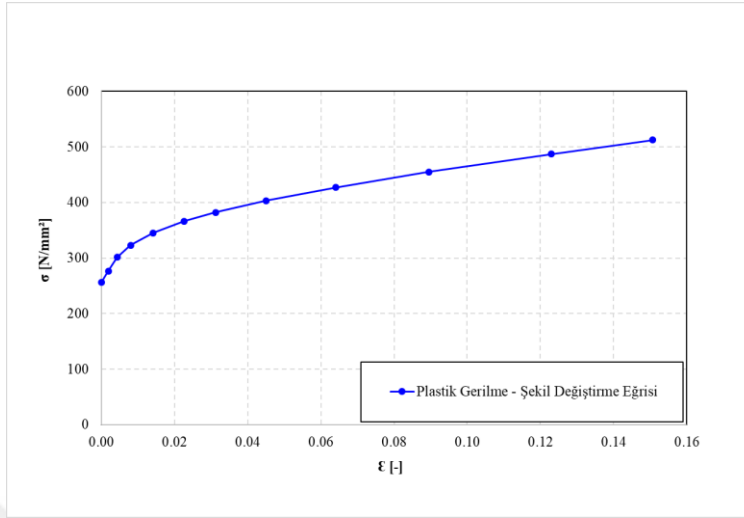
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0011	200	0,0011
220	0,0013	220	0,0013
240	0,0017	240	0,0017
260	0,0024	261	0,0024
276	0,0034	277	0,0034
300	0,0059	302	0,0059
320	0,0097	323	0,0096
340	0,0160	345	0,0159
357.5	0,0248	366	0,0245
370	0,0337	382	0,0331
385	0,0482	404	0,0471
400	0,0684	427	0,0662
415	0,0961	455	0,0918
430	0,1337	487	0,1255
440	0,1656	513	0,1532

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.46’da gösterilmektedir.



Şekil 6.46 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolonun gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.47’de gösterilmektedir.



Şekil 6.47 : CT-RBS numunesindeki kiriş ve kolonun gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.

CT-RBS numunesinde kullanılan diğer elemanların gerilme - şekil değiştirme değerleri de benzer şekilde n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,183$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 450 \text{ MPa}$$

$$F_y = 305 \text{ MPa}$$

$$n = 11,6$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve ardından bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. (Çizelge 6.24).

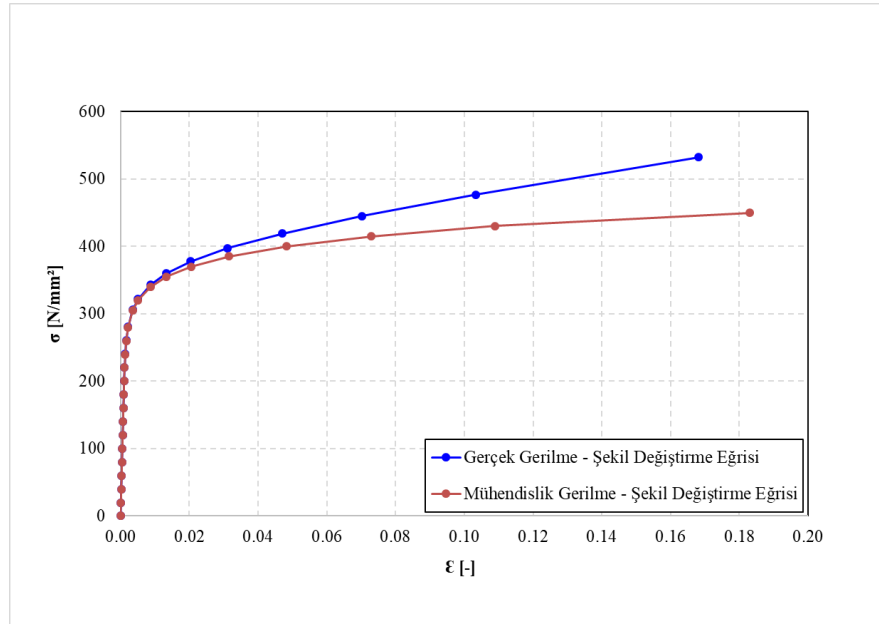
Çizelge 6.24 : CT-RBS numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003

Çizelge 6.24 (Devam): CT-RBS numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

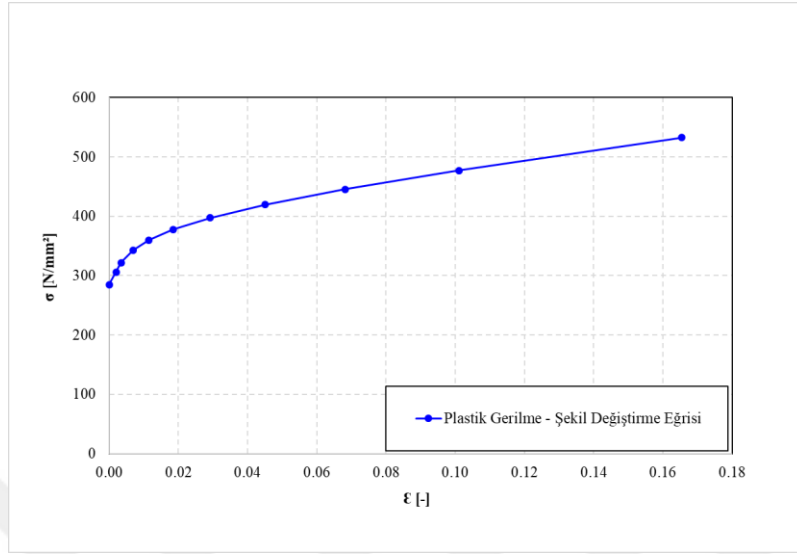
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0013	240	0,0013
260	0,0016	260	0,0016
280	0,0021	281	0,0021
305	0,0035	306	0,0035
320	0,0051	322	0,0051
340	0,0087	343	0,0087
355	0,0134	360	0,0133
370	0,0206	378	0,0204
385	0,0316	397	0,0311
400	0,0482	419	0,0471

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.48’de gösterilmektedir.



Şekil 6.48 : CT-RBS numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.49’da gösterilmektedir.



Şekil 6.49 : P3 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,036$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 900 \text{ MPa}$$

$$n = 26$$

n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.25).

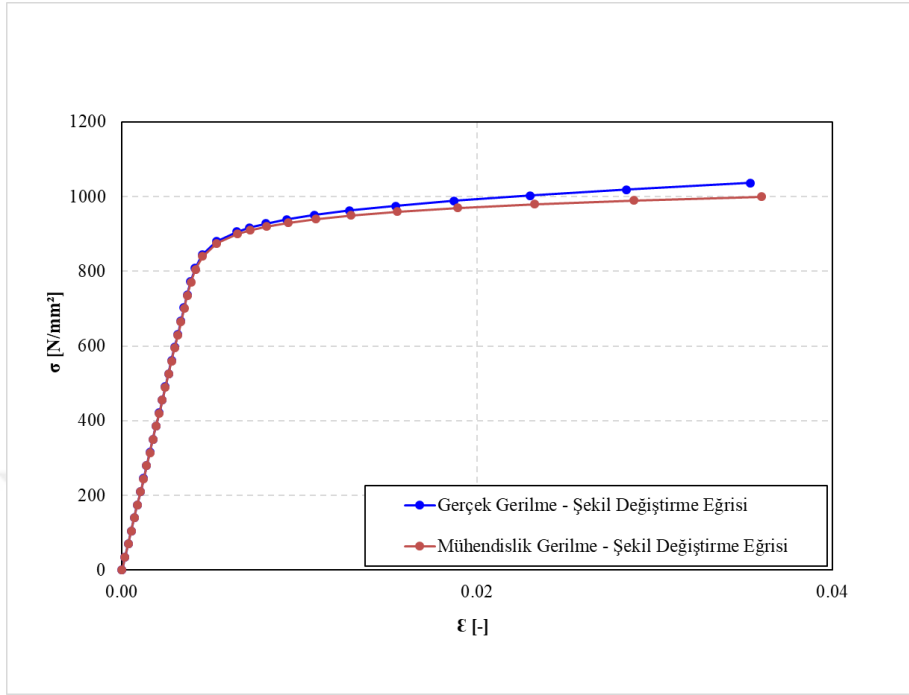
Çizelge 6.25 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0004	70	0,0003

Çizelge 6.25 (Devam): Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –
şekil değiştirme değerleri.

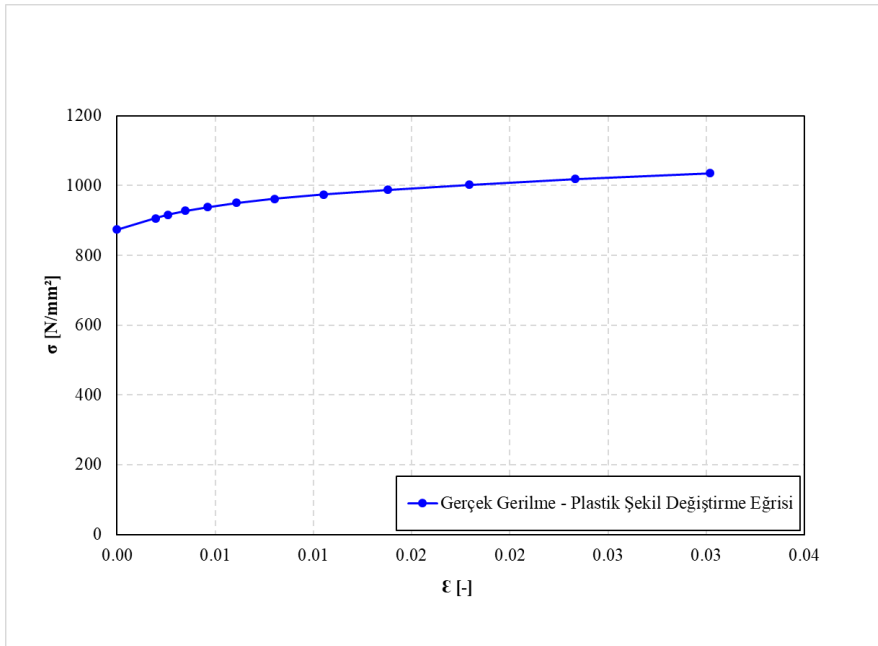
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0009	175	0,0009
210	0,0011	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0014	280	0,0014
315	0,0016	315	0,0016
350	0,0018	351	0,0017
385	0,0019	386	0,0019
420	0,0021	421	0,0021
455	0,0023	456	0,0023
490	0,0025	491	0,0024
525	0,0026	526	0,0026
560	0,0028	562	0,0028
595	0,0030	597	0,0030
630	0,0032	632	0,0031
665	0,0033	667	0,0033
700	0,0035	702	0,0035
735	0,0037	738	0,0037
770	0,0039	773	0,0039
805	0,0041	808	0,0041
840	0,0045	844	0,0045
875	0,0053	880	0,0053
900	0,0065	906	0,0065
910	0,0072	917	0,0072
920	0,0081	927	0,0081
930	0,0093	939	0,0093
940	0,0109	950	0,0108
950	0,0129	962	0,0128
960	0,0155	975	0,0154
970	0,0189	988	0,0187
980	0,0232	1003	0,0230
990	0,0288	1019	0,0284
1000	0,0360	1036	0,0354

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.50’de gösterilmektedir.



Şekil 6.50 : Bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.51’de gösterilmektedir.



Şekil 6.51 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Elde edilen akma sonrası gerilme - plastik şekil değiştirme değerleri, ABAQUS yazılımında birleşik pekleşme (combined hardening) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Birleşik pekleşme modeli kinematik pekleşme bileşeni half cycle tanımı ile, izotropik pekleşme bileşeni ise “cyclic hardening” tanımı ile yapılacaktır.

Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşenine ait çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) özelliğinin nümerik modelde tanımı için gerekli olan Q ve b parametreleri, Krolo ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada S275 yapı çeliği için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 6.26).

Çizelge 6.26 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).

Yapısal Çelik Sınıfı	Q [MPa]	b [-]
S275	25,6	4,4
S355	20,8	3,2

Enkesiti zayıflatılmış tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin doğrulama modeli, bu tez kapsamından türetilen ve Arabian Journal for Science and Engineering dergisinde 2024 yılında yayımlanan, "Nonlinear Behavior of I-Shaped Reduced Beam-to-H-Shaped Column Weak Axis Moment Connections Under Cyclic Loading" başlıklı bilimsel makalede yer alan sonlu eleman modellerinin doğrulanması için kullanılmıştır. Bu tez kapsamında geliştirilen zayıflatılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, referans birleşim (RBS-A) olarak yayımlanan makalede yer almaktadır. İlgili makalenin teslimi sürecinde henüz hasar modeli geliştirilmediğinden makale çalışmasında kullanılan nümerik modellerde hasar durumu, sünek hasar modeli (ductile damage model) kullanılarak değerlendirilmemiştir.

Önceki bölümlerde, ABAQUS yazılımında sünek hasar modelinin doğruluğu, Krolo (2017) tarafından gerçekleştirilen malzeme çekme ve basınç testleri sonucunda kalibre edilen hasar modeli parametreleri kullanılarak değerlendirilmiştir (Çizelge 6.27). Bu doğrulama, literatürde yer alan bir T-parçalı kiriş-kolon birleşiminin nümerik olarak modellenmesi ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilmiş; analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla yeterli derecede bir uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 6.27 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ε_D^{pl}	Gerilme	Şekil
	Üç Eksenliliği	Değiştirme Hızı
0,6308	0,330	0,001
0,6249	0,380	0,001
0,6188	0,430	0,001
0,6124	0,480	0,001
0,6061	0,520	0,001
0,5996	0,570	0,001
0,5931	0,610	0,001

Çizelge 6.27'ye göre, hasar modeli parametreleri malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olup çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında gerçekleştirilen testlerin sonucunda elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilmiştir. Tekrarlı yükler altında incelenen tüm kiriş-kolon birleşimlerinin sonlu eleman modellerinde çelik malzemenin davranış modeli, buradaki hasar modeli parametreleri esas alınarak hazırlanmıştır. Azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşiminin sonlu eleman modelinin doğrulanması için en önemli faktörlerden biri, plastik şekil değiştirmelerin deneysel çalışmanın sonucunda elde edildiği gibi, nümerik analiz sonucunda da azaltılmış kiriş enkesitinin bulunduğu bölgede oluşmasının gözlenmesidir. Bu davranışın sağlanması ve elde edilen moment-dönme eğrilerinin de uyumlu olması halinde karşılaştırılan sonuçların tutarlı olduğu belirtilebilir. Hasar durumu değerlendirmesi ise bu noktadan sonra devreye girmektedir ve doğrudan plastik şekil değiştirmelerin mertebesine bağlıdır. Hasar başlangıcı prensip olarak, eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri, tanımlanan düzeye ulaştığında, $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$ ($D = 0$), dayanımın azalmaya başlaması ile meydana gelmektedir. Hasarın tamamen oluşması ise toplam hasar değişkeninin $D = 1$ değerine ulaşmasıyla eşdeğer plastik şekil değiştirmenin (ε_f^{pl}) olduğu durumda gözlemlenir. Hasar oluşumu analizde sonlu elemanların silinerek hesap adımlarından çıkarılmasıyla temsil edilir. Hasar modelinin (ductile damage model) malzeme davranışına dahil edilmediği durumlarda ise, hasar oluşma potansiyeli sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen en büyük eşdeğer plastik şekil değiştirme değerinin (PEEQ) toplam hasar değişkeni $D = 0$ olduğu durumdaki $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$ değeriyle karşılaştırılması şeklinde değerlendirilebilir.

Özetle, azaltılmış kiriş enkesitli kiriş-kolon birleşimi modelinin doğrulanması için yapılan analizin son adımında elde edilen PEEQ değeri, $\bar{\epsilon}_D^{pl} = 0.593$ değerinden küçükse hasar değişkeninin $D = 0$ olduğu ve herhangi bir hasar durumu ile dayanım kaybının oluşmadığı sonucuna varılabilir. Bu doğrulama çalışmasında hasar modeli malzeme davranış modeline dahil edilmediğinden bu şekilde bir değerlendirme yapılması uygun görülmüştür.

Bu tez kapsamında geliştirilen ve doktora tezinden üretilen makalede de yer alan RBS-A azaltılmış kiriş enkesitli zayıf eksen kiriş-kolon birleşiminin makale yayımlandıktan sonraki doğrulama çalışmasına ait hasar durumu, yayımlanan makaledeki hasar durumu değerlendirme yönteminden farklı olarak, malzeme davranış modeline hasar modeli dahil edilerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeye ait sonuçlar “Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Değerlendirmesi” bölümünde sunulmuştur.

6.3.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar

Makalede çelik elemanlar arasındaki temas yüzeyleri ile ilgili bir bilgi bulunmaması nedeniyle temas yüzeyleri arasında sürtünme katsayısı 0,30 olarak kabul edilmiştir. Bulon başlıkları kolaylık açısından daire şeklinde modellenmiştir. Makalede belirtilmemesi nedeniyle, bulon delikleri standart bulon deliğini yansıtmaması açısından bulon çapından 2 mm daha büyük olacak şekilde modellenmiştir.

6.3.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli

Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmaktadır. Tamamlayıcı yüzeyler içerisine belli ölçüde geçebilen esas yüzeyler, birleştirilen elemanlardan daha rijit ve daha seyrek sonlu eleman ağına sahip olanı olarak seçilmiştir. Örneğin; bulon başı ile kiriş eki başlık levhasının birleştiği bölgede bulon başının alt yüzeyi ve bulon gövdesinin dış yüzeyi ana yüzey olarak, kiriş eki başlık levhasının bulon başı ile temas eden yüzeyleri ve delik yüzeyleri ise tamamlayıcı yüzey olarak tanımlanmıştır.

6.3.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim

Birleşim modellerinde yer alan bulonlu birleşimlerde, bulonların gövdesinin levhalardaki ve kirişteki delikler ve levhaların temas eden yüzeyleri arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanacaktır.

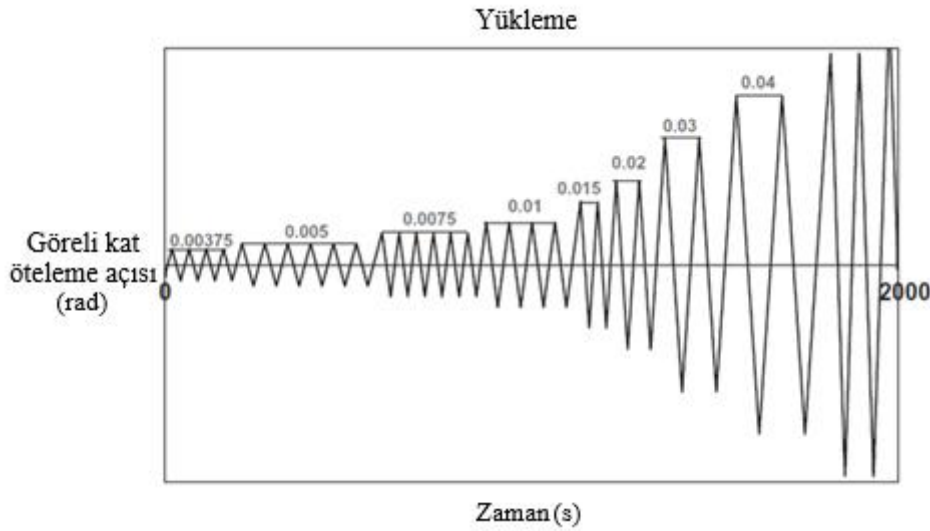
Birleşim yüzeylerinin normal bileşeninin davranışını belirlemede “Hard Contact” modeli kullanılacaktır. Teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modeli dikkate alınacaktır. Teğetsel davranış modeli, temas yüzeyleri arasında oluşması beklenen sürtünme etkisinin formülasyonu olarak “Penalty” özelliği seçilmek suretiyle, elemanların yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı makalede belirtilmediği için 0,30 olarak varsayılmıştır.

6.3.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması

Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması ile sağlanmaktadır. Kaynak işlemi uygulanarak teşkil edilen birleşimler için, kaynak malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, bu etkileşim modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

6.3.9 Analiz yöntemi

Modelin sonlu eleman analizi tek bir adımda gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolü olarak, AISC 341-22 Bölüm K2b.4’te tanımlanan prosedür esas alınmış ve analiz bu protokole uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.52).



Şekil 6.52 : AISC 358-22’de tanımlanan yük protokolü.

Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak zaman tanım alanında (direct integration) dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yüklemenin görelî olarak yavaş

gerçekleştirdiği ve atalet etkilerinin sınırlı olduğu durumları temsil eden “quasi-static” (yarı-statik) yaklaşım kapsamında uygulanmıştır. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için “Full Newton-Raphson yöntemi” tercih edilmiştir. Sünek malzeme davranışı içeren hasar modelleri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi genellikle simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu durum, çözüm algoritmasının yakınsama davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ABAQUS yazılımının çözüm seçenekleri arasında yer alan ve simetrik olmayan sistem matrislerinin çözümüne olanak tanıyan “unsymmetric matrix solver” seçeneği, çözüm kararlılığını artırmak ve yakınsama problemlerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

6.3.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı

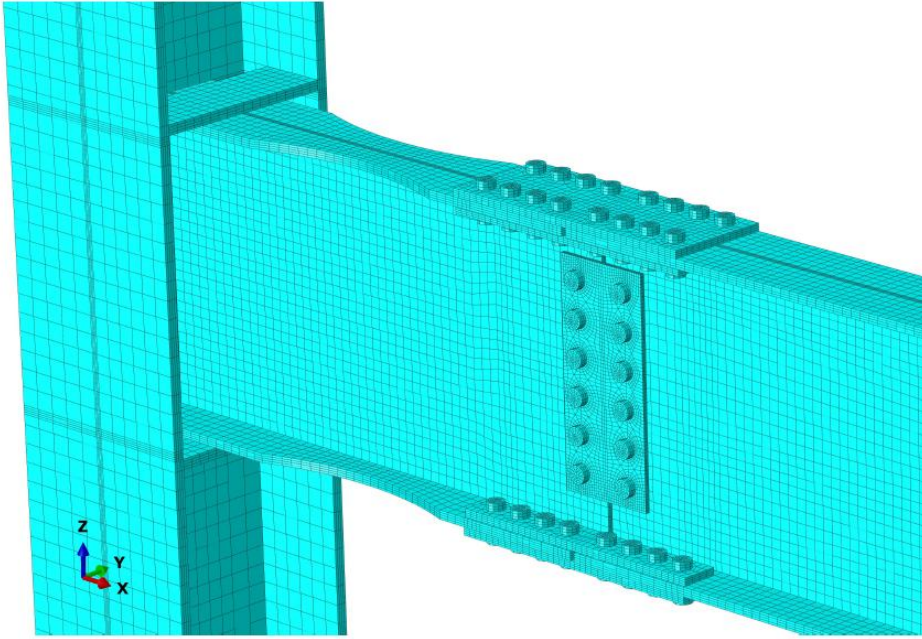
Modelde, üç boyutlu katı, doğrusal ve azaltılmış integrasyon tanımı kullanılan C3D8R tipi 8 (sekiz) düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların, daha fazla integrasyon noktasına sahip ve dolayısıyla analiz sonucunun doğruluk oranı çok yüksek olan kuadratik eleman olan C3D20 elemanı ile gerilme dağılımları karşılaştırıldığında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, C3D8R elemanlarının kayma kilitlenmesi (shear locking) sorunu nedeniyle analiz süresini önemli ölçüde azaltması nedeniyle eğilme etkilerinin belirleyici olduğu yapısal analizlerde tercih edilmesi uygun görülmektedir (Han ve diğ., 2016).

Birleşim bölgeleri, plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı alanlar olduğundan, bu bölgelerde sonlu eleman ağı diğer bölgelere kıyasla daha sık tanımlanmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip bölgeler, çözüme uygun olan yapısal (structural) sonlu eleman ağı oluşturabilmek için, bölümlendirme (partition) özelliği kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Böylece farklı geometrideki bir elemanın bölündüğü düzlem üzerinde iki farklı geometri arasında ortak noktalar oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda oluşturulan ortak düğüm noktaları sayesinde, yazılım aynı eleman üzerinde yer alan farklı geometrileri birbirinden ayırt edebilmekte ve bu sayede düzenli ve uyumlu bir katı eleman ağı oluşturulabilmektedir.

Sonlu eleman modelinin doğru yapısal davranışı yansıtabilmesi açısından, elemanların kalınlığı boyunca kaç katmana bölündüğü son derece kritiktir. Han ve diğ. (2016) tarafından, AISC-358’de tanımlı kirişin kolona doğrudan kaynaklı olduğu kiriş-kolon birleşiminin (WUF-W) tekrarlı yükler altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla birleşimin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan C3D8R

elemanlarının kalınlık boyunca katman sayısının analiz sonuçlarına etkisini değerlendirmek için birleşimin belirli bir bölgesi, sırasıyla 1, 2, 4 ve 6 katman kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme dağılımları, 1 katmanlı model referans alınarak karşılaştırılmış ve 4 katmanlı modelin, 6 katmanlı modelle oldukça benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, C3D8R elemanlarıyla yapılan analizlerde kalınlık boyunca en az 4 katman kullanmanın, güvenilir ve istenilen yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmesi açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu bilgiler ışığında, elemanlar kalınlığı boyunca en az 4 katman olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 6.53).

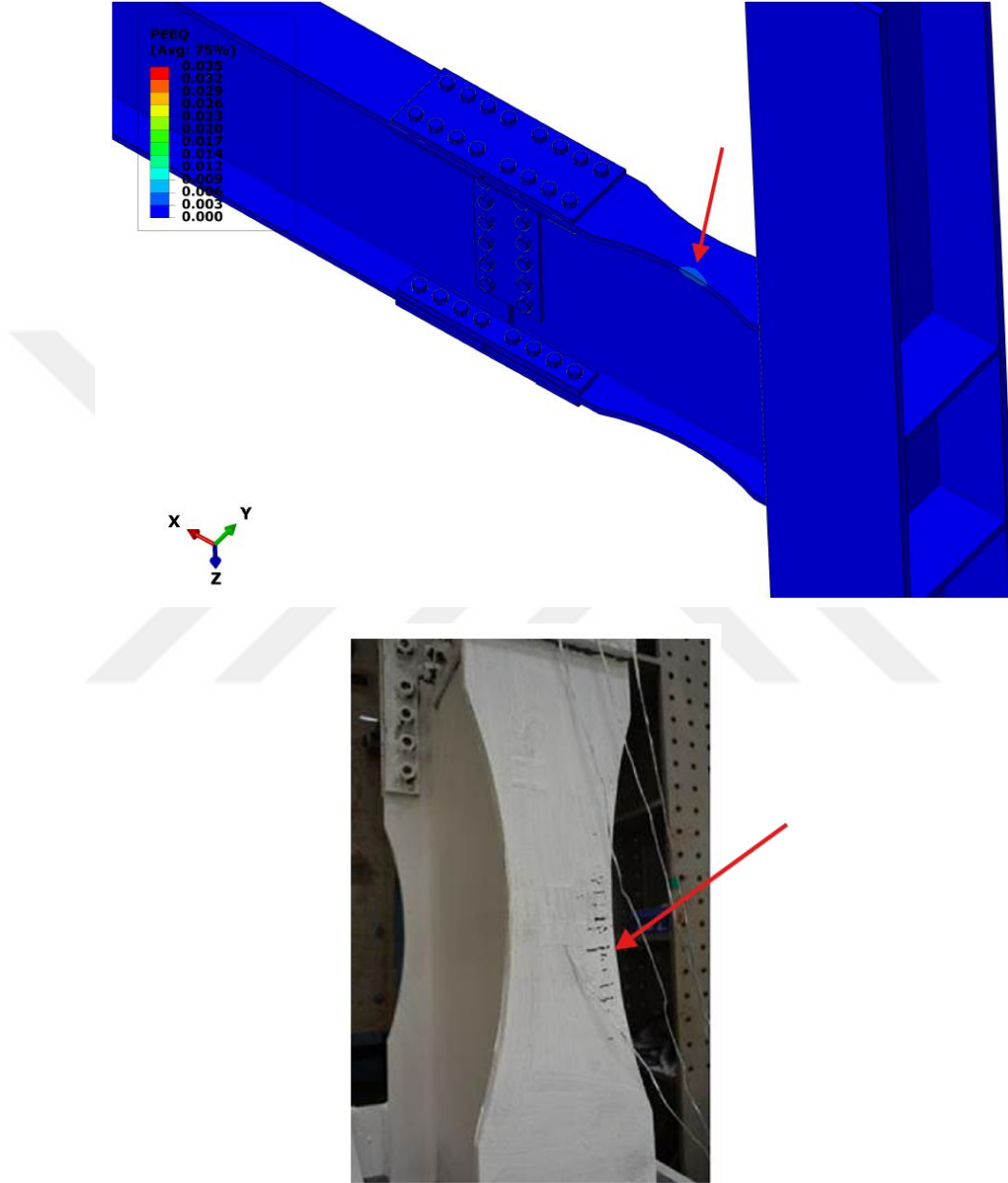


Şekil 6.53 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.

6.3.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Referans alınan çalışma kapsamında deneyi yapılan CT-RBS numunesinin sonlu eleman modeli, ilgili makalede sunulan verilerden yararlanılarak ve bu bölümde açıklanan modelleme esaslarına uygun şekilde ABAQUS yazılımında oluşturulmuş; model, tekrarlı yükler altında analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, söz konusu çalışmada raporlanan deneysel veriler ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum değerlendirilmiştir.

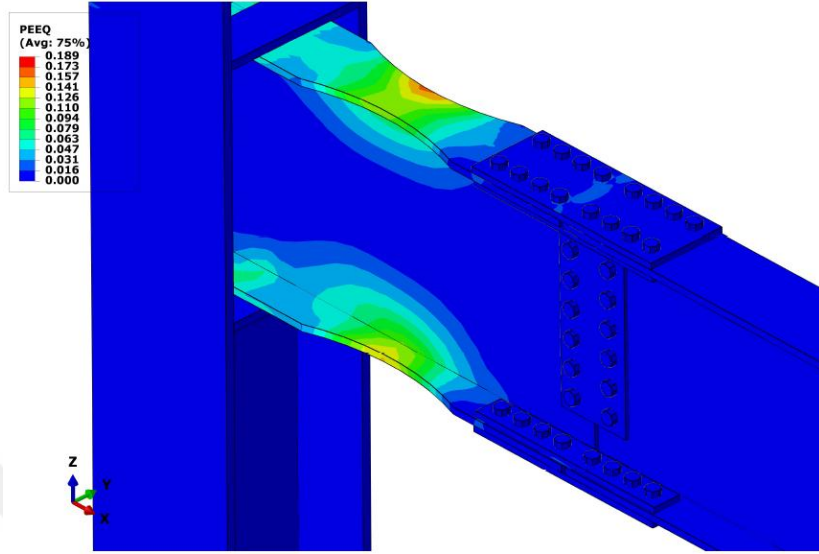
Analizde %1 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, kiriş başlıklarında, azaltılmış kiriş enkesitinin orta bölgesinde, makalede belirtildiği gibi akma davranışının başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.54).



Şekil 6.54 : %1 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

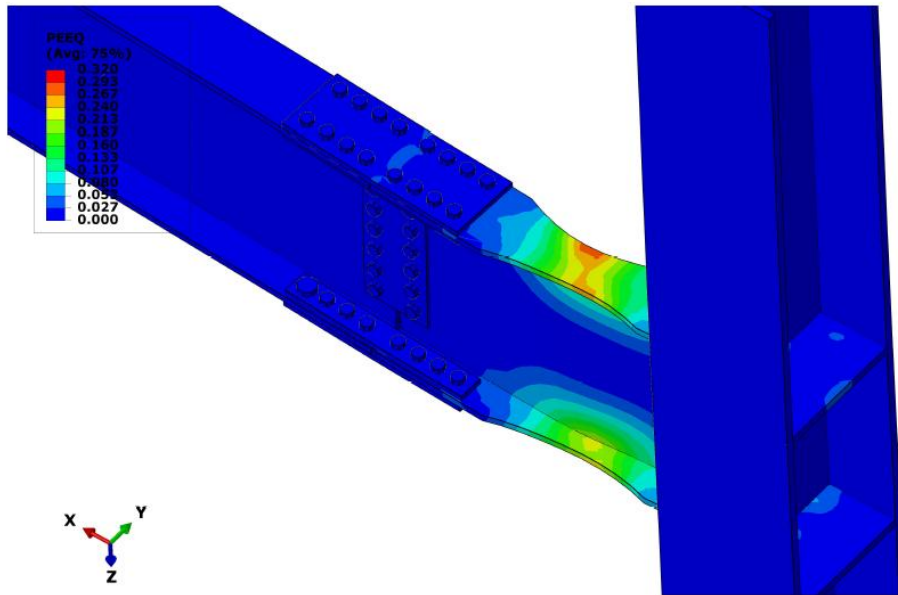
%4 görelî kat öteleme açısı arasında, kiriş başlık bölgesindeki plastik deformasyonların arttığı, kiriş ucuna ve kiriş gövdesine doğru yayıldığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmanın makalesinde, son yüklemenin ardından kiriş başlıkları hizasındaki rijitleştirici levhalarda plastik şekil değiştirmelerin meydana

geldiği rapor edilmiştir. Sonlu eleman analizi sonucunda da aynı bölgelerde benzer plastik deformasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.55).



Şekil 6.55 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonların kiriş başlığından diğer bölgelere yayılışı.

%5 görel kat öteleme açısında, azaltılmış kiriş enkesitinde plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaşmasıyla, deney sonuçlarında elde edildiği gibi, yerel burkulma davranışının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sonlu eleman analizi sonucunun deneyde gözlemlenen yerel burkulma davranışını başarıyla yansıttığını göstermektedir (Şekil 6.56).

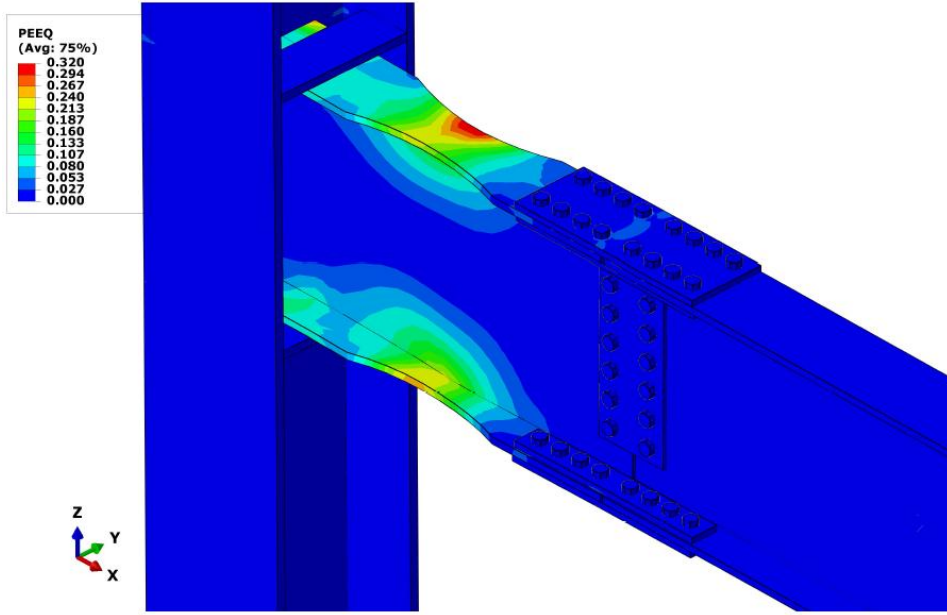


Şekil 6.56 : Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.



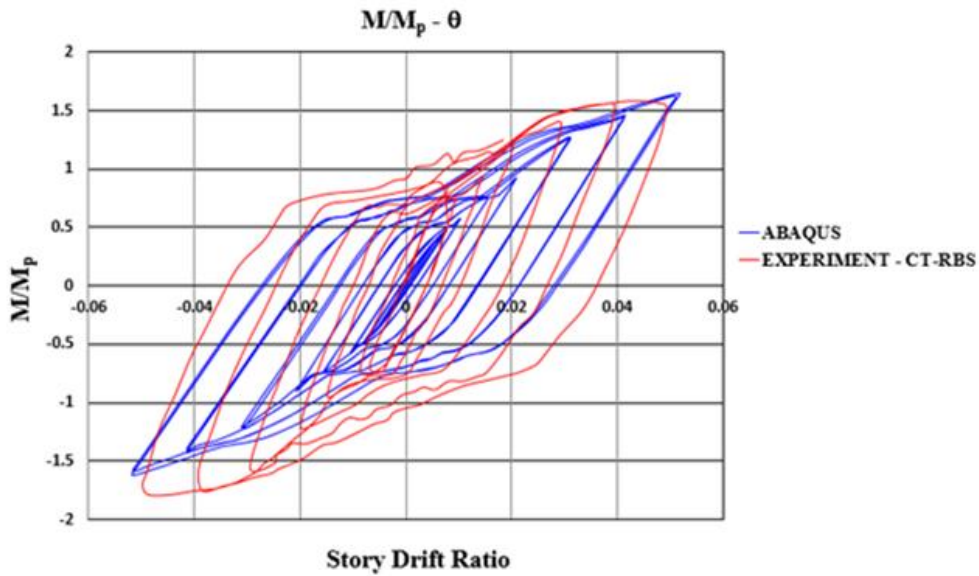
Şekil 6.56 (devam): Deney numunesi ile sonlu eleman modelinin şekil değiştirmiş durumlarının karşılaştırılması.

Çatlak oluşum potansiyelini değerlendirmek için analizin son aşamasındaki PEEQ değerleri incelenmiştir. Elde edilen en büyük PEEQ değeri 0,32 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.57). Bu değer, Krolo (2017) tarafından yapılan çalışmada, hasarın başlangıcını temsil eden PEEQ değerinden $\bar{\epsilon}_D^{pl} = 0,59$ ($D = 0$) daha küçük olduğundan, modelde bir hasar tanımı dahil edilmiş olsaydı dahi, son analiz adımıda elemanın dayanımında çatlak oluşumu nedeniyle bir azalma beklenmeyeceği şeklinde yorumlanabilir. Doğrulama modelinin geliştirildiği Oh ve diğ., (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmanın makalesinde CT-RBS numunesinde, hedef yer değiştirme düzeyi olan %5 göreceli kat öteleme açısına kadar herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmediği ve deney sonunda sadece plastik deformasyonların ve yerel burkulmanın meydana geldiğini belirtilmiştir. Bu durum elde edilen sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.57 : Analiz sonucunda elde edilen plastik şekil değiştirme dağılımı.

Analiz sonucunda, tekrarlı yükler altında birleşimin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, kolon merkezindeki normalize moment (M/M_p) ile görel kat ötelemesi açısı arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel eğriler oluşturulmuştur. Normalize eğilme momenti (M/M_p), kiriş merkezinde eğilme oluşan eğilme momentinin (M), kiriş plastik eğilme momenti kapasitesine (M_p) oranı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucu ve deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğriler Şekil 6.58’de gösterilmiştir.



Şekil 6.58 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.

Sonlu eleman analizi sonucu elde edilen çevrimsel eğri ile deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğrilerin karakteristiklerinin birbirleriyle yüksek düzeyde uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Kiriş başlığında akmanın başlamasını takiben, sonlu eleman modelinde birleşimi oluşturan elemanlar arasında bir miktar kayma gözlemlenmiş ve bu durum deneysel bulgularla tutarlılık göstermiştir. %2 görelî kat ötelemesi açısına kadar uygulanan yük sabit kalmış; bu durum, konsol kiriş-kiriş bulonlu birleşimindeki ek levhaları ve kiriş arasındaki temas yüzeylerinde sürtünme kuvvetinin aşılması nedeniyle meydana gelen kayma davranışından kaynaklanmıştır. Yük düzeyi arttıkça, kayma davranışının etkisi azalmış ve bu eğilim deneysel sonuçlarla da örtüşmüştür. Birleşimdeki bu kayma, çevrimsel eğrilerde çevrim sıkışması (pinching) davranışına neden olmuştur. Ancak, bu çalışmada geliştirilen tam penetrasyonlu küt kaynaklı ve azaltılmış I-enkesitli kiriş-zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinde kaymaya neden olabilecek herhangi bir bulonlu bağlantı bulunmadığından, doğrulama modelinde gözlemlenen bu çevrim sıkışması davranışının geliştirilen birleşimlerde ortaya çıkması beklenmemektedir.

Analitik çalışma ile tam ölçekli deneyin sonuçları arasındaki bu uyumun bir sonucu olarak, doğrulama modelinin analizinde uygulanan modelleme esaslarının; bu çalışma kapsamında geliştirilen tam penetrasyonlu küt kaynaklı ve azaltılmış I-enkesitli kiriş-zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin modellenmesinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.4 Bulonlu Başlık Levhalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi Modelinin Doğrulanması

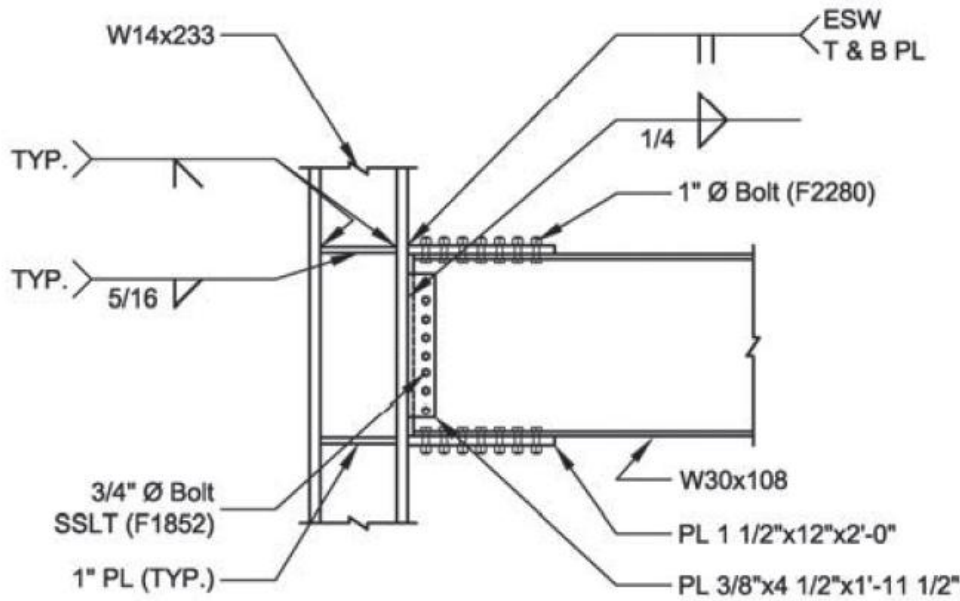
Bu çalışma kapsamında, bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin ABAQUS sonlu eleman modellerinin analizinde kullanılacak olan malzeme davranışı, katı eleman tipleri, yüzey etkileşimleri gibi modelleme esasları, daha önce deneyi yapılan benzer bir kiriş-kolon birleşimi dikkate alınarak doğrulanacaktır.

6.4.1 Esas alınan deneysel çalışma

Doğrulama çalışması için Sato ve diğ. (2007) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma esas alınmıştır. Bu araştırmanın amacı, sahada kaynak gereksinimini ortadan kaldırarak hem ekonomik hem de öngörülebilir şekilde sünek davranış sergileyen,

başlık levhaları kolon başlığına atölyede kaynaklanan ve kiriş başlığına sahada bulonlanan bulonlu başlık levhali birleşimlerin deprem yükleri altındaki uygunluğunu incelemektir.

Çalışmada toplam üç adet numune test edilmiştir. Bu tez kapsamında, bu numunelerden biri olan BFP-1 adlı birleşim ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak modellenmiştir. Birleşimde, kiriş elemanı olarak W30×108; kolon elemanı için ise W14×233 profili kullanılmıştır. Birleşim detayı değişkenleri ve birleşimlerin geometrileri Şekil 6.59'da gösterilmektedir.



Şekil 6.59 : BFP-1 numunesinin geometrisi.

Referans alınan çalışma raporunda verilen bilgilere dayanarak, kirişin kolon yüzünden yük uygulama noktasına kadar olan uzunluğu 4,52 m; kolonun mesnetleri arasındaki mesafe yaklaşık 3,66 m olarak dikkate alınmıştır. Yük uygulaması, kiriş ucuna bağlanan bir krika vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

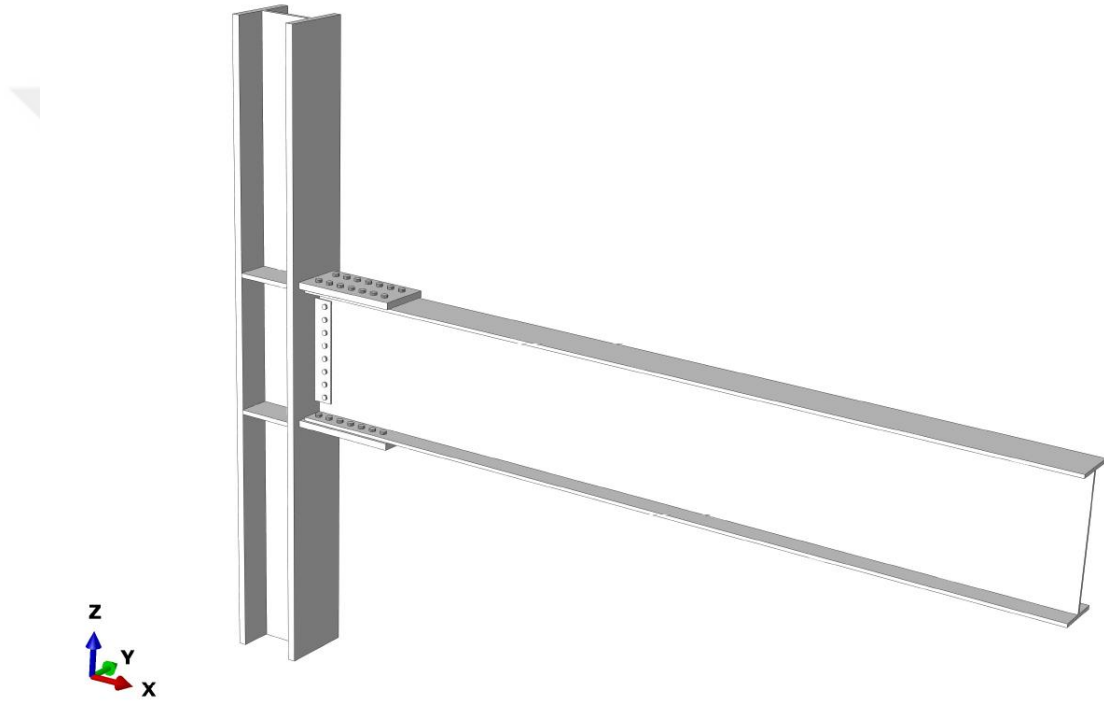
Kolon panel bölgesi takviye levhası ile güçlendirilmemiştir. Kiriş başlıkları hizasında 1 inç (25.4 mm) kalınlığında süreklilik levhaları kullanılmıştır.

Başlık levhaları ile kolon başlığı arasındaki birleşimde her biri 1 inç (25.4 mm) çapında olan toplam 14 adet A490TC sınıfı bulon kullanılmıştır. Kiriş başlığı üzerindeki bulon delikleri standart dairesel, başlık levhasındaki delikler ise 1¼ inç (31.8 mm) çapında olup geniş delik olarak uygulanmıştır.

Kiriş gövdesi ile kayma levhası (shear tab) arasındaki bağlantı, ASTM F1852 (A325TC) sınıfı, 3/4 inç (19.05 mm) çapında tork kontrollü bulonlarla sağlanmıştır. Kiriş gövdesindeki delikler standart dairesel; kayma levhasındaki delikler ise kiriş doğrultusunda kısa oval delik olarak düzenlenmiştir. Tüm bulonlara tam ön çekme kuvveti uygulanmıştır.

6.4.2 Birleşimin sonlu eleman modeli

Referans alınan çalışma raporunda belirtilen geometrik özellikler kullanılarak oluşturulan birleşimin sonlu eleman modeli Şekil 6.60'ta gösterilmiştir.

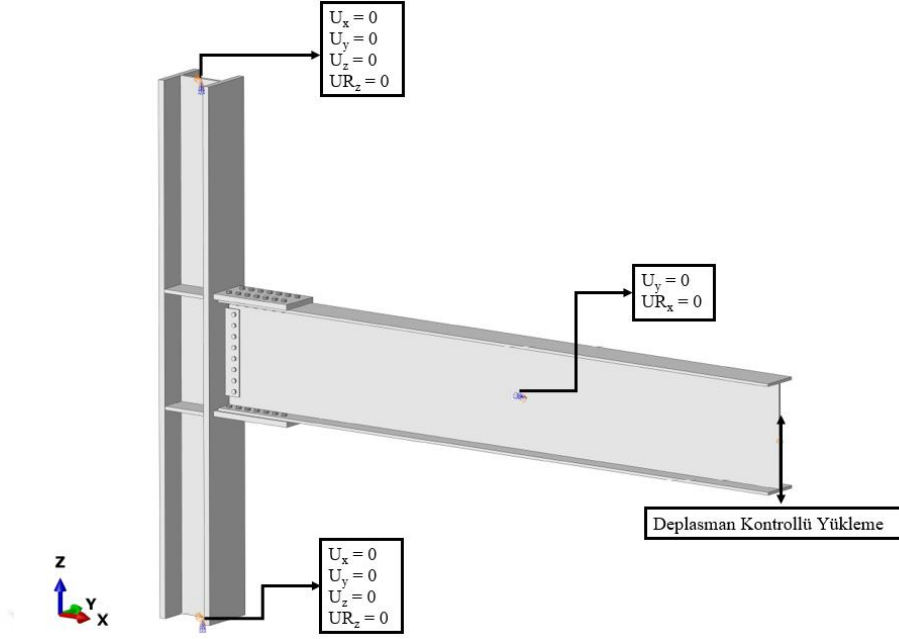


Şekil 6.60 : BFP-1 numunesinin sonlu eleman modelinin izometrik görünüşü.

6.4.3 Birleşim modelinin mesnet koşulları

Modellerde kolonların alt ve üst uçlarının kesitleri basit mesnetler olarak tanımlanmaktadır. ABAQUS yazılımında ilgili kesit yüzeyleri “Rigid Body” komutu ile bir referans noktasına bağlanmaktadır. Böylece yüzeydeki her bir noktanın beraber hareket etmesi amaçlanmıştır.

Kolon üst ve alt kesiti basit mesneti temsil edecek sınır koşulları uygulanmıştır. Kiriş, burulma deformasyonu yaparak yanal burkulmasının önlenmesi amacıyla, uzunluğu boyunca belirli noktalardan orta bölgesinden yanal olarak desteklenmiştir (Şekil 6.61).



Şekil 6.61 : BFP-1 numunesinin sonlu eleman modelinin mesnet koşulları.

6.4.4 Elemanların malzeme özellikleri ve malzeme davranış modeli

Deneyisel çalışma kapsamında yapılan çekme deneyi sonuçları dikkate alındığında elemanların malzeme özellikleri iki grup altında değerlendirilmiştir. Akma gerilmesi (F_y), çekme dayanımı (F_u) ve yapısal çelik elastisite modülü (E) Çizelge 6.28’de verilmiştir.

Çizelge 6.28 : BFP-1 numunesinde kullanılan malzemenin özellikleri.

Elemanlar	Malzeme Sınıfı	F_y [MPa]	E [MPa]	F_u [MPa]
Kiriş ve Kolon	A992	355	200000	528
Diğer elemanlar	A572 Gr.50	417	200000	603

Çalışmada kullanılan çelik malzemeler için akma gerilmesine ve çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değerleri Çizelge 6.29’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.29 : BFP-1 numunesindeki elemanların malzemelerinin birim şekil değiştirme değerleri.

Elemanlar	ϵ_y	ϵ_u
Kiriş ve Kolon	0,001775	0,27
Diğer elemanlar	0,002085	0,25

Bu çalışmada kullanılan A325 ve A490 tipi Amerikan standardı bulonlar için, Avrupa standardındaki 8.8 ve 10.9 sınıfı bulonlara ait mekanik özellikler esas alınmıştır.

Bulonlar için çekme dayanımına karşı gelen şekil değıştirme değeri (ε_u) belirtilmemiştir. Bu değeri $\varepsilon_u = 8\varepsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 6.30).

Çizelge 6.30 : Birleşimde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.

Elemanlar	E [MPa]	F _y [MPa]	F _{ub} [MPa]	ε_y	ε_u
8.8 Bulon	200000	640	800	0,0032	0,026
10.9 Bulon	200000	900	1000	0,0045	0,036

Çevrimsel yükleme etkisindeki malzeme davranışını temsil edebilmek için malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediğı doğrusal olmayan gerilme – şekil değıştirme davranışlarını tanımlamak amacıyla geliştirilen denklem 6.14 kullanılacaktır (Ramberg ve Osgood, 1943).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (6.14)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε : Toplam şekil değıştirme.

E : Yapısal çelik elastisite modülü, MPa.

σ : Mühendislik gerilmesi, MPa.

K : Denklem sabiti.

n : Pekleşmeyi dikkate alan malzeme sabiti.

Ramberg–Osgood denklemi ile elde edilen sonuçlar yüksek doğruluk sağlamakla birlikte, K ve n parametrelerinin belirlenmesi genellikle kolay olmamaktadır. Bu nedenle Hill (1944) tarafından, akma gerilmesinin doğrudan denkleme dahil edildiğı denklem 6.15 kullanılmıştır.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{F_y} \right)^n \quad (6.15)$$

Çekme dayanımı (F_u) ve çekme dayanımına karşılık gelen şekil değıştirme (ε_u) gibi bilinen mekanik parametreler kullanılarak, n değeri denklem 6.16 ile hesaplanır.

$$n = \frac{\ln(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002})}{\ln(\frac{F_u}{F_y})} \quad (6.16)$$

Kiriş ve kolon elemanlarının malzemesi için gerilme - şekil değiştirme değerlerinin belirlenmesi için n katsayısı hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_u = 0,27$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 528 \text{ MPa}$$

$$F_y = 355 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\ln(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002})}{\ln(\frac{F_u}{F_y})} = \frac{\ln(\frac{0,27 - \frac{528}{200000}}{0,002})}{\ln(\frac{528}{355})} = 12,3$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.31).

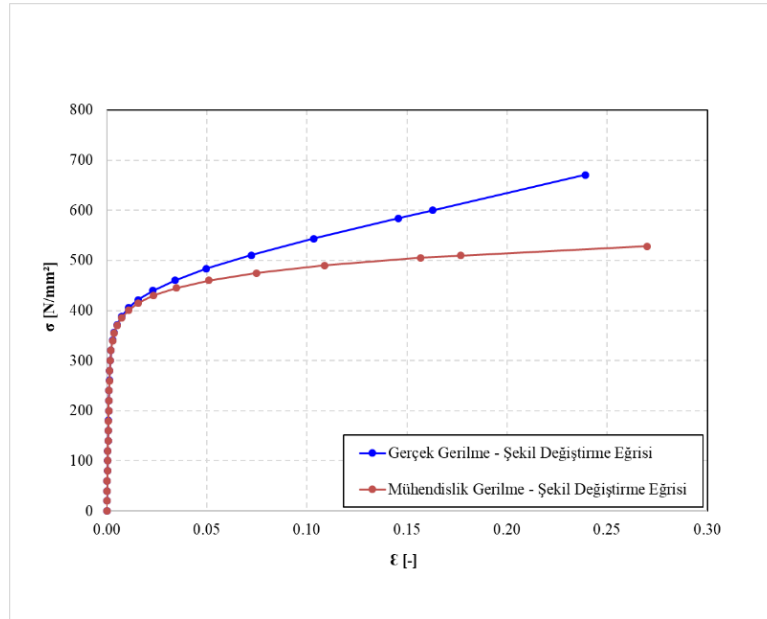
Çizelge 6.31 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanları için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012

Çizelge 6.31 (devam): BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanları için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

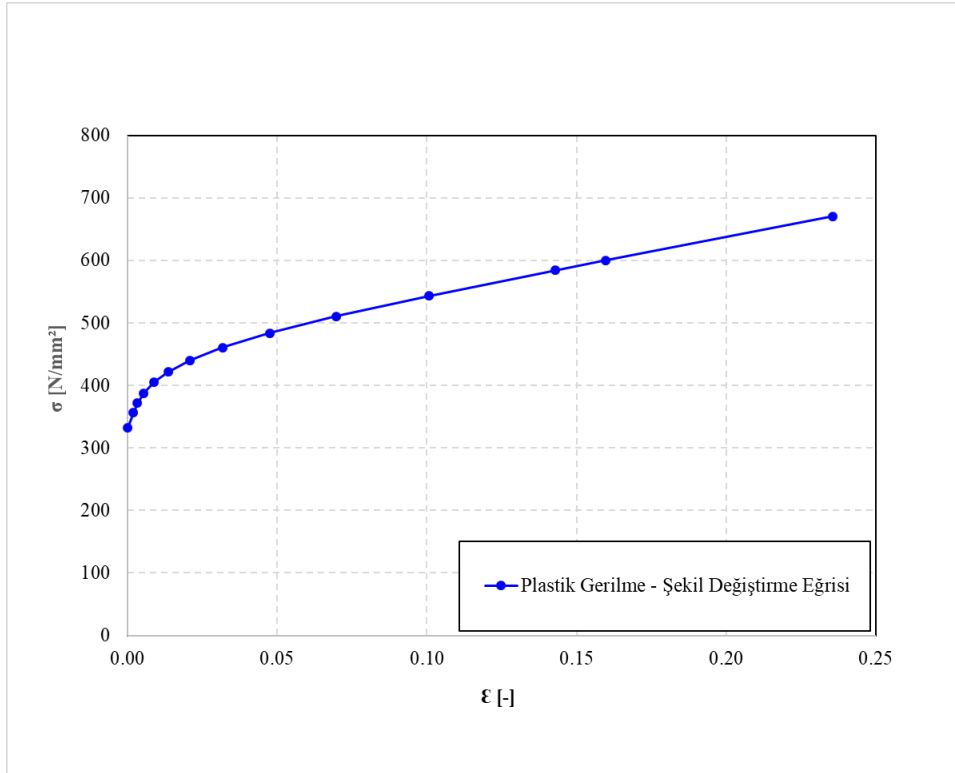
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0015	280	0,0015
300	0,0018	301	0,0017
320	0,0022	321	0,0022
340	0,0029	341	0,0029
355	0,0038	356	0,0038
370	0,0052	372	0,0052
385	0,0074	388	0,0073
401	0,0110	405	0,0109
415	0,0158	422	0,0157
430	0,0234	440	0,0231
445	0,0347	460	0,0341
460	0,0511	484	0,0499
475	0,0749	511	0,0722
490	0,1089	543	0,1034
505	0,1569	584	0,1457
510	0,1769	600	0,1629
528	0,2700	671	0,2390

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.62’de gösterilmektedir.



Şekil 6.62 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanlarının gerçek ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.63'te gösterilmektedir.



Şekil 6.63 : BFP-1 numunesindeki kiriş ve kolon elemanlarının gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.

Diğer elemanlar için benzer şekilde gerilme - şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir.

$$\epsilon_u = 0,25$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 603 \text{ MPa}$$

$$F_y = 417 \text{ MPa}$$

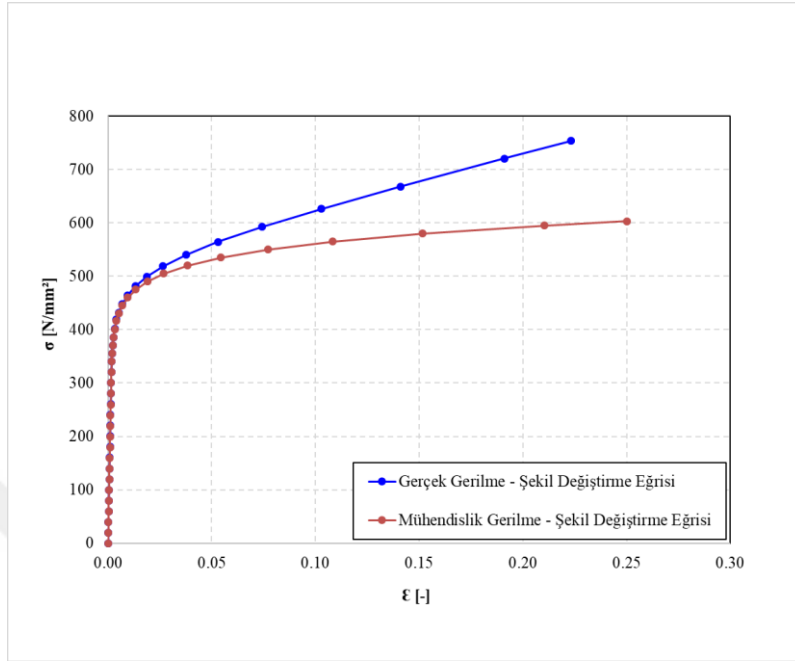
$$n = 13,1$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerlerinin edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.32).

Çizelge 6.32 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme değerleri.

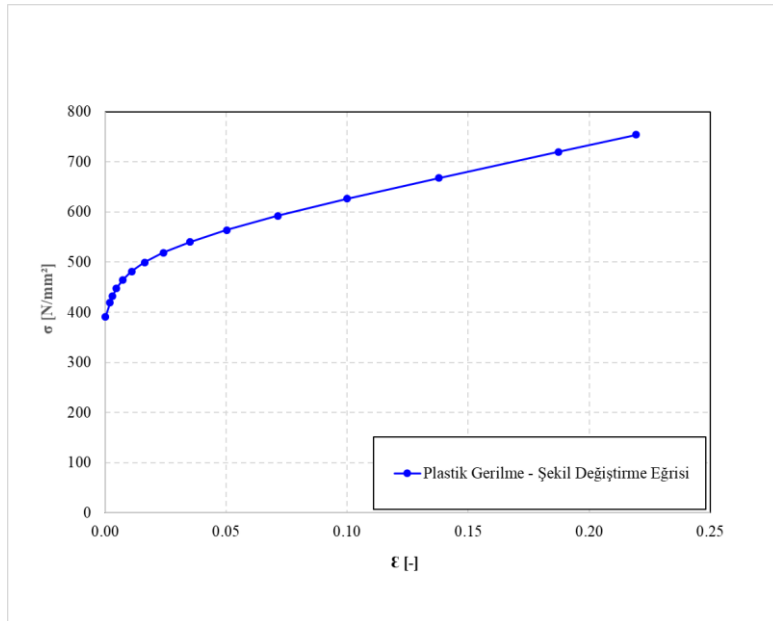
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0014	280	0,0014
300	0,0015	300	0,0015
320	0,0017	321	0,0017
340	0,0018	341	0,0018
355	0,0020	356	0,0020
370	0,0023	371	0,0023
385	0,0026	386	0,0026
401	0,0032	402	0,0032
417	0,0041	419	0,0041
430	0,0051	432	0,0051
445	0,0069	448	0,0069
460	0,0095	464	0,0095
475	0,0133	481	0,0132
490	0,0189	499	0,0187
505	0,0269	519	0,0265
520	0,0383	540	0,0376
535	0,0545	564	0,0530
550	0,0770	592	0,0742
565	0,1084	626	0,1029
580	0,1515	668	0,1411
595	0,2104	720	0,1910
603	0,2500	754	0,2231

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri
Şekil 6.64'te gösterilmektedir.



Şekil 6.64 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımında tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.65'te gösterilmektedir.



Şekil 6.65 : BFP-1 numunesindeki diğer elemanlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

10.9 bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,036$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 900 \text{ MPa}$$

$$n = 26$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.33).

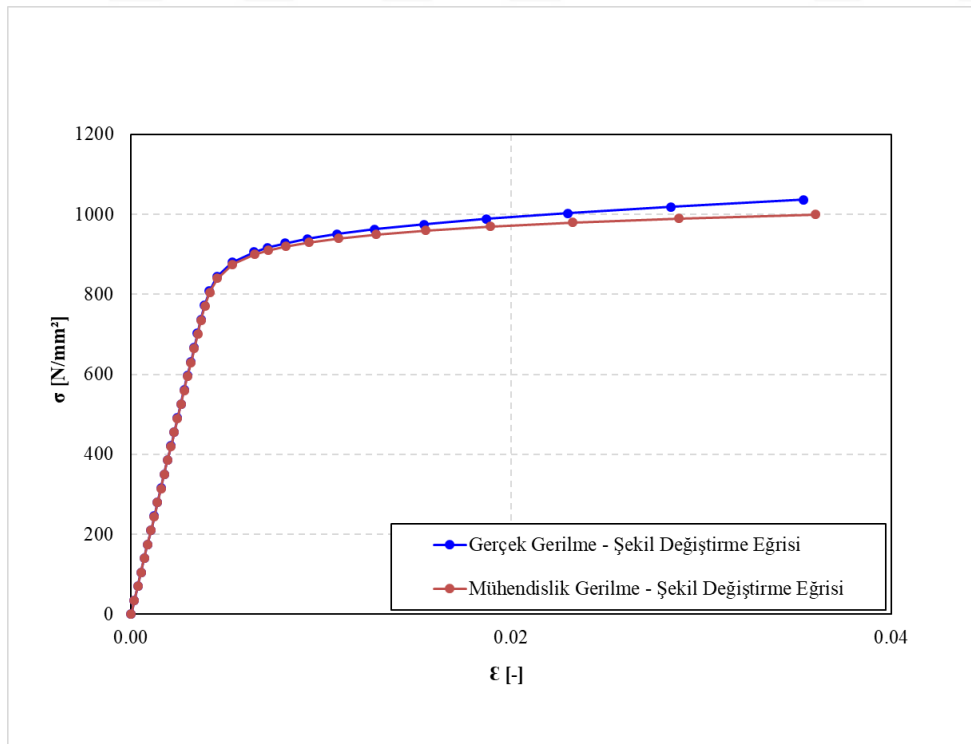
Çizelge 6.33 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0004	70	0,0003
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0009	175	0,0009
210	0,0011	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0014	280	0,0014
315	0,0016	315	0,0016
350	0,0018	351	0,0017
385	0,0019	386	0,0019
420	0,0021	421	0,0021
455	0,0023	456	0,0023
490	0,0025	491	0,0024
525	0,0026	526	0,0026
560	0,0028	562	0,0028
595	0,0030	597	0,0030
630	0,0032	632	0,0031
665	0,0033	667	0,0033
700	0,0035	702	0,0035
735	0,0037	738	0,0037

Çizelge 6.33 (devam): 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

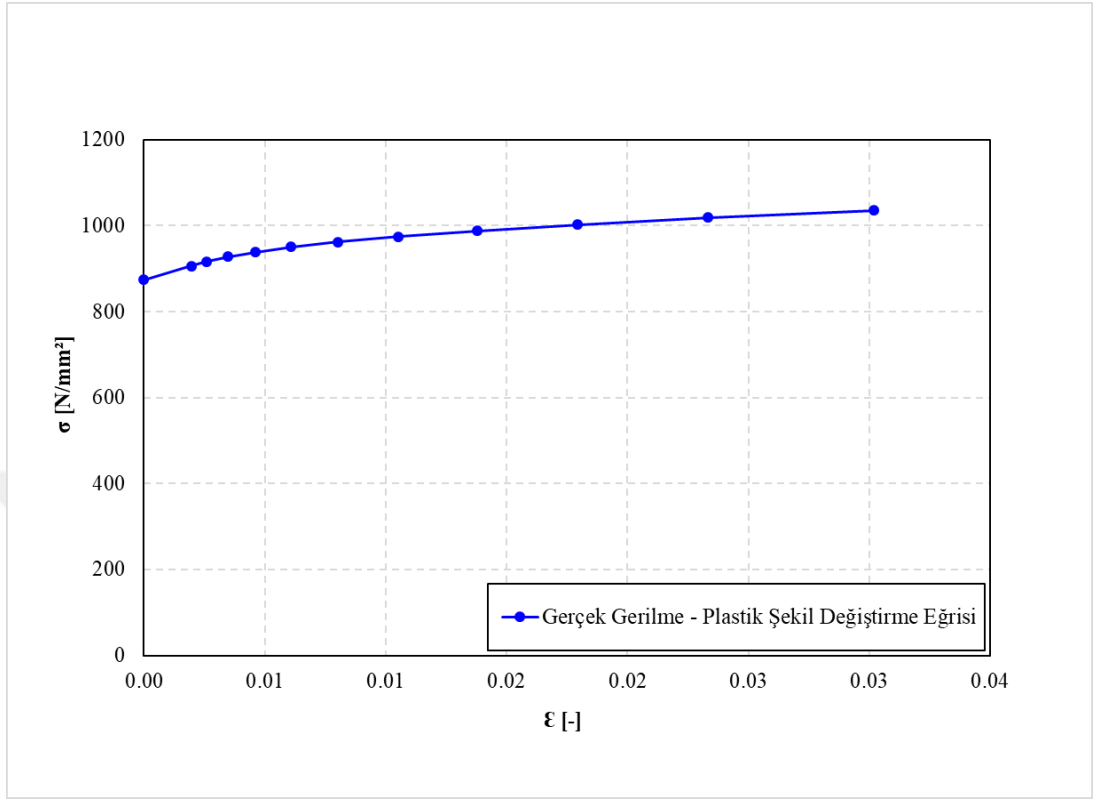
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
770	0,0039	773	0,0039
805	0,0041	808	0,0041
840	0,0045	844	0,0045
875	0,0053	880	0,0053
900	0,0065	906	0,0065
910	0,0072	917	0,0072
920	0,0081	927	0,0081
930	0,0093	939	0,0093
940	0,0109	950	0,0108
950	0,0129	962	0,0128
960	0,0155	975	0,0154
970	0,0189	988	0,0187
980	0,0232	1003	0,0230
990	0,0288	1019	0,0284
1000	0,0360	1036	0,0354

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.66’da gösterilmektedir.



Şekil 6.66 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.67’de gösterilmektedir.



Şekil 6.67 : 10.9 bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

8.8 bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,026$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 800 \text{ MPa}$$

$$F_y = 640 \text{ MPa}$$

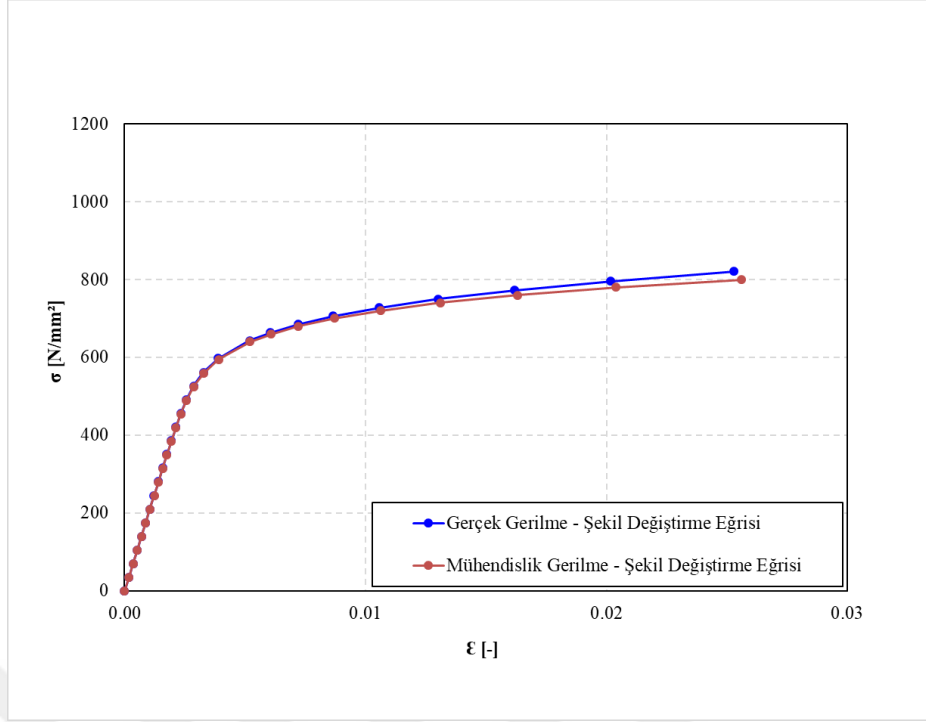
$$n = 10.7$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.34).

Çizelge 6.34 : 8.8 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

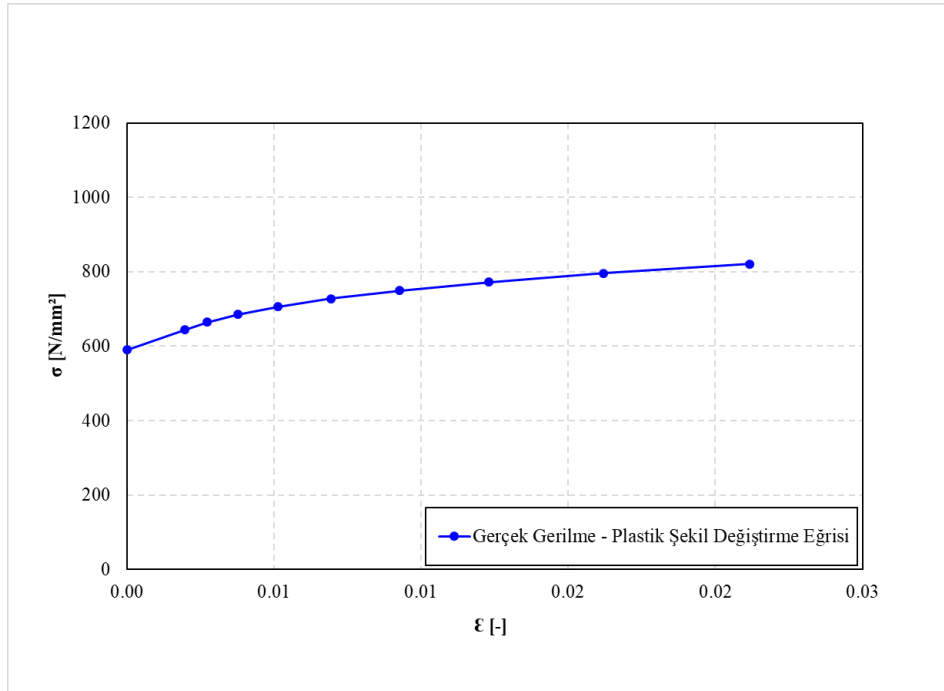
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0004	70	0,0003
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0009	175	0,0009
210	0,0011	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0014	280	0,0014
315	0,0016	315	0,0016
350	0,0018	351	0,0018
385	0,0019	386	0,0019
420	0,0021	421	0,0021
455	0,0023	456	0,0023
490	0,0026	491	0,0026
525	0,0029	527	0,0029
560	0,0033	562	0,0033
595	0,0039	597	0,0039
640	0,0052	643	0,0052
660	0,0061	664	0,0061
680	0,0072	685	0,0072
700	0,0087	706	0,0087
720	0,0106	728	0,0106
740	0,0131	750	0,0130
760	0,0163	772	0,0162
780	0,0204	796	0,0202
800	0,0256	820	0,0253

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.68’de gösterilmektedir.



Şekil 6.68 : 8.8 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 6.69’da gösterilmektedir.



Şekil 6.69 : 8.8 bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Elde edilen akma sonrası gerilme - plastik şekil değiştirme değerleri, ABAQUS yazılımında birleşik pekleşme (combined hardening) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Birleşik pekleşme modeli kinematik pekleşme bileşeni half cycle tanımı ile, izotropik pekleşme bileşeni ise “cyclic hardening” tanımı ile yapılacaktır. Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşenine ait çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) özelliğinin nümerik modelde tanımı için gerekli olan Q ve b parametreleri, Krolo ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada S275 yapı çeliği için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir (Çizelge 6.35).

Çizelge 6.35 : Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).

Yapısal Çelik Sınıfı	Q [MPa]	b [-]
S275	25,6	4,4
S355	20,8	3,2

Birleşimde hasar oluşumu, sünek hasar modeli (ductile damage) kullanılarak değerlendirilecektir. Birleşimin tasarımı, plastik deformasyonların kirişte meydana gelmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle, hasar durumunun gözlenebilmesi için sünek hasar modeli, kiriş elemanlarının malzeme davranışının modellenmesinde dikkate alınacaktır. Referans alınan çalışmada, çelik malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, tekrarlı yükler altındaki davranışın karakterize edilmesine yönelik çekme-basınç testleri ile ilgili bir bilgi bulunmadığından, hasar başlatma kriteri için, Krolo (2017) tarafından doktora tezi kapsamında kalibre edilen parametrelerden yararlanılmıştır (Çizelge 6.36).

Çizelge 6.36 : Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ϵ_D^{pl}	Gerilme Üç Eksenliliği	Şekil Değiştirme Hızı
0,6308	0,330	0,001
0,6249	0,380	0,001
0,6188	0,430	0,001
0,6124	0,480	0,001
0,6061	0,520	0,001
0,5996	0,570	0,001
0,5931	0,610	0,001

Hasar başlangıcı ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra, hasarın gelişimi ile ilgili gerekli modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. Malzemede hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri (ε_f^{pl}), Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çelikleri için gerçekleştirilen çekme testleri kapsamında elde edilmiştir. Bu değer, S275 yapı çeliği için çekme dayanımı değerine karşılık gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 2,6 katı; S355 yapı çeliği için ise çekme dayanımına karşı gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 3,0 katı şeklinde verilmektedir. Kiriş elemanının malzeme sınıfı A36 olarak belirtildiğinden, hasarın tamamlandığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri $\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl}$ şeklinde hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl} = 2,6 \times 0,6308 = 1,64$$

Hasar başlama kriteri sağlandıktan sonra, kırılma anında plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) denklem 6.17 ile tanımlanır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} \quad (6.17)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L : Eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$: Hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_D^{pl}$.

$$\eta = 1/3 \text{ için, } \varepsilon_0^{pl} = \bar{\varepsilon}_D^{pl}$$

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_0^{pl} = 1,64 - 0,631 = 1,01$$

Eleman karakteristik uzunluğu L , elemanın hacminin küp kökü alınarak belirlenir.

Sonlu eleman modellerinde en yüksek plastik deformasyonun beklendiği bölgelerde ortalama eleman uzunluğu $L = 3,50 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerle, kırılma anında plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) hesaplanmıştır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} = 3,50 \times 1,01 = 3,53 \text{ mm}$$

Plastik yer değiştirme ($\bar{u}_f^{pl}$) değeri, ABAQUS yazılımında “damage evolution” tanımı altında, hasar değişkeninin (D), plastik yer değiştirme ile ilişkisinin doğrusal olarak tanımlandığı “linear softening” modeli ile tanımlanmıştır.

6.4.5 Sonlu eleman modeli için uygulanan varsayımlar

Referans alınan çalışma raporunda elik elemanlar arasındaki temas yüzeyleri ile ilgili bir bilgi bulunmaması nedeniyle temas yüzeyleri arasında sürtünme katsayısı 0,30 olarak kabul edilmiştir. Bulon başlıkları kolaylık açısından daire şeklinde modellenmiştir.

6.4.6 Elemanlar arasındaki temas etkileşimi modeli

Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmaktadır. Tamamlayıcı yüzeyler içerisine belli ölçüde geçebilen esas yüzeyler, birleştirilen elemanlardan daha rijit ve daha seyrek sonlu eleman ağına sahip olanı olarak seçilmiştir.

6.4.7 Temas eden yüzeyler arasındaki etkileşim

Birleşim modellerinde yer alan bulonlu birleşimlerde, bulonların gövdesinin levhalardaki ve kirişteki delikler ve levhaların temas eden yüzeyleri arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanacaktır.

Birleşim yüzeylerinin normal bileşeninin davranışını belirlemede “Hard Contact” modeli kullanılacaktır. Teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modeli dikkate alınacaktır. Teğetsel davranış modeli, temas yüzeyleri arasında oluşması beklenen sürtünme etkisinin formülasyonu olarak “Penalty” özelliği seçilmek suretiyle, elemanların yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı çalışmanın raporunda belirtilmediği için 0,30 olarak varsayılmıştır.

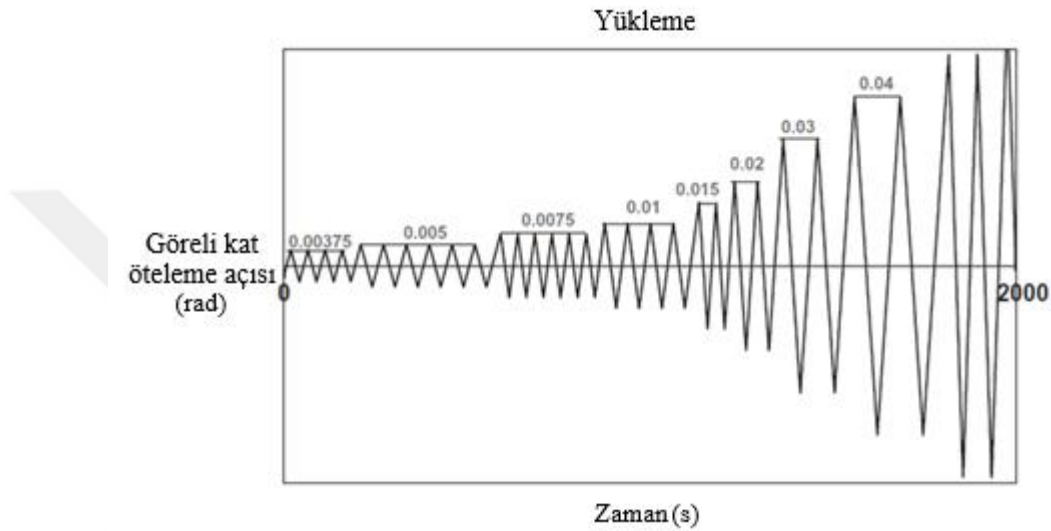
6.4.8 Kaynaklı birleşimler için sonlu eleman noktaları arasında bağlantının sağlanması

Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması ile sağlanmaktadır. Kaynak işlemi uygulanarak teşkil edilen birleşimler için, kaynak

malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünülündüğünde, bu etkileşim modelinin kullanılması uygun görülmüştür.

6.4.9 Analiz yöntemi

Modelin sonlu eleman analizi tek bir adımda gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolü olarak, AISC 341-22 Bölüm K2b.4'te tanımlanan prosedür esas alınmış ve analiz bu protokole uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.70).



Şekil 6.70 : AISC 358-22'de tanımlanan yük protokolü.

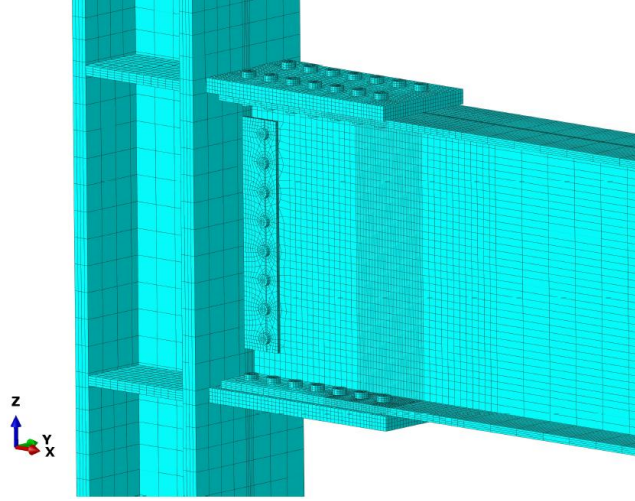
Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak zaman tanım alanında (direct integration) dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yüklemenin görelî olarak yavaş gerçekleştiği ve atalet etkilerinin sınırlı olduğu durumları temsil eden “quasi-static” (yarı-statik) yaklaşım kapsamında uygulanmıştır. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için “Full Newton-Raphson yöntemi” tercih edilmiştir. Sünek malzeme davranışı içeren hasar modelleri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi genellikle simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu durum, çözüm algoritmasının yakınsama davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ABAQUS yazılımının çözüm seçenekleri arasında yer alan ve simetrik olmayan sistem matrislerinin çözümüne olanak tanıyan “unsymmetric matrix solver” seçeneği, çözüm kararlılığını artırmak ve yakınsama problemlerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

6.4.10 Eleman tanımları ve sonlu eleman ağı

Modelde, üç boyutlu katı, doğrusal ve azaltılmış integrasyon tanımı kullanılan C3D8R tipi 8 (sekiz) düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır. Bu elemanların, daha fazla integrasyon noktasına sahip ve dolayısıyla analiz sonucunun doğruluk oranı çok yüksek olan kuadratik eleman olan C3D20 elemanı ile gerilme dağılımları karşılaştırıldığında oldukça yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, C3D8R elemanlarının kayma kilitlenmesi (shear locking) sorununa neden olmaması ve analiz süresini önemli ölçüde azaltması nedeniyle eğilme etkilerinin belirleyici olduğu yapısal analizlerde tercih edilmesi uygun görülmektedir (Han ve diğ, 2016).

Birleşim bölgeleri, plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı alanlar olduğundan, bu bölgelerde sonlu eleman ağı diğer bölgelere kıyasla daha sık tanımlanmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip bölgeler, çözüme uygun olan yapısal (structural) sonlu eleman ağı oluşturabilmek için, bölümlendirme (partition) özelliği kullanılarak birbirinden ayrılmıştır. Böylece farklı geometrideki bir elemanın bölündüğü düzlem üzerinde iki farklı geometri arasında ortak noktalar oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda oluşturulan ortak düğüm noktaları sayesinde, yazılım aynı eleman üzerinde yer alan farklı geometrileri birbirinden ayırt edebilmekte ve bu sayede düzenli ve uyumlu bir katı eleman ağı oluşturulabilmektedir.

Sonlu eleman modelinin doğru yapısal davranışı yansıtabilmesi açısından, elemanların kalınlığı boyunca kaç katmana bölündüğü son derece kritiktir. Han ve diğ. (2016) tarafından, AISC-358’de tanımlı kirişin kolona doğrudan kaynaklı olduğu kiriş-kolon birleşiminin (WUF-W) tekrarlı yükler altındaki davranışını değerlendirmek amacıyla birleşimin sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kullanılan C3D8R elemanlarının kalınlık boyunca katman sayısının analiz sonuçlarına etkisini değerlendirmek için birleşimin belirli bir bölgesi, sırasıyla 1, 2, 4 ve 6 katman kullanılarak modellenmiştir. Analiz sonuçlarında elde edilen gerilme dağılımları, 1 katmanlı model referans alınarak karşılaştırılmış ve 4 katmanlı modelin, 6 katmanlı modelle oldukça benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, C3D8R elemanlarıyla yapılan analizlerde kalınlık boyunca en az 4 katman kullanmanın, güvenilir ve istenilen yakınsaklıkta sonuçlar elde edilmesi açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bilgiler ışığında, elemanlar kalınlığı boyunca en az 4 katman olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 6.71).

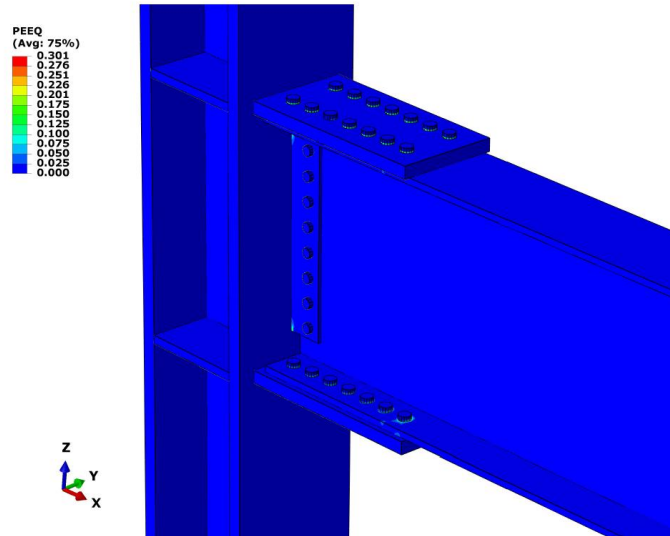


Şekil 6.71 : Eleman kalınlığı boyunca dört katman kullanımı.

6.4.11 Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

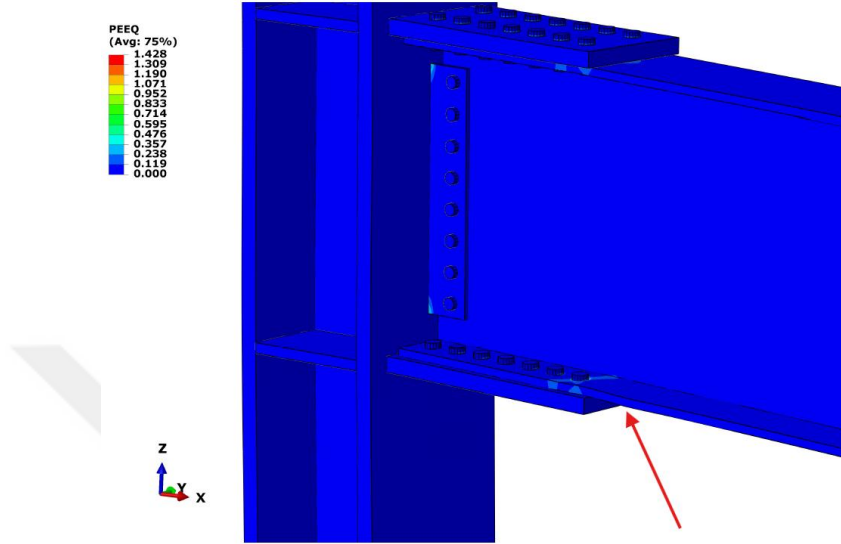
Referans alınan çalışma kapsamında deneyi yapılan P3 numunesinin sonlu eleman modeli, ilgili deneysel çalışmanın raporunda sunulan verilerden yararlanılarak ve bu bölümde açıklanan modelleme esaslarına uygun şekilde ABAQUS yazılımında oluşturulmuş; model, tekrarlı yükler altında analiz edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, söz konusu çalışmada raporlanan deneysel veriler ile karşılaştırılarak aralarındaki uyum değerlendirilmiştir.

Analizde %2 göreceli kat öteleme açısında, kolon yüzünden en uzakta bulunan bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde akma meydana gelmiştir. Referans alınan deneysel çalışmanın raporunda benzer bir davranış elde edildiği raporlanmıştır (Şekil 6.72).



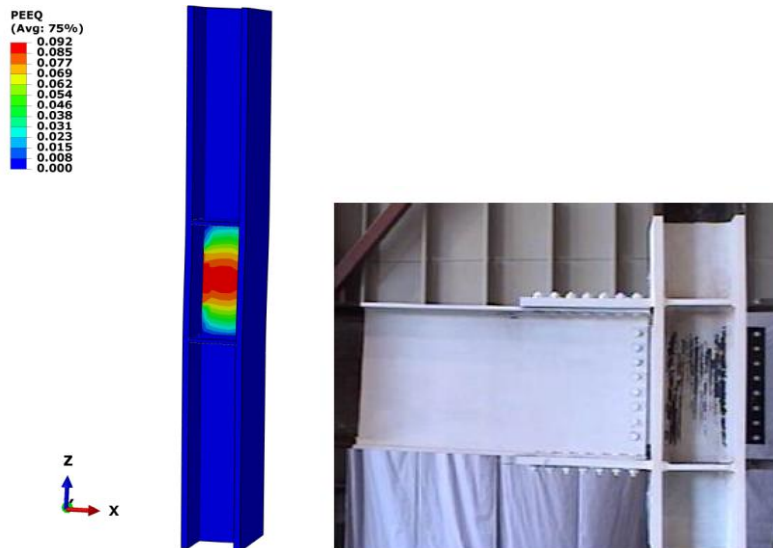
Şekil 6.72 : %2 göreceli kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

Analizde %4 görelî kat öteleme açısında, kolon yüzünden en uzakta bulunan bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde plastik deformasyonlar artmış ve referans alınan çalışma sonuçlarında belirtildiği gibi başlıkta yerel burkulma deformasyonları meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 6.73).



Şekil 6.73 : %4 görelî kat öteleme açısında yerel burkulma başlangıcı.

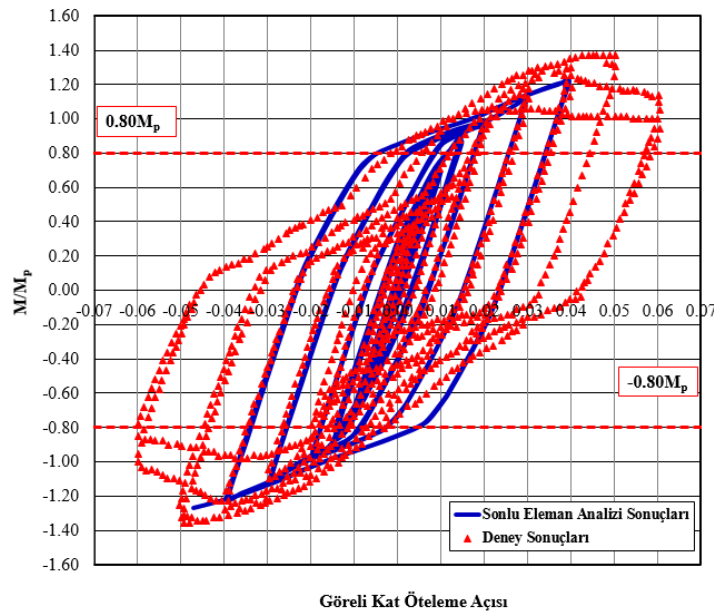
Deneyisel çalışmada, kolon panel bölgesinde de plastik şekil değiştirmelerin meydana geldiği rapor edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde kolon panel bölgesinde deney sonucuna benzer şekilde plastik deformasyonların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum sonlu eleman analizinin sonuçlarının deney sonuçlarıyla tutarlı olduğunu göstermektedir (Şekil 6.74)



Şekil 6.74 : %4 görelî kat öteleme açısında panel bölgesinde plastik deformasyonlar.

Sato ve diğ. (2008) tarafından belirtildiğine göre, %5 görelî kat ötelemesinde kirişte yanal burulma burkulma meydana gelmesi ile birlikte kolonda da burulma deformasyonu oluştuğu gözlemlenmiştir. %6 görelî kat ötelemesinde kirişte meydana gelen belirgin yanal burulmalı burkulma, yükleme pistonunun eğilmesine neden olmuş ve deney, %6 görelî kat ötelemesinin ikinci döngüsünde, kolon yüzünden en uzakta bulunan bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde kırılma meydana gelmesi nedeniyle sonlandırılmıştır. Birleşimin, sonlu eleman analizi, %5 görelî kat ötelemesinin ilk döngüsünde yakınsaklık sağlanamadığı için sonlandırılmıştır. Bu nedenle, deneysel çalışmada gözlemlenen söz konusu deformasyonlar nümerik modelde elde edilememiştir.

Analiz sonucunda, tekrarlı yükler altında birleşimin davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek için, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, kolon merkezindeki normalize moment (M/M_p) ile görelî kat ötelemesi açısı arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel eğriler oluşturulmuştur. Normalize eğilme momenti (M/M_p), kiriş merkezinde eğilme oluşan eğilme momentinin (M), kiriş plastik eğilme momenti kapasitesine (M_p) oranı olarak elde edilmiştir. Analiz sonucu ve deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğriler Şekil 6.75'te gösterilmiştir.



Şekil 6.75 : Deney ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.

Sonlu eleman analizi sonucu elde edilen çevrimsel eğri ile deneysel verilerden elde edilen çevrimsel eğrilerin itme ve çekme yükleme durumlarına karşı gelen eğimlerinin

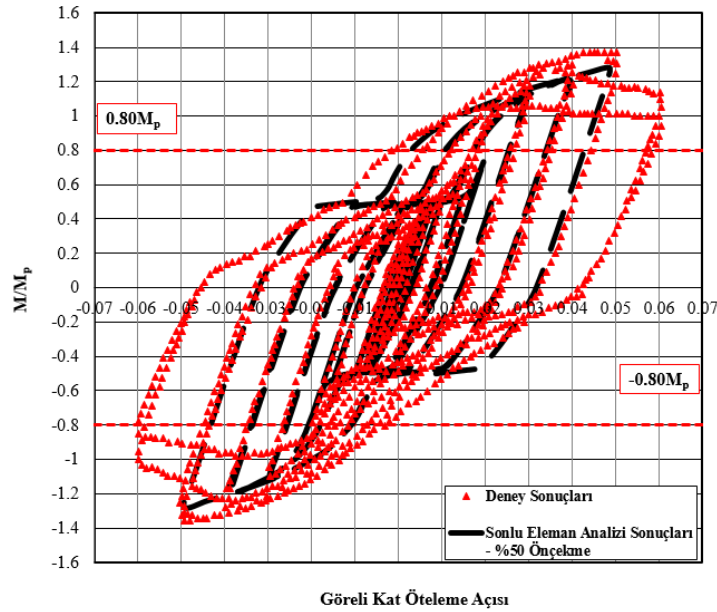
birbirleriyle yüksek düzeyde uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum, birleşim rijitliğinin sonlu eleman modelinde başarılı bir şekilde temsil edildiğini göstermektedir.

Sonlu eleman analizinde, deneyde olduğu gibi %5 görelî kat ötelemesi seviyesinde belirgin bir dayanım kaybı gözlemlenmemiştir. Ancak daha önce de belirtildiği üzere, analiz %5 görelî kat öteleme açısında yakınsama problemleri nedeniyle sonlandığından, deneyde %5 ve %6 görelî kat ötelemesinde meydana gelen dayanım kayıpları sayısal olarak karşılaştırılamamıştır.

Birleşimin eğilme momenti dayanımının, deneysel çalışmada sonlu eleman analizine kıyasla daha yüksek elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu farkın, makalede belirtilen çekme deneyi sonuçlarının her eleman için ortalama değerler olarak verilmesinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Benimsenen modelleme esasları doğrultusunda oluşturulan sonlu eleman modelinde elde edilen eğilme momenti dayanımının daha düşük olması, sayısal modelin güvenli tarafta kaldığını göstermektedir.

Bulonlu başlık levhalı birleşimde, birleşimi oluşturan elemanlar arasında sürtünme kuvvetinin aşılmasıyla kayma davranışı meydana gelmekte ve bu kayma davranışı çevrimsel eğrilerde çevrim sıkışması (pinching) davranışına neden olmaktadır. Deney sonucunda ve sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğriler incelendiğinde, her iki durumda da bu karakteristik davranış gözlemlenmiştir. Ancak sonlu eleman analizinde, kayma davranışının deneysel bulgulara kıyasla daha sınırlı ve geç — bir başka deyişle, daha yüksek kuvvet seviyelerinde — gerçekleştiği görülmüştür. Sato ve diğ. (2007), sürtünme kuvvetinin aşılması ile oluşan kayma deformasyonunun, sürtünme etkili birleşim durumu esas alınarak hesaplanan eğilme momenti kapasitesinin yaklaşık olarak yarısında meydana geldiğini belirtmiştir. Bu sonuç, sayısal analiz ile deneyde kayma davranışlarının farklı yük seviyelerinde ortaya çıkmasının nedenini açıklamaktadır. Ancak deney raporunda bu duruma ilişkin yeterince bilgilendirici bir açıklama bulunmamaktadır. Yetersiz ön çekme kuvveti uygulanması ya da sürtünme yüzeylerinin uygun şekilde hazırlanmaması olası nedenler arasında değerlendirilmiştir. Kayma davranışının sonlu eleman analizinde yeterli düzeyde temsil edilip edilmediği ve olası bir önçekme kaybının birleşim üzerindeki etkilerini değerlendirmek için bulonlara tam önçekme kuvvetinin yarısı kadar bir önçekme uygulanarak sonlu eleman analizi tekrarlanmıştır. Analiz

sonucunda elde edilen çevrimsel eğri ile deney sonucu elde edilen çevrimsel eğriler Şekil 6.76’da gösterilmiştir.



Şekil 6.76 : Deney sonucunda ve %50 önçekme uygulamasının yapıldığı sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen çevrimsel eğrilerin karşılaştırılması.

Çevrimsel eğriler incelendiğinde, tam önçekme uygulamasının yapıldığı analizde daha yüksek yük seviyelerinde meydana gelen kayma davranışının, bulonlara uygulanan önçekme kuvvetlerinin azaltılmasıyla daha düşük kuvvet seviyelerinde meydana geldiği tespit edilmiş, bu durumun deneysel sonuçlarla daha tutarlı bir biçimde örtüştüğü görülmüştür.

Analiz sonuçlarına göre kayma deformasyonu, her bir bulon deliğindeki boşluk miktarı eşit ve üniform olduğu için sıfır rijitlik ile meydana gelmektedir. Ancak deneyde böyle bir yerleşim mümkün olmamaktadır. Kayma deformasyonunun, her bir delikte farklı boşluk miktarları veya bazı deliklerde kayma doğrultusunda hiç boşluk kalmaması durumu dikkate alındığında, belirli bir rijitlik oluşarak meydana gelerek oluşması beklenir. Deney sonucunda da bu şekilde bir davranışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, eğrilerin kayma deformasyonunu temsil eden bölümlerindeki eğim farkının, uygulamada bulonlar ile bulon deliklerinin kenarları arasındaki boşlukların üniform olmamasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, modellenen birleşimlerin davranışı ile tam ölçekli deney sonuçları arasında anlamlı bir uyum gözlenmiştir. Analitik çalışma ile tam

ölçekli deneyin sonuçları arasındaki uyumun bir sonucu olarak, doğrulama modelinin analizinde uygulanan modelleme esaslarının; bu çalışma kapsamında geliştirilen bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş–zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin modellenmesinde kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



7. BİRLEŞİM PROTOTİPLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

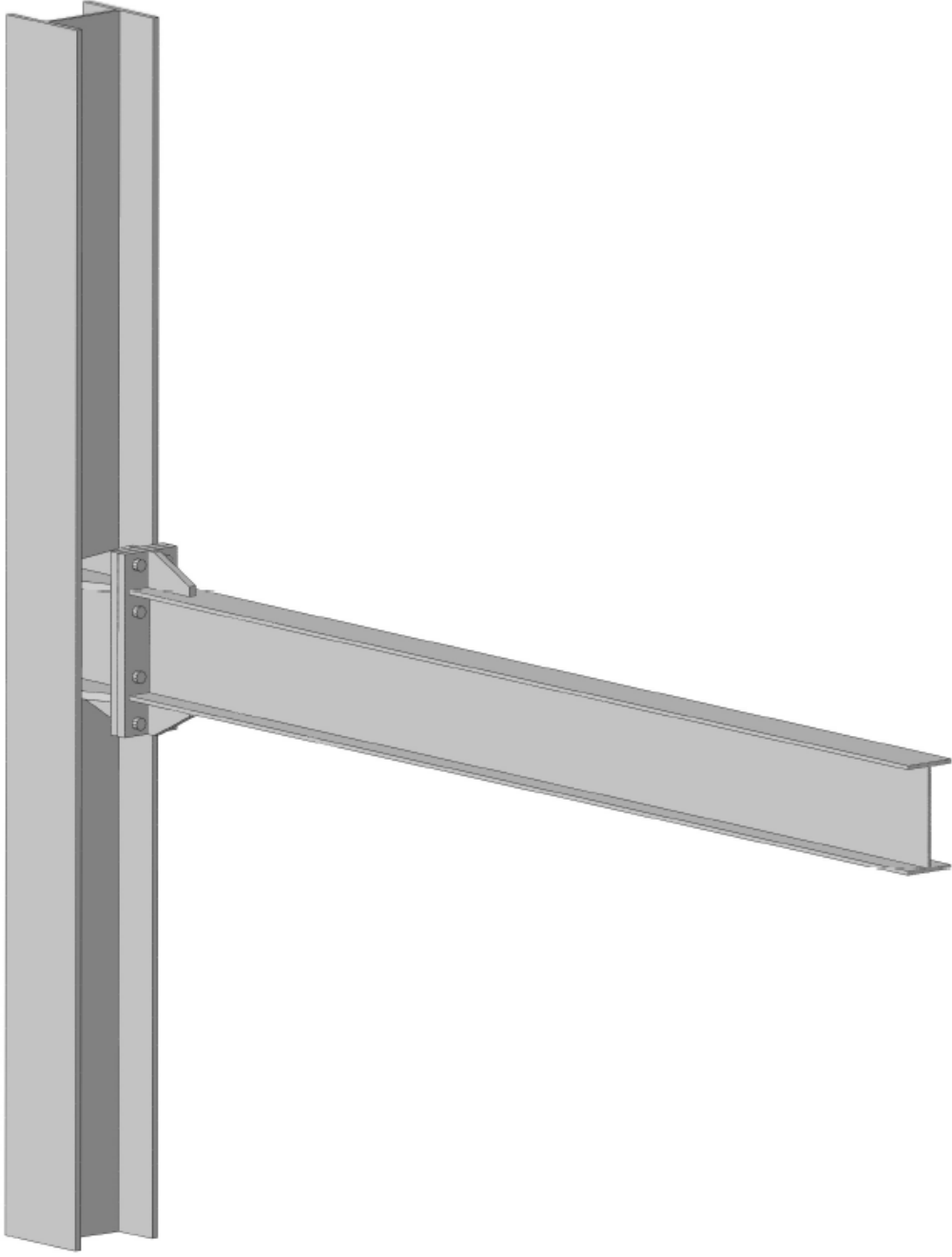
Bu bölüm kapsamında tasarımı yapılan birleşimlerin sonlu eleman modelleri, önceki bölümlerde doğrulama çalışmaları sonucunda uygunluğu gösterilmiş, eleman ve malzeme modelleri, pekleşme modeli, yüzey etkileşimi modeli, eleman tipleri ve olası hasar durumu gibi önemli modelleme tanımlarının uygulanmasıyla oluşturulmuştur. Bu bölümde modellemede kullanılan tanımlar hakkında daha detaylı bilgiler verilerek ABAQUS sonlu eleman programından görsellerle birlikte bu tanımların uygulanma adımları gösterilecektir.

7.1 Birleşimlerin Sonlu Eleman Modelleri

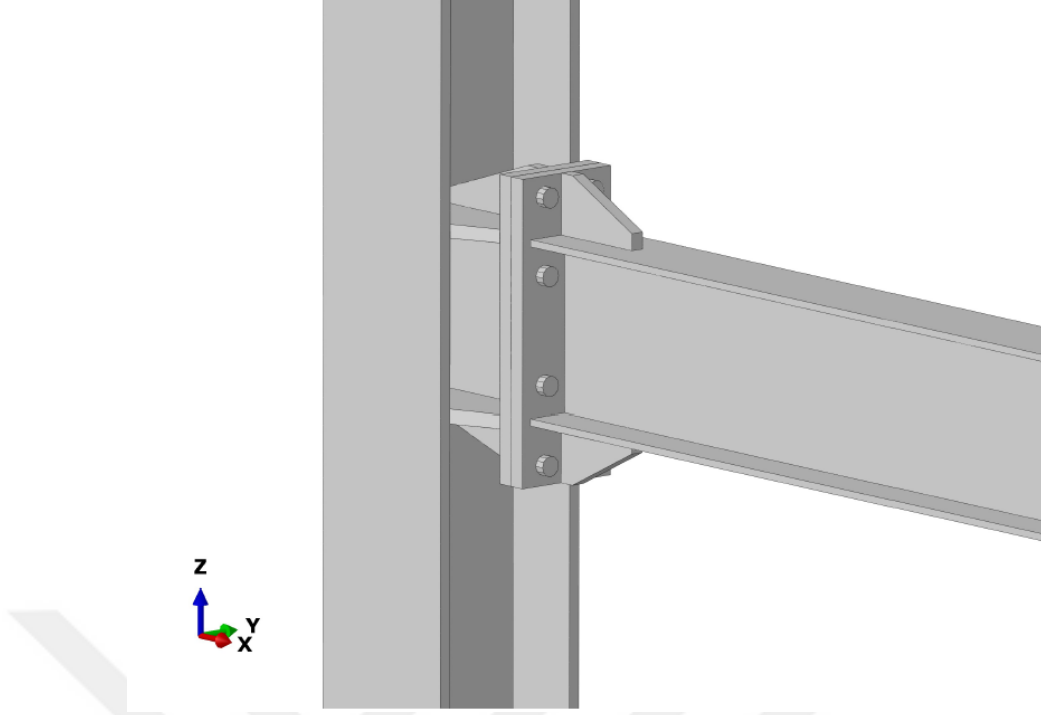
Çalışma kapsamında sonlu eleman analizi yapılacak olan birleşim modellerinin ABAQUS yazılımından elde edilmiş olan görünüşleri bu bölümde gösterilmiştir.

- Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi (Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5)

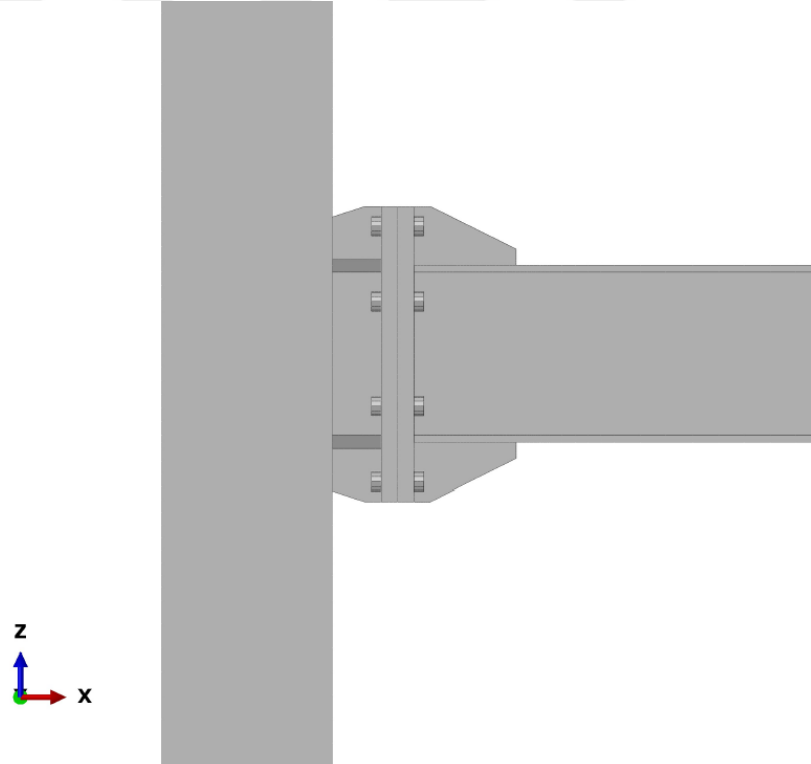
Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görünüşleri bu başlık altında gösterilmiştir.



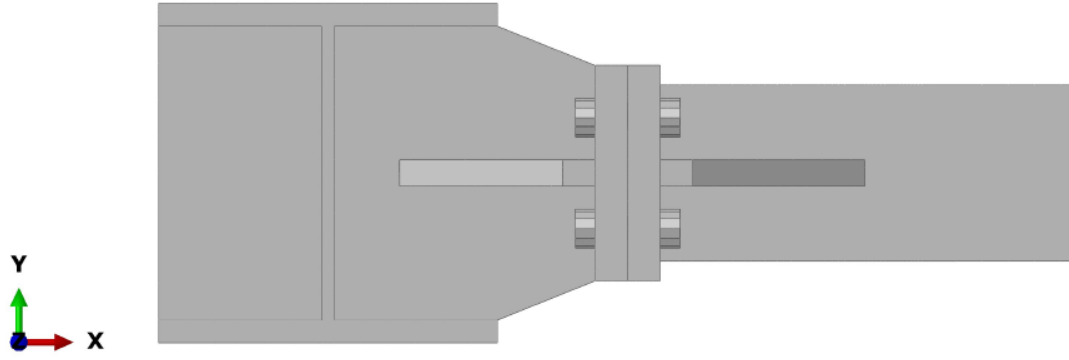
Şekil 7.1 : Tam dayanımlı bulonlu aln levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi izometrik görünüşü.



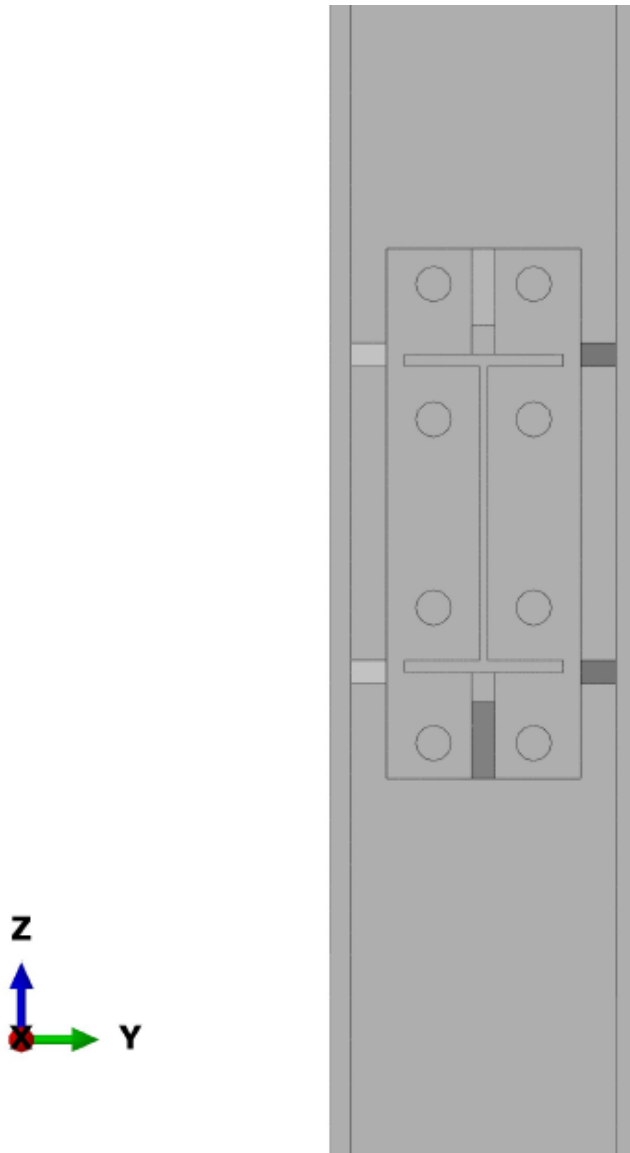
Şekil 7.2 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.3 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



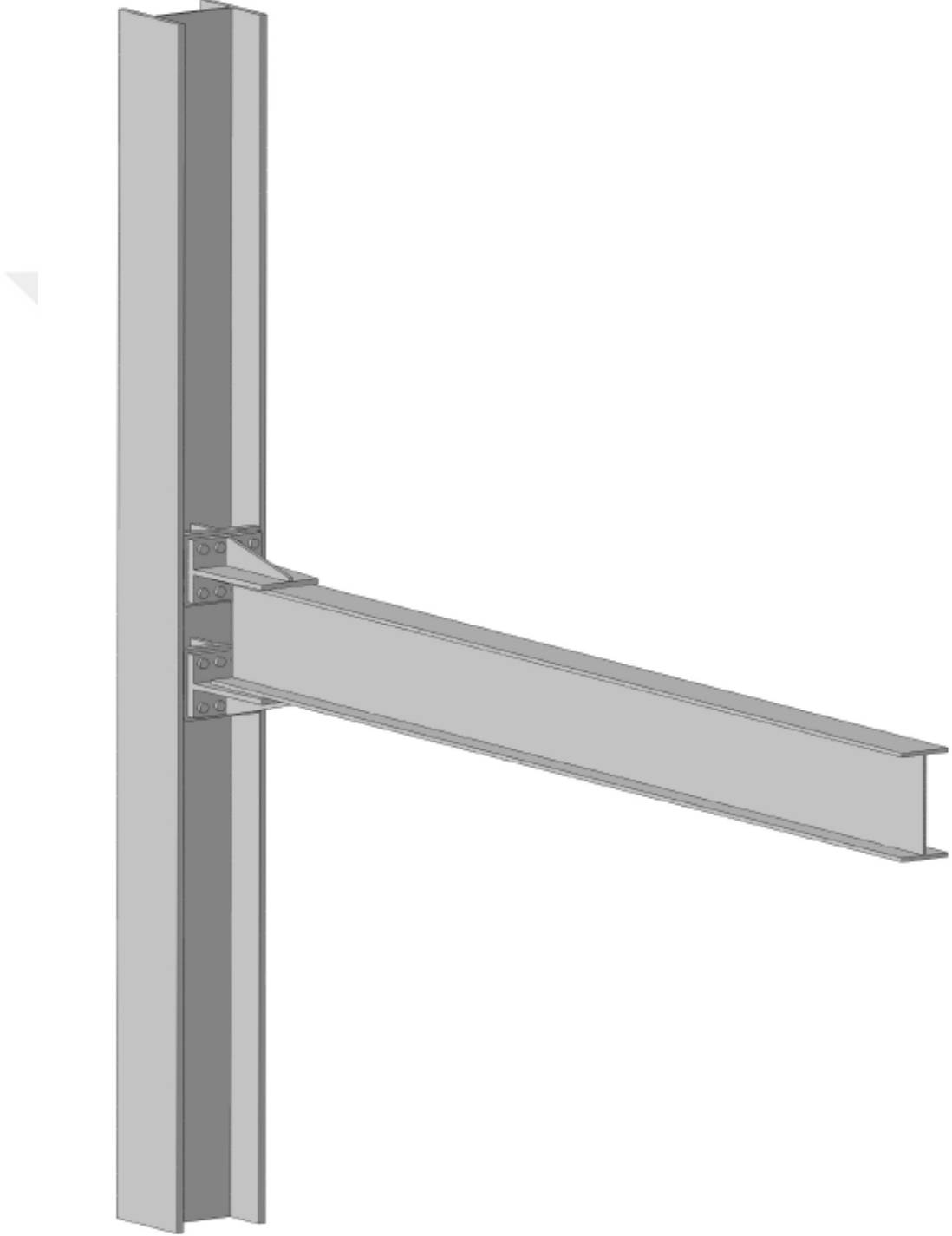
Şekil 7.4 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



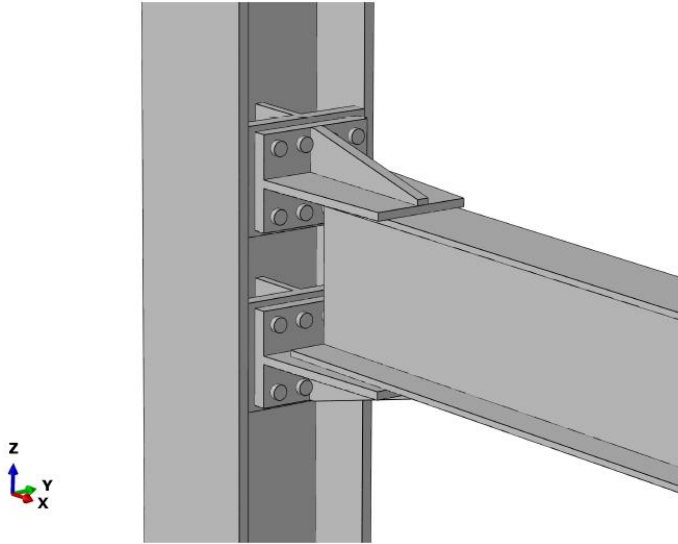
Şekil 7.5 : Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

- Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
(Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10)

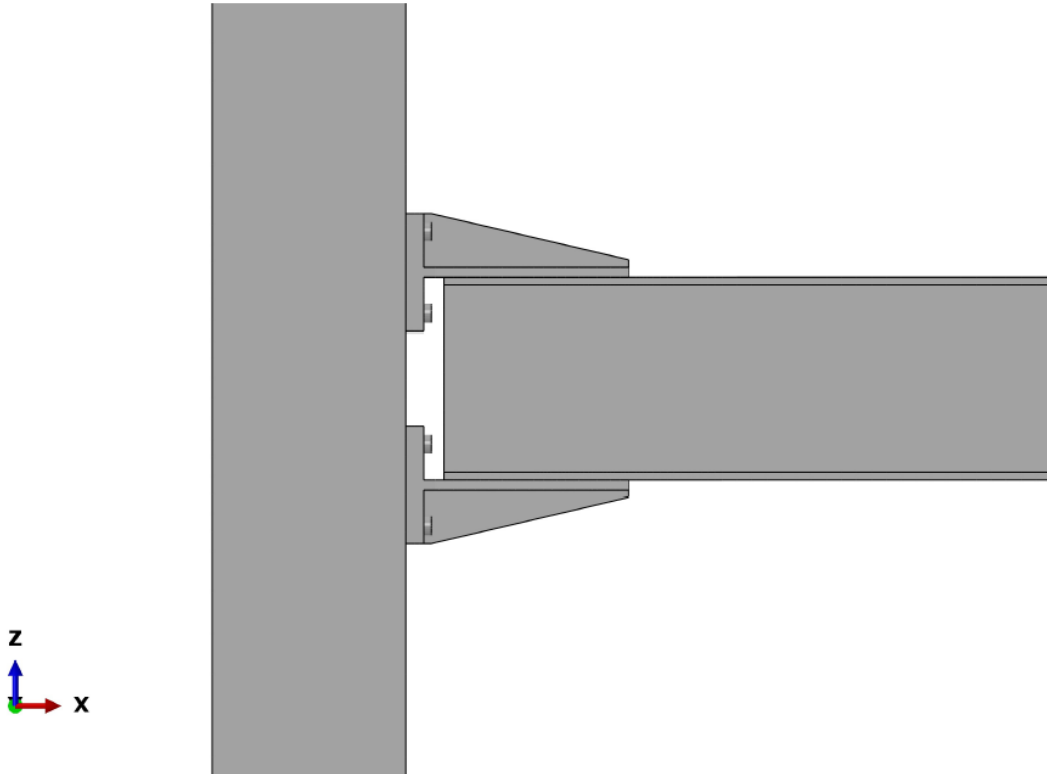
Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görünümleri bu başlık altında gösterilmiştir.



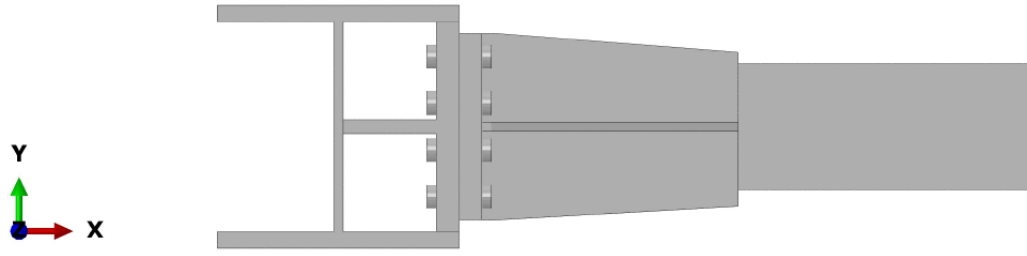
Şekil 7.6 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.



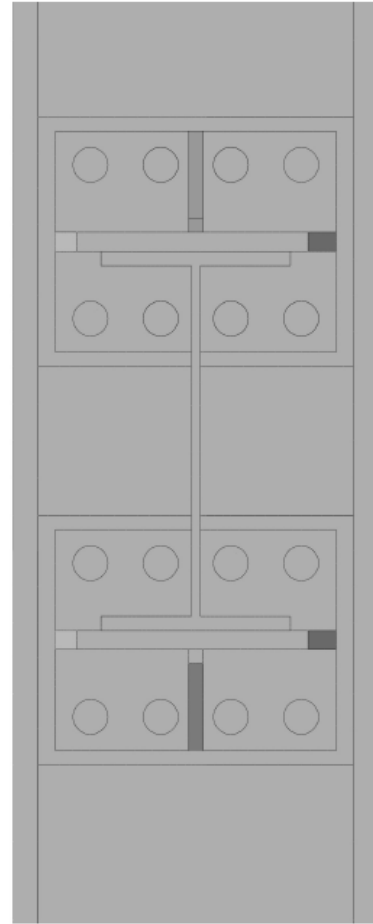
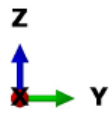
Şekil 7.7 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.8 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



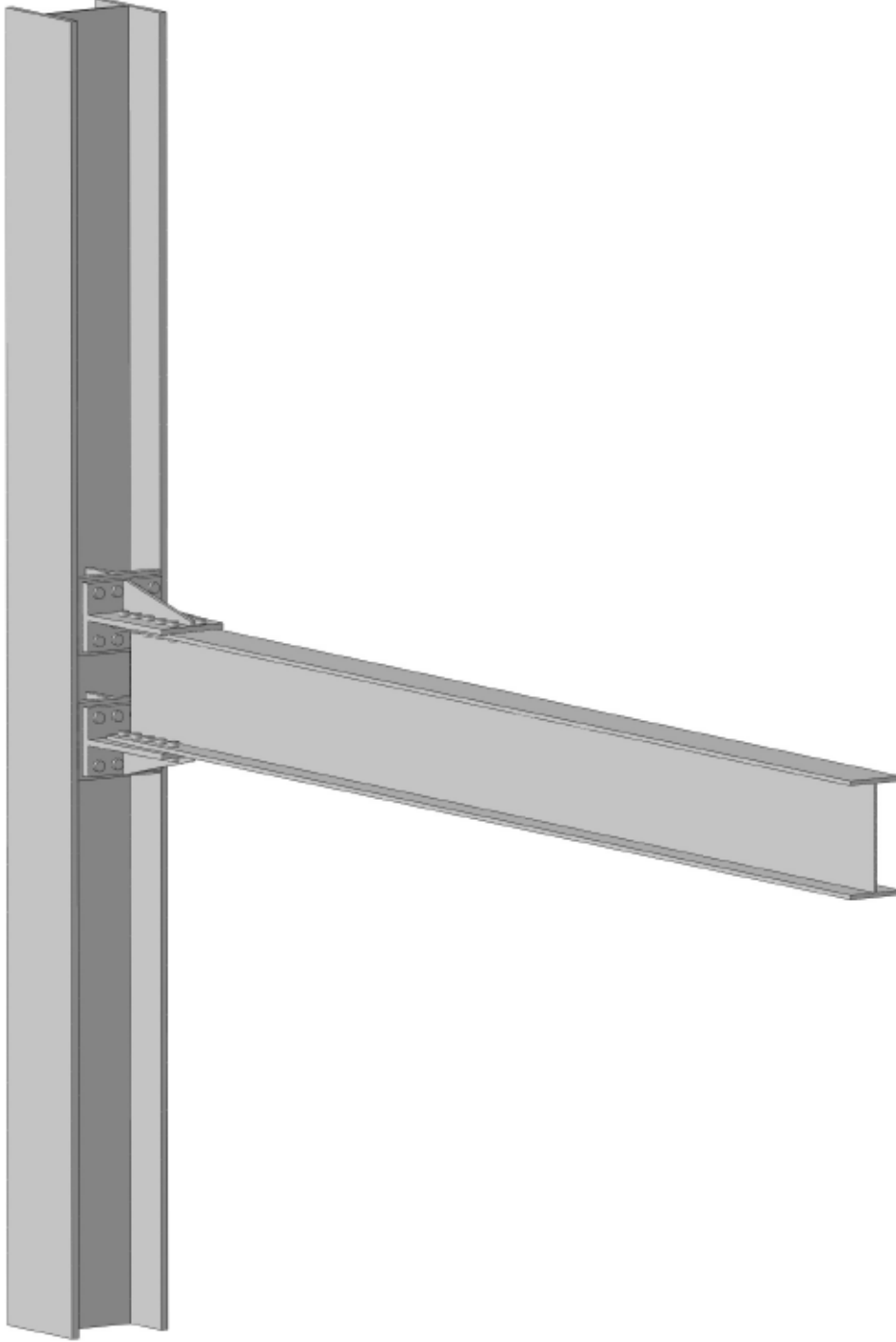
Şekil 7.9 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



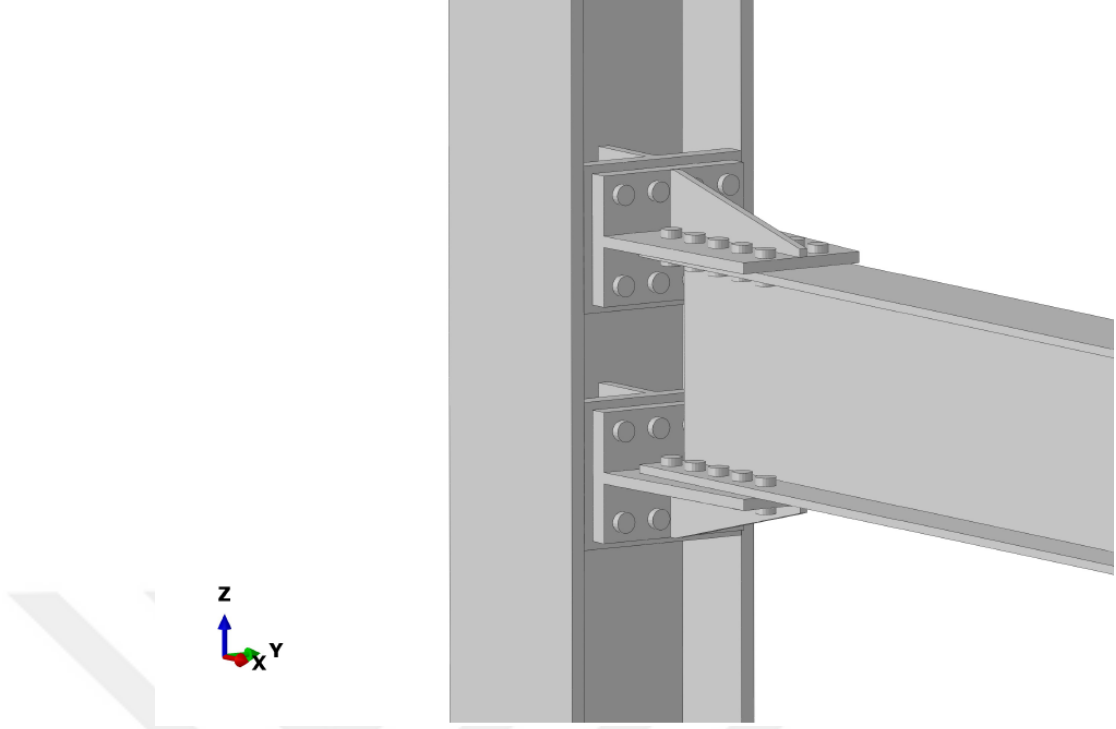
Şekil 7.10 : Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

- Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi (Şekil 7.11, Şekil 7.12, Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15)

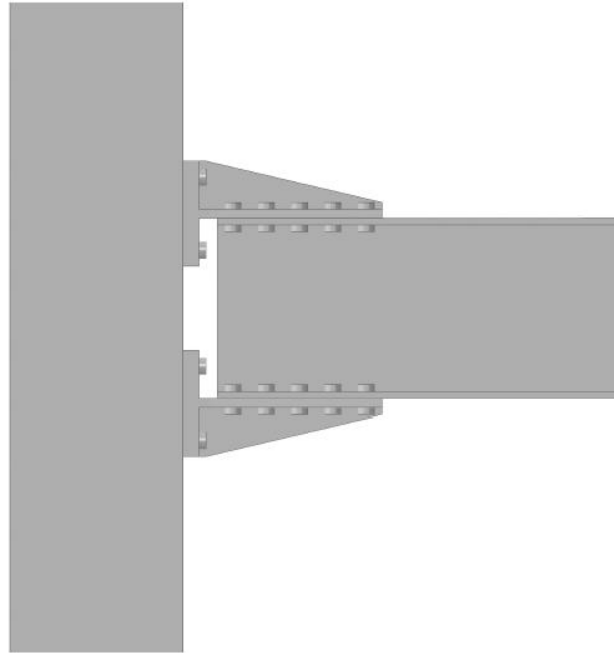
Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görünüşleri bu başlık altında gösterilmiştir.



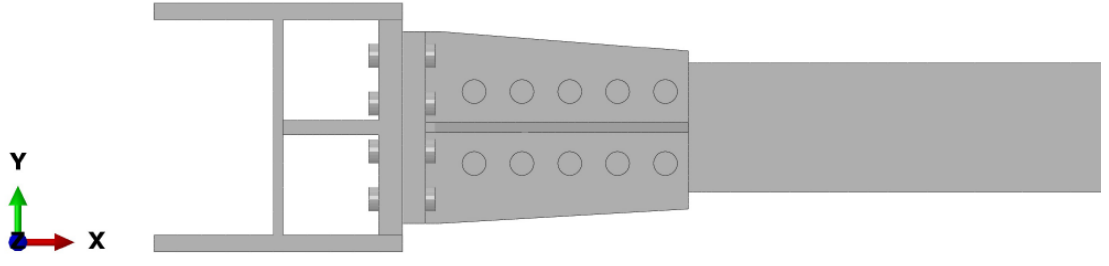
Şekil 7.11 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.



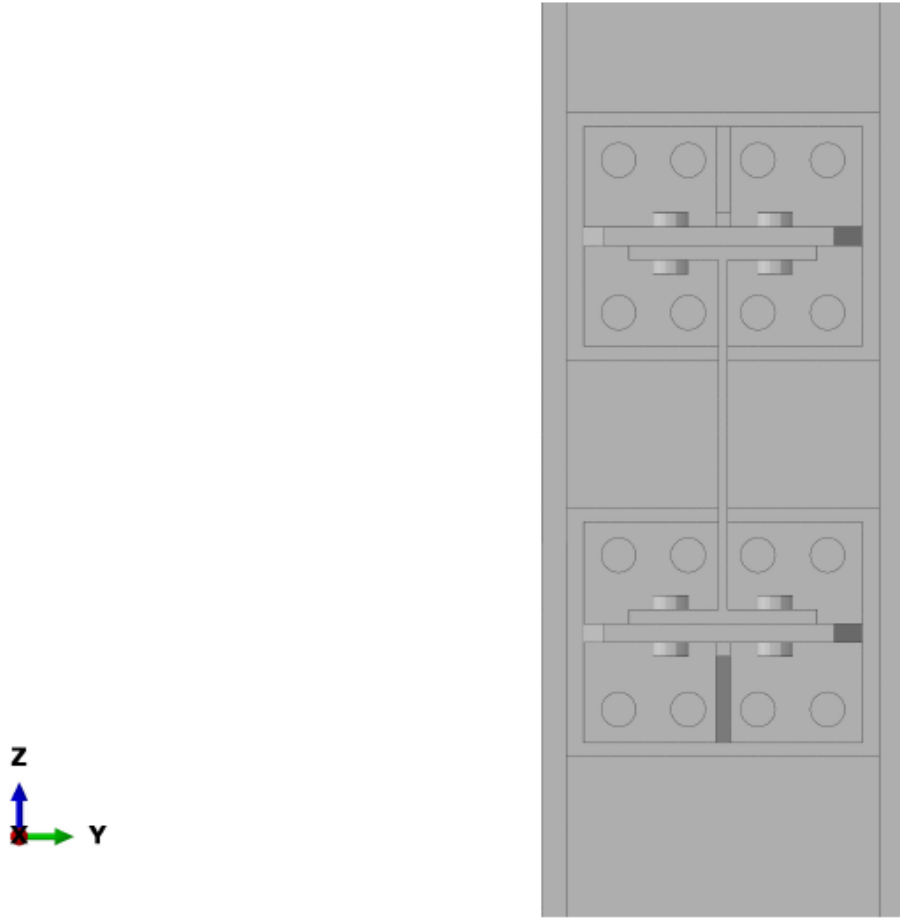
Şekil 7.12 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırılmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.13 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



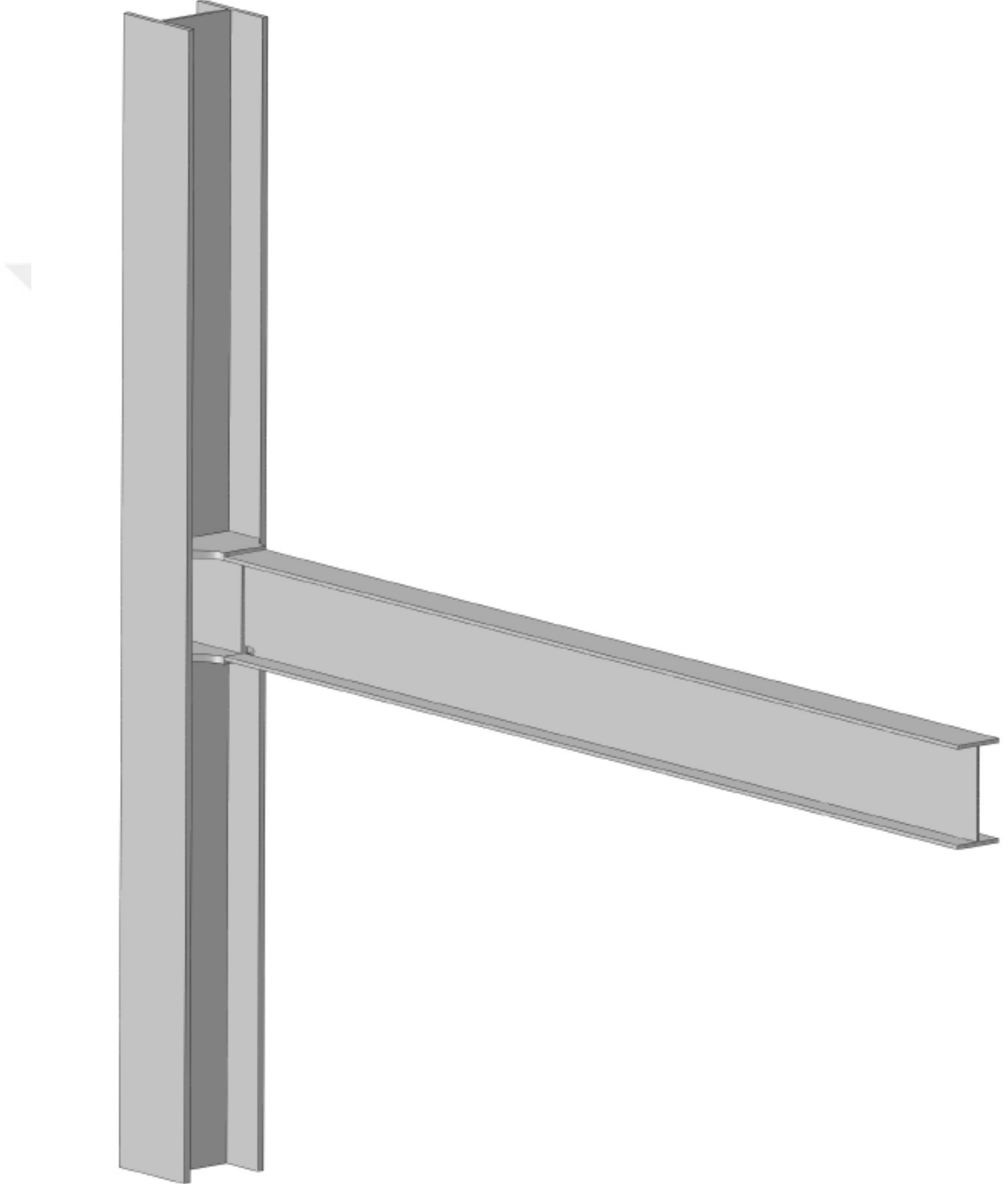
Şekil 7.14 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



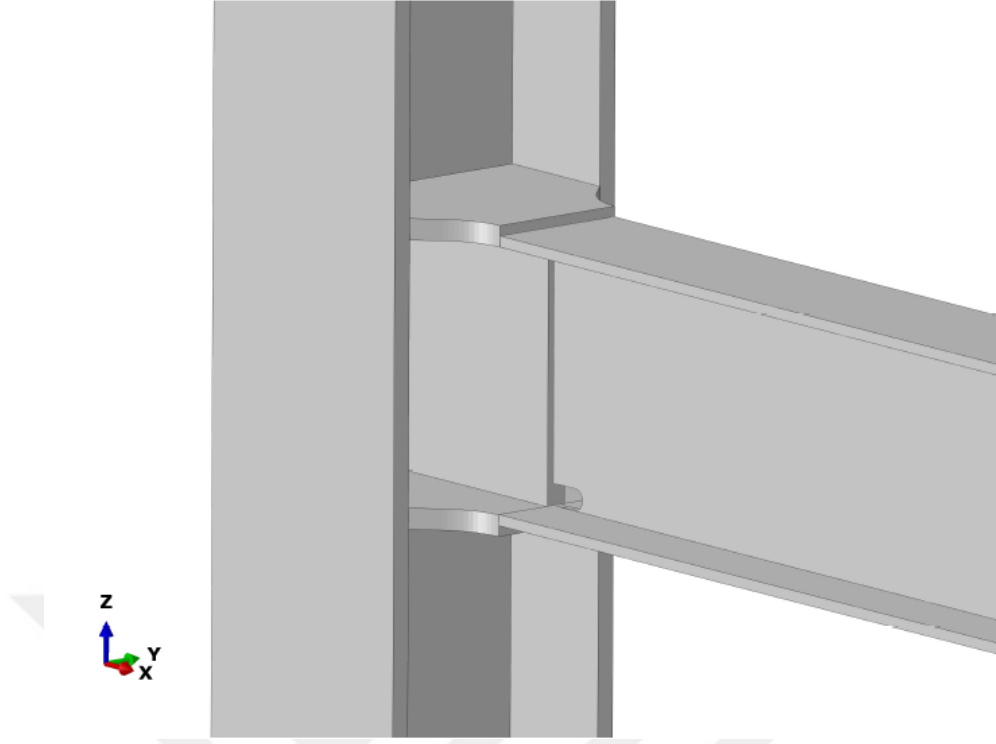
Şekil 7.15 : Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

- Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi (Şekil 7.16, Şekil 7.17, Şekil 7.18, Şekil 7.19, Şekil 7.20)

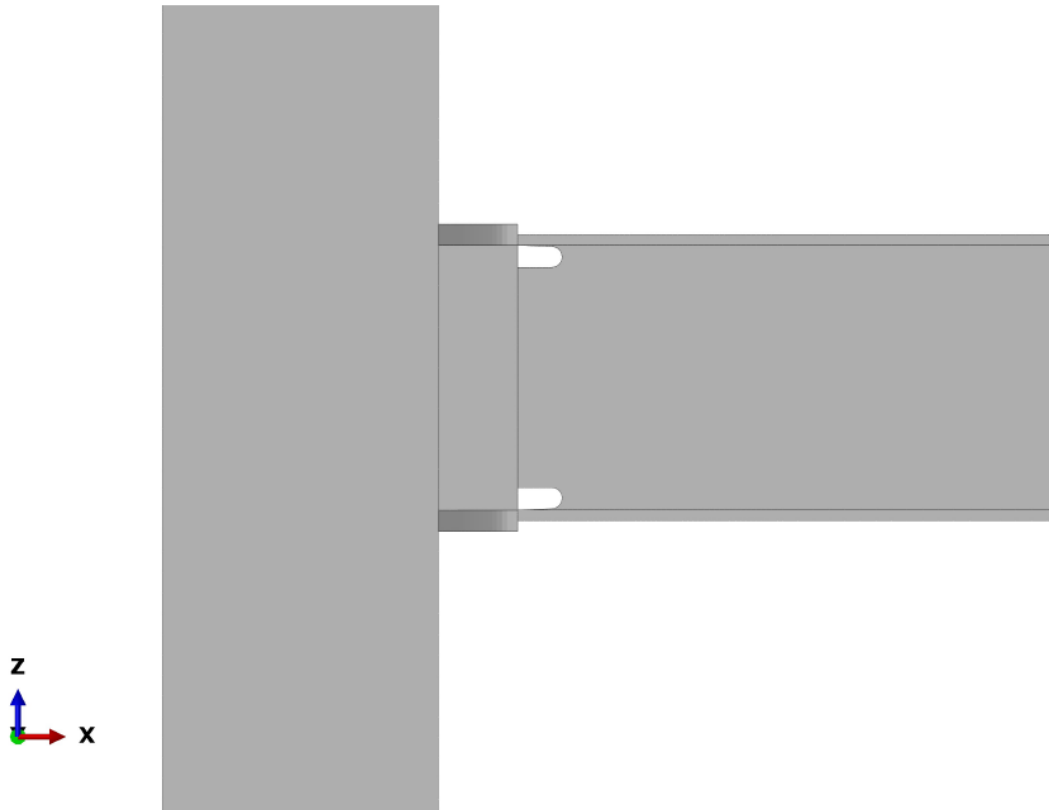
Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görünüşleri bu başlık altında gösterilmiştir.



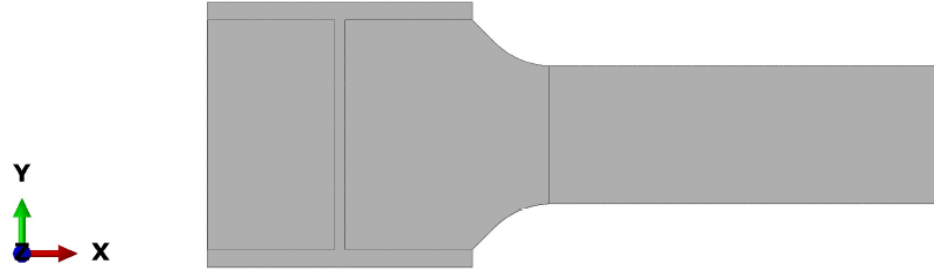
Şekil 7.16 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.



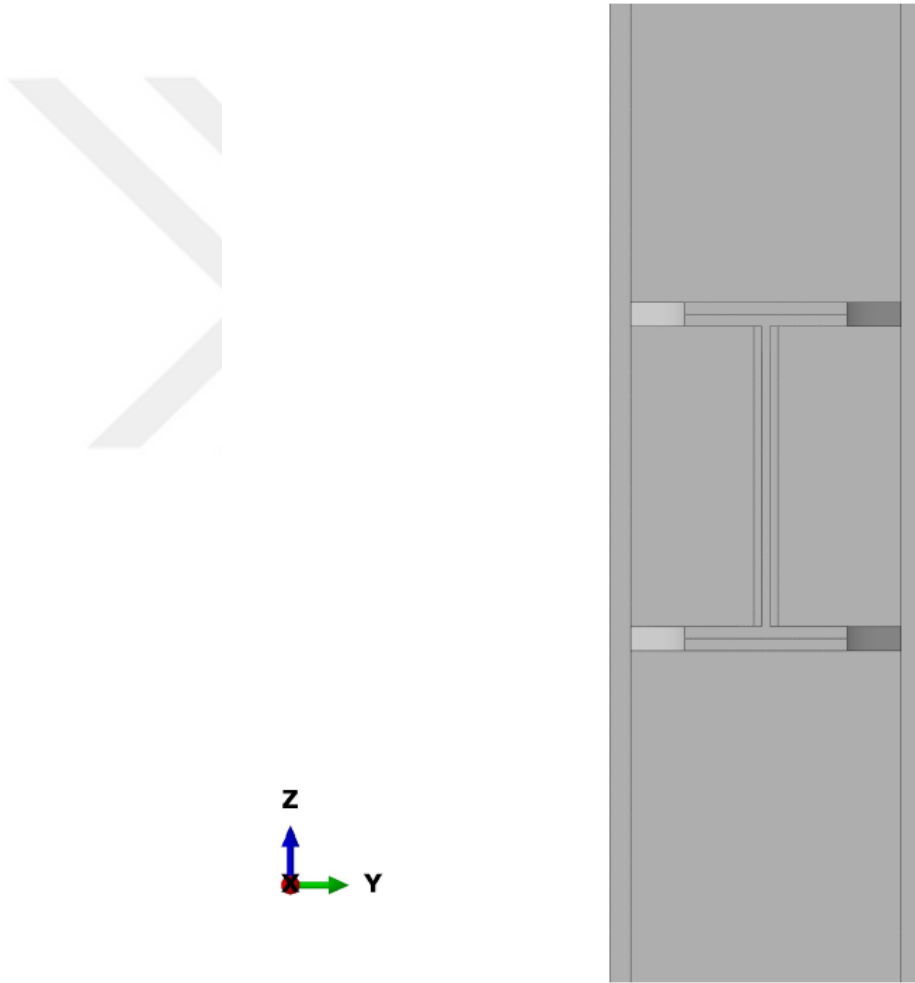
Şekil 7.17 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlştırılmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.18 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



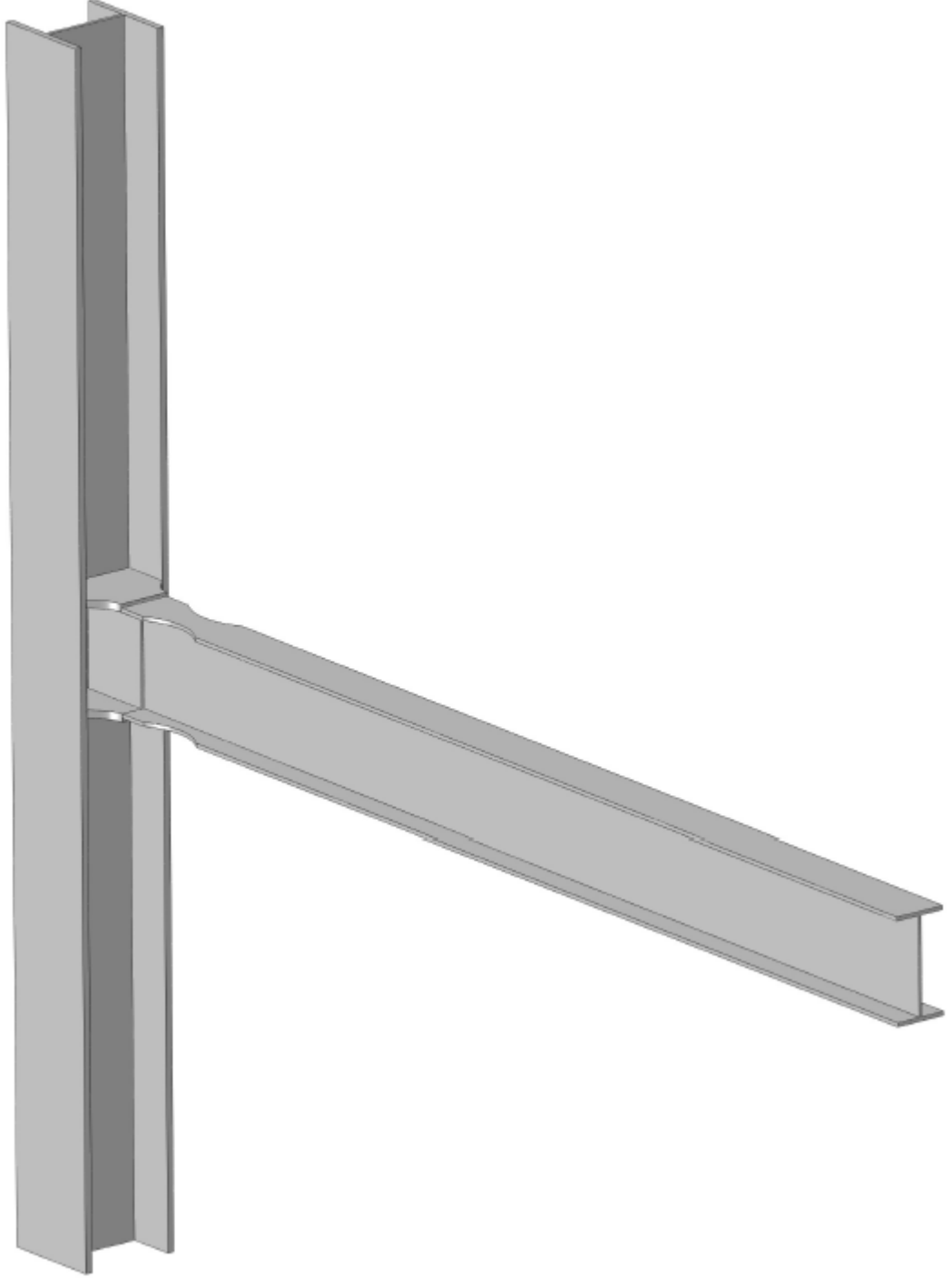
Şekil 7.19 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



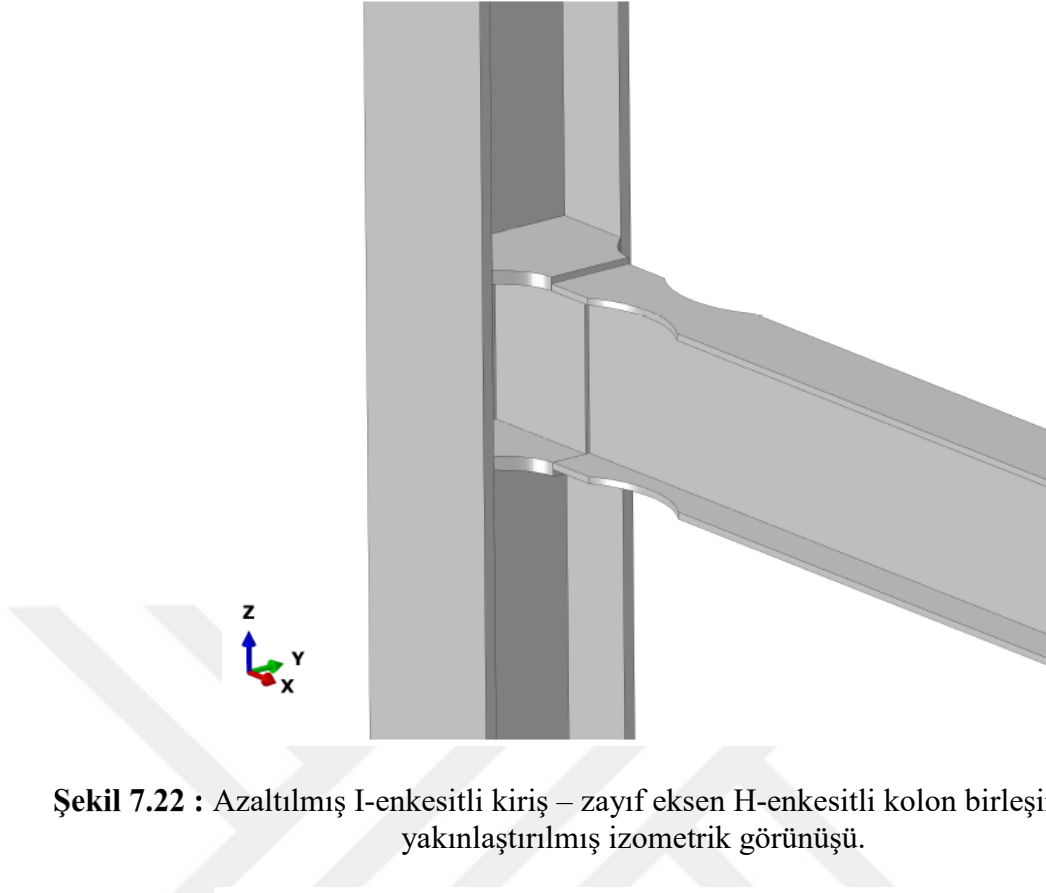
Şekil 7.20 : Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

- Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi
(Şekil 7.21, Şekil 7.22, Şekil 7.23, Şekil 7.24, Şekil 7.25)

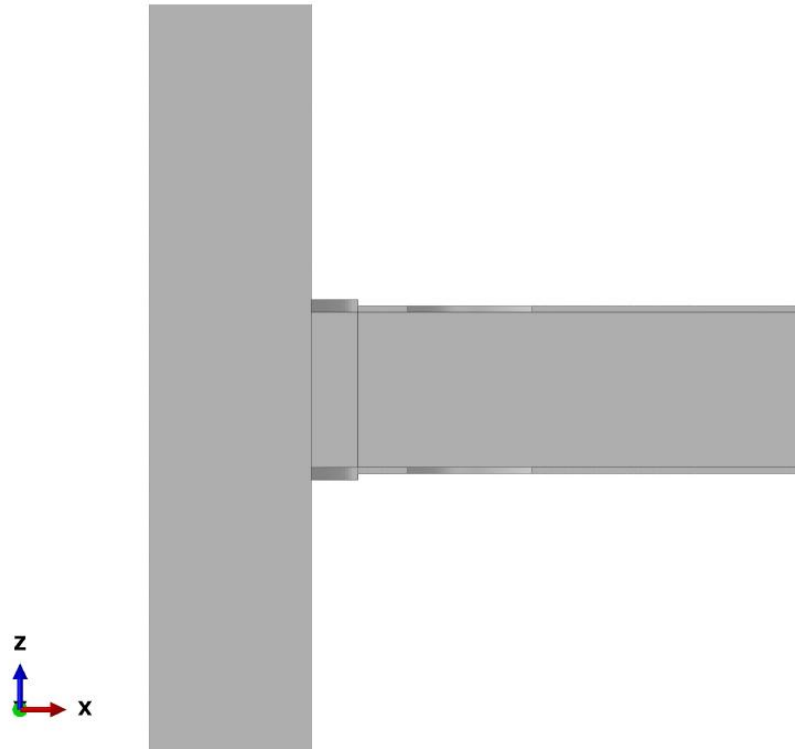
Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görünüşleri bu başlık altında gösterilmiştir.



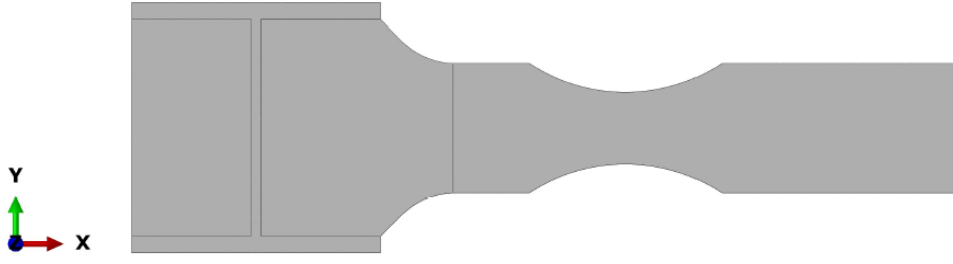
Şekil 7.21 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.



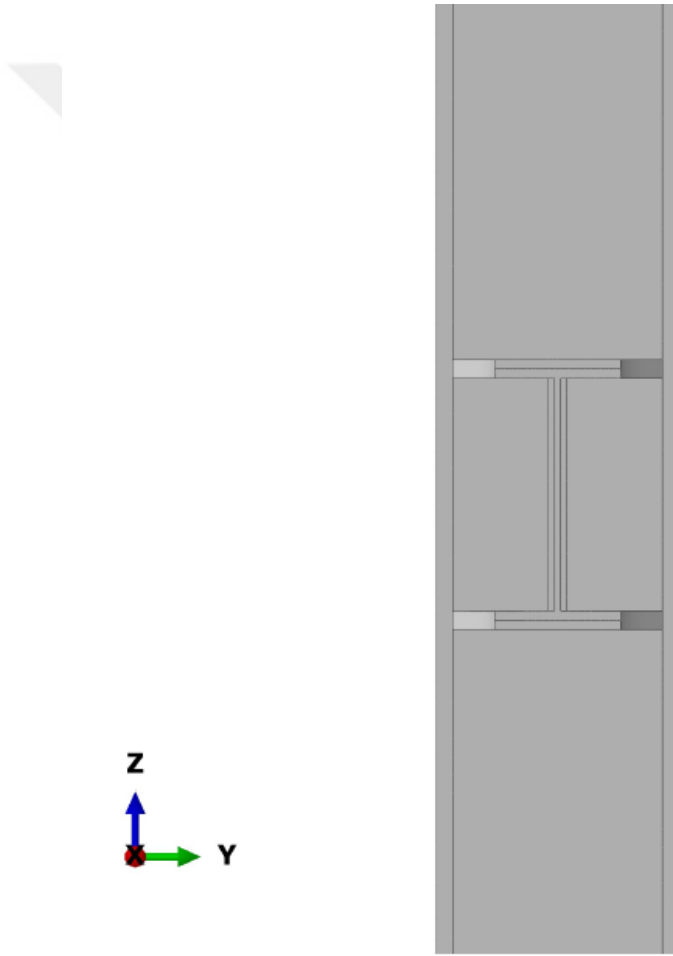
Şekil 7.22 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.23 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



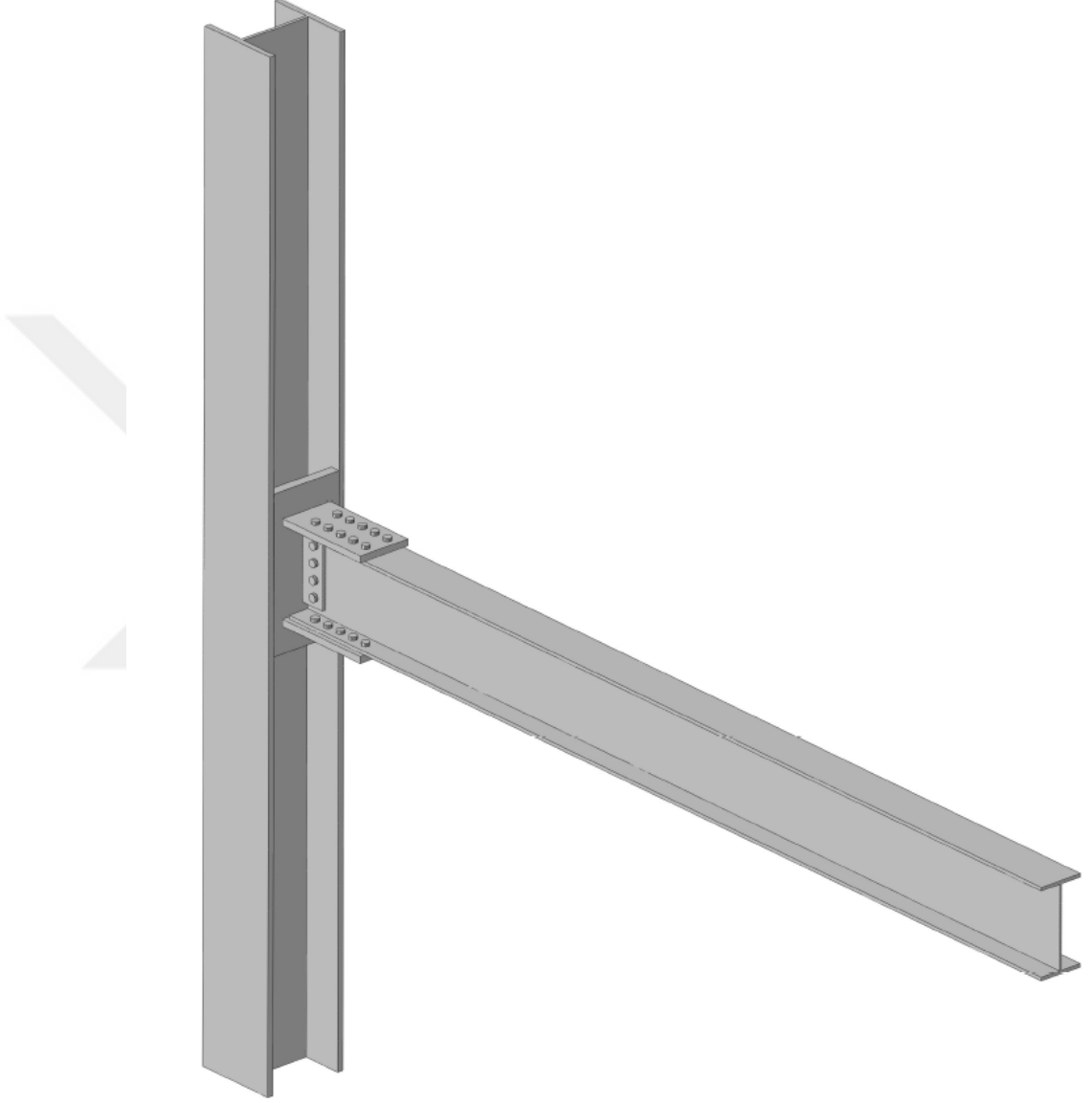
Şekil 7.24 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



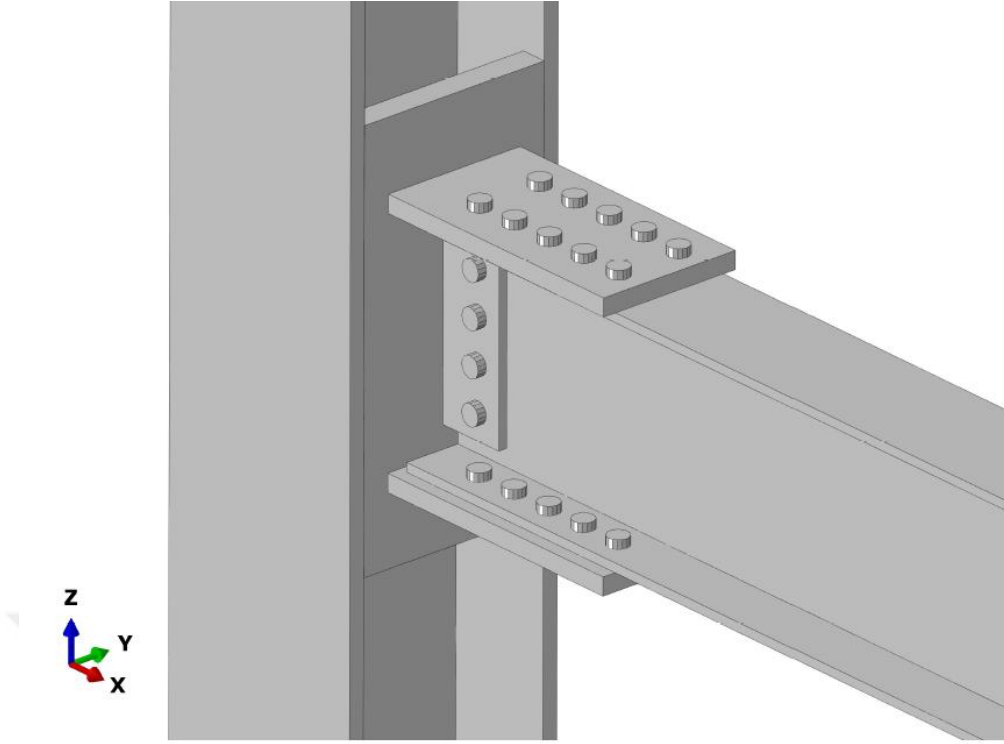
Şekil 7.25 : Azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

- Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi (Şekil 7.26, Şekil 7.27, Şekil 7.28, Şekil 7.29, Şekil 7.30)

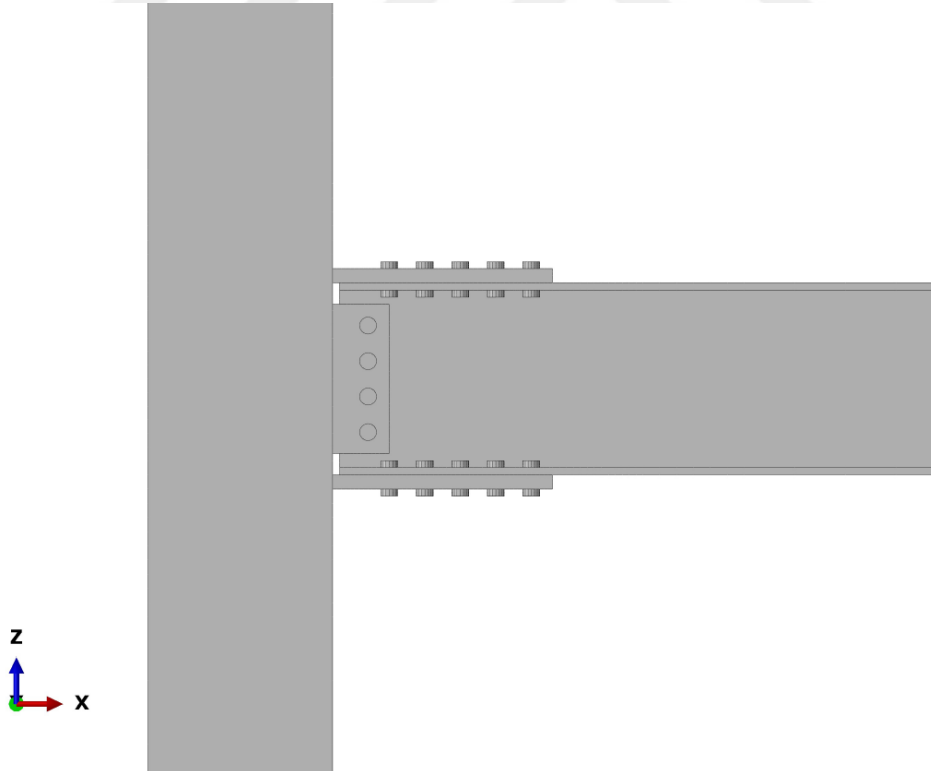
Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin görüşleri bu başlık altında gösterilmiştir.



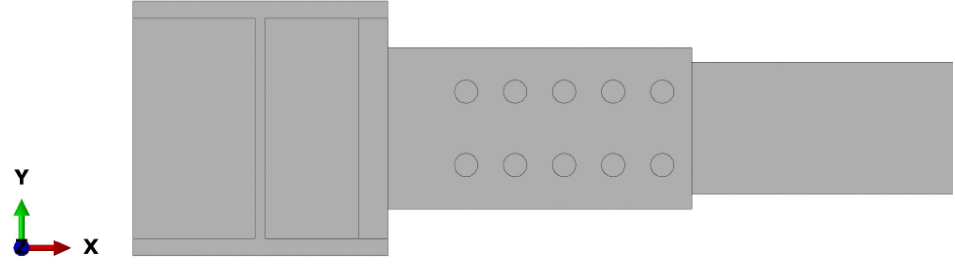
Şekil 7.26 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin izometrik görünüşü.



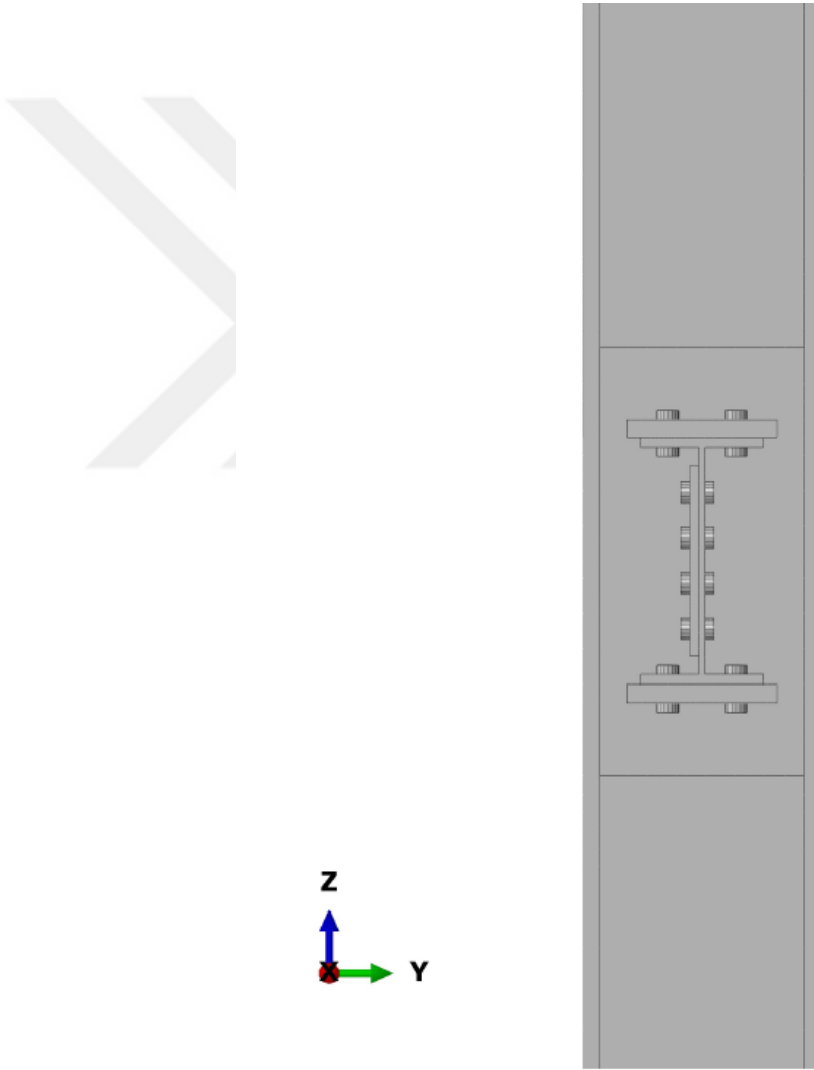
Şekil 7.27 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yakınlaştırmış izometrik görünüşü.



Şekil 7.28 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin yandan görünüşü.



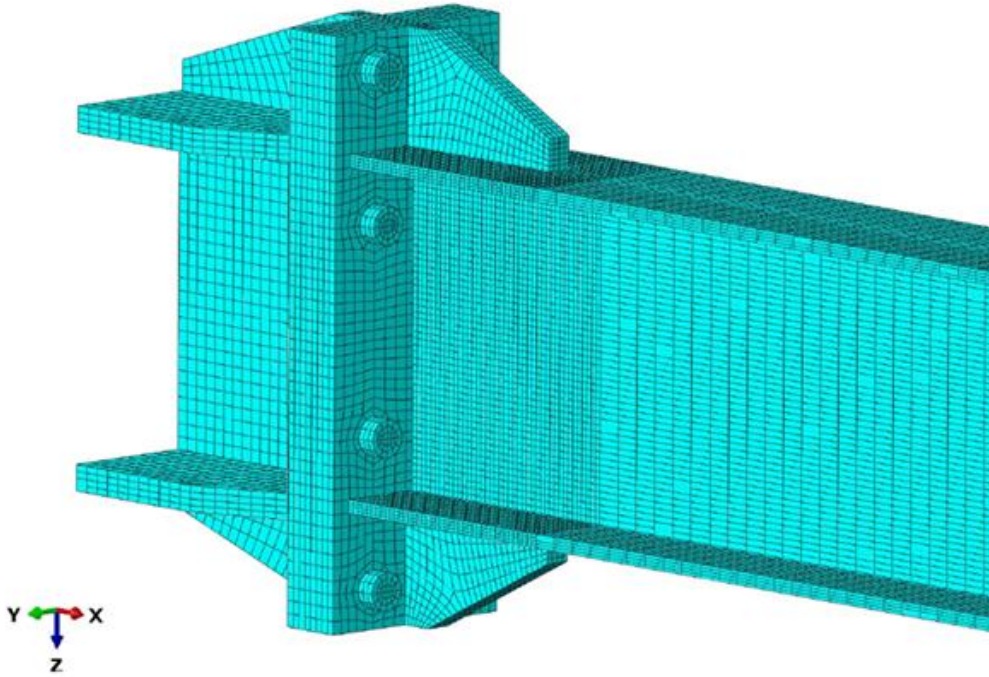
Şekil 7.29 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin üstten görünüşü.



Şekil 7.30 : Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin kiriş enkesit görünüşü.

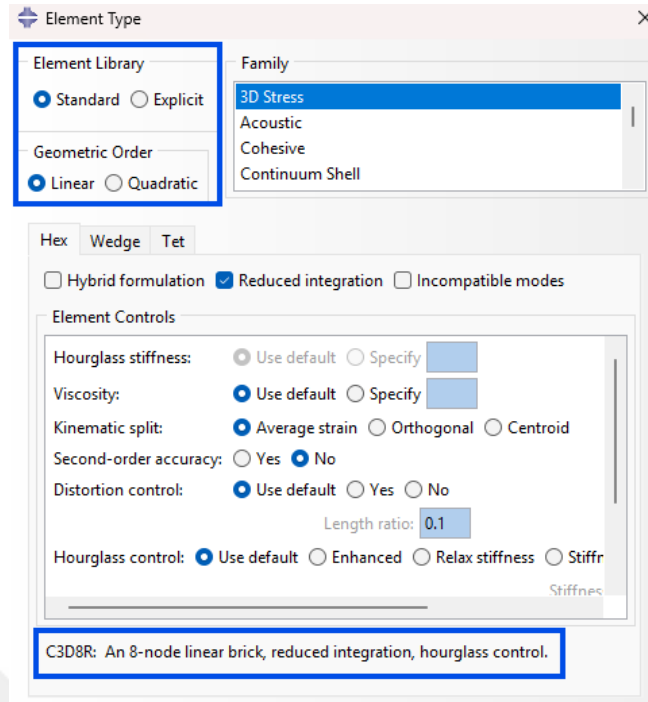
7.2 Eleman ve Sonlu Eleman Ağı Tanımları

Tüm modellerde, eğilme analizlerinde başarılı sonuçlar verdiği bilinen, doğrusal ve azaltılmış integrasyon özellikleriyle tanımlanan, tek integrasyon noktasına (reduced integration) sahip C3D8R tipi 8 düğüm noktalı katı elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanların tercih edilme nedeni, daha fazla integrasyon noktasına sahip olan ve bu nedenle analiz sonuçlarının doğruluk oranı oldukça yüksek kabul edilen kuadratik C3D20 elemanlarıyla yapılan karşılaştırmalı nümerik analizlerde elde edilen gerilme dağılımlarının, C3D8R elemanlarıyla elde edilen sonuçlarla yüksek düzeyde benzerlik göstermesidir. Ayrıca, C3D8R elemanlarının modellemede kullanılması analiz süresini önemli ölçüde azaltmakta ve bu yönüyle de avantaj sağlamaktadır. C3D8R elemanlarının yalnızca tek bir integrasyon noktasına sahip olması nedeniyle, eğilme etkilerinin gerçeğe uygun şekilde temsil edilebilmesi ve güvenilir sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla, eleman kalınlığı boyunca — Şekil 7.31’de de görüldüğü üzere — en az dört katmandan oluşan eleman ağı kullanılmıştır (Han ve diğ, 2016).



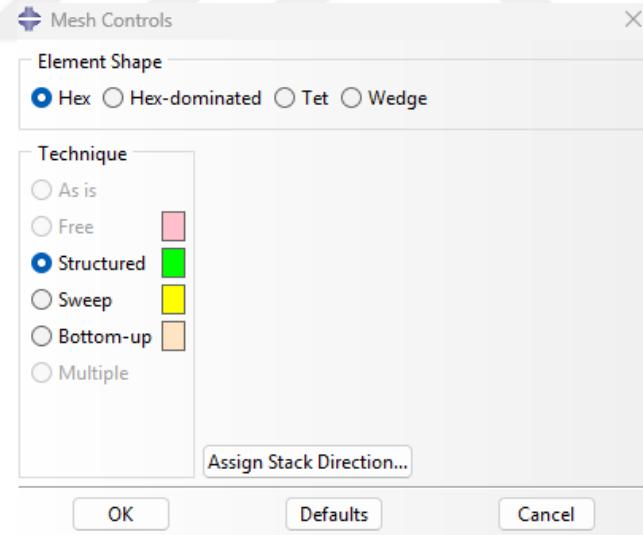
Şekil 7.31 : Kalınlık boyunca dört katman eleman ağı kullanımı.

ABAQUS yazılımında eleman tanımının yapıldığı bölüm Şekil 7.32’de gösterilmiştir.



Şekil 7.32 : ABAQUS yazılımında eleman tanımı.

Modellerde yapısal (structured) olan hegzagonal sonlu eleman ağı tipi kullanılmıştır (Şekil 7.33).

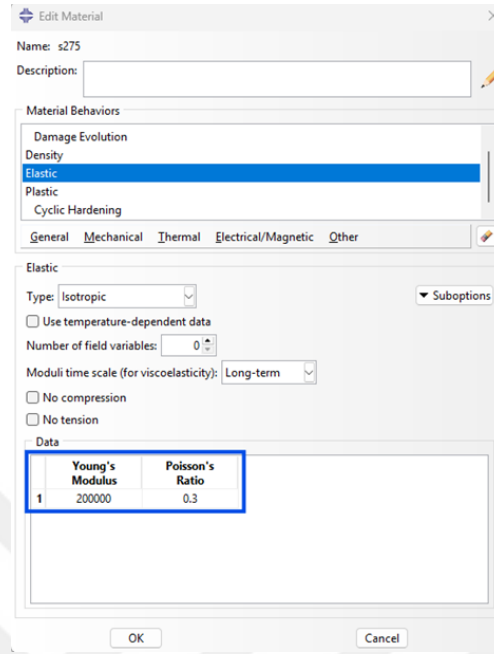


Şekil 7.33 : ABAQUS yazılımında sonlu eleman ağı özellikleri penceresi.

7.3 Malzeme Özellikleri ve Malzeme Modeli

Birleşim modellerindeki kiriş elemanlarında S275 yapı çeliği sınıfı kullanılmıştır. Kolon ve diğer tüm levhalar için S355 yapı çeliği sınıfı, yüksek dayanımlı bulonlar için ise 10.9 malzeme sınıfı esas alınmıştır.

Çelik yapı malzemelerinin elastisite modülü 200000 MPa olarak, Poisson oranı ise 0,3 olarak esas alınmıştır (Şekil 7.34).



Şekil 7.34 : ABAQUS yazılımında malzeme tanımlama penceresi - elastik malzeme özellikleri.

Kullanılacak malzemelerin gerilme - şekil değiştirme özelliklerini belirlemek için çekme deneyi gerçekleştirilmediğinden, S275 ve S355 yapı çeliği malzeme sınıfı için çekme dayanımına karşı gelen birim şekil değiştirme değeri (ϵ_u) ve kopma anındaki şekil değiştirme değeri ϵ_r için literatürde bulunan başka bir çalışmadan yararlanılmıştır (Krolo, 2017).

Birleşimlerde kullanılan elemanların karakteristik akma gerilmesi (F_y), karakteristik çekme dayanımı (F_u), yapısal çelik elastisite modülü (E), çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_u) ve kopma anındaki şekil değiştirme değeri (ϵ_f) Çizelge 7.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1: Birleşimlerde kullanılan profillerin ve levhaların malzeme özellikleri.

Malzeme Sınıfı	F_y [MPa]	F_u [MPa]	E [MPa]	ϵ_u [%]	ϵ_f [%]
S275	275	430	200000	19	50
S355	355	510	200000	15	47

Plastik deformasyonların oluşmasının beklediği kiriş elemanında, malzeme gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilirken beklenen akma gerilmesi $R_y F_y$ ve beklenen çekme gerilmesi $R_t F_u$ değerlerinden yararlanılmıştır.

Bulon malzeme sınıfı için pekleşmenin başladığı anda elde edilen şekil değiştirme değeri (ε_h) ve çekme dayanımına karşı gelen şekil değiştirme değeri (ε_u) belirtilmemiştir. Pekleşmenin başladığı andaki birim uzama şekil değiştirmesi değeri olarak $\varepsilon_h = 3\varepsilon_y$; çekme dayanımına ulaşıldığı andaki birim uzama şekil değiştirmesi değeri ise $\varepsilon_u = 8\varepsilon_y$ olarak dikkate alınmıştır (Baei ve diğ, 2012) (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2: Birleşimlerde kullanılan bulonların malzeme özellikleri.

Elemanlar	E [MPa]	f_{yb} [MPa]	f_{ub} [MPa]	ε_y	ε_h	ε_u
10.9 Bulon	200000	900	1000	0,004	0,013	0,036

Çevrimsel yükleme altındaki malzeme davranışını temsil edebilmek için malzemelerin elastik sınırlarının ötesinde sergilediği doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışları Ramberg ve Osgood (1943) tarafından elde edilen, Hill (1944) tarafından geliştirilen yöntem kullanılarak elde edilmiştir.

İlk olarak kirişin gerilme - şekil değiştirme değerleri belirlenecektir. Bunun için ilk olarak n katsayısı hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_u = 0,19$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$R_u F_u = 1,10 \times 430 = 473 \text{ MPa}$$

$$R_y F_y = 1,30 \times 275 = 357,5 \text{ MPa}$$

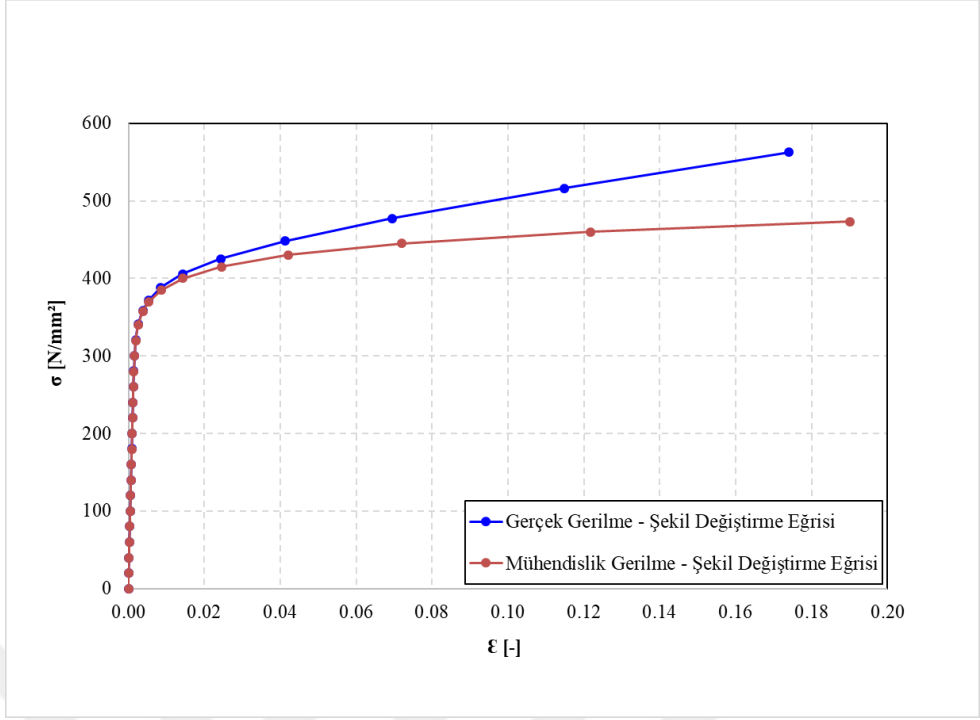
$$n = \frac{\ln \left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002} \right)}{\ln \left(\frac{F_u}{F_y} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{0,19 - \frac{473}{200000}}{0,002} \right)}{\ln \left(\frac{473}{357,5} \right)} = 16,2$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir (Çizelge 7.3).

Çizelge 7.3: Kiriş için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri.

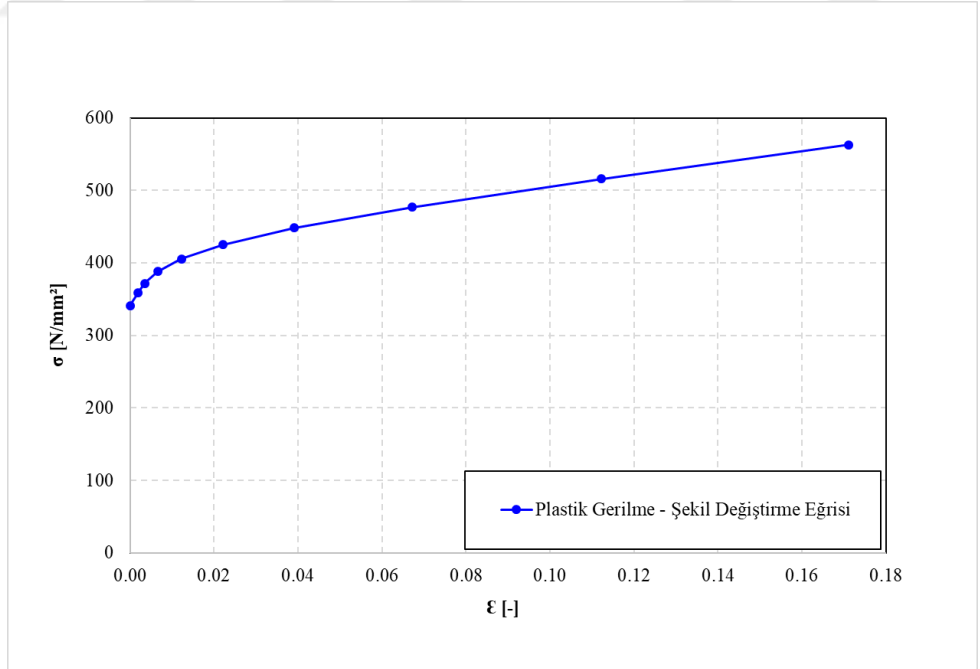
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0014	280	0,0014
300	0,0016	300	0,0016
320	0,0019	321	0,0019
340	0,0026	341	0,0026
357.5	0,0038	359	0,0038
370	0,0053	372	0,0053
385	0,0086	388	0,0085
400	0,0144	406	0,0143
415	0,0246	425	0,0243
430	0,0421	448	0,0413
445	0,0720	477	0,0695
460	0,1217	516	0,1148
473	0,1900	563	0,1740

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.35'te gösterilmektedir.



Şekil 7.35 : Kirişin mühendislik ve gerçek gerilme - şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 7.36’da gösterilmektedir.



Şekil 7.36 : Kirişin gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi.

Kolon ve çelik levhalar için de benzer şekilde gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,15$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$F_y = 355 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,15 - \frac{510}{200000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{510}{355}\right)} = 11,9$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.4).

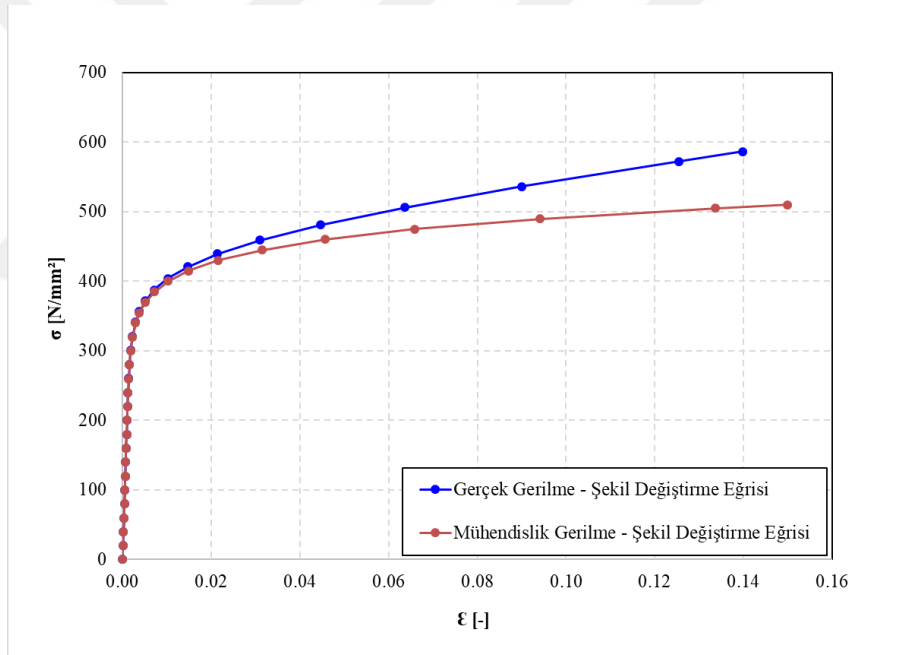
Çizelge 7.4: Kolon ve çelik levhalar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

σ_{eng} [MPa]	ε_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ε_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
20	0,0001	20	0,0001
40	0,0002	40	0,0002
60	0,0003	60	0,0003
80	0,0004	80	0,0004
100	0,0005	100	0,0005
120	0,0006	120	0,0006
140	0,0007	140	0,0007
160	0,0008	160	0,0008
180	0,0009	180	0,0009
200	0,0010	200	0,0010
220	0,0011	220	0,0011
240	0,0012	240	0,0012
260	0,0013	260	0,0013
280	0,0015	280	0,0015
300	0,0018	301	0,0018
320	0,0022	321	0,0022
340	0,0029	341	0,0029
355	0,0038	356	0,0038
370	0,0051	372	0,0051
385	0,0072	388	0,0071
400	0,0102	404	0,0102

Çizelge 7.4 (devam): Kolon ve çelik levhalar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

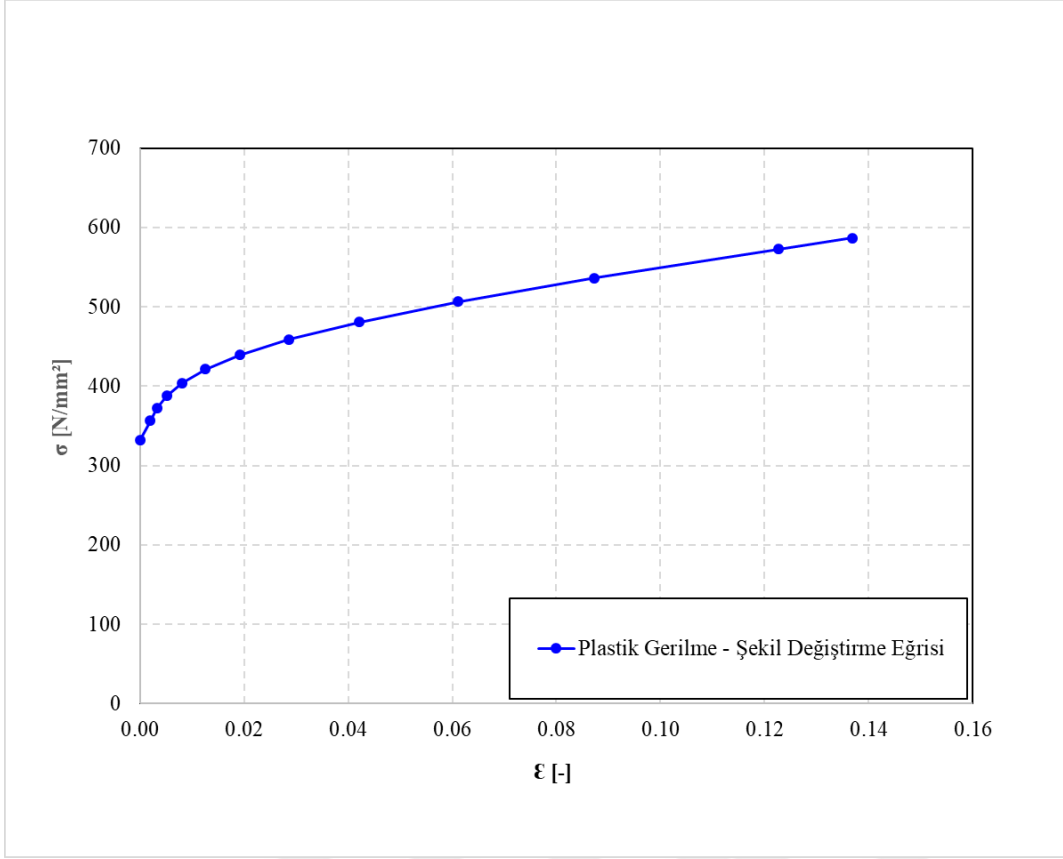
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
415	0,0148	421	0,0147
430	0,0216	439	0,0214
445	0,0315	459	0,0310
460	0,0456	481	0,0446
475	0,0658	506	0,0637
490	0,0942	536	0,0900
505	0,1337	573	0,1255
510	0,1500	587	0,1398

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.37’de gösterilmektedir.



Şekil 7.37 : Kolon için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme –şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 7.38’de gösterilmektedir.



Şekil 7.38 : Kolon ve çelik levhalar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Bulonlar için gerilme - şekil değiştirme değerleri n katsayısı hesaplanarak belirlenmiştir.

$$\varepsilon_u = 0,036$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_u = 1000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 900 \text{ MPa}$$

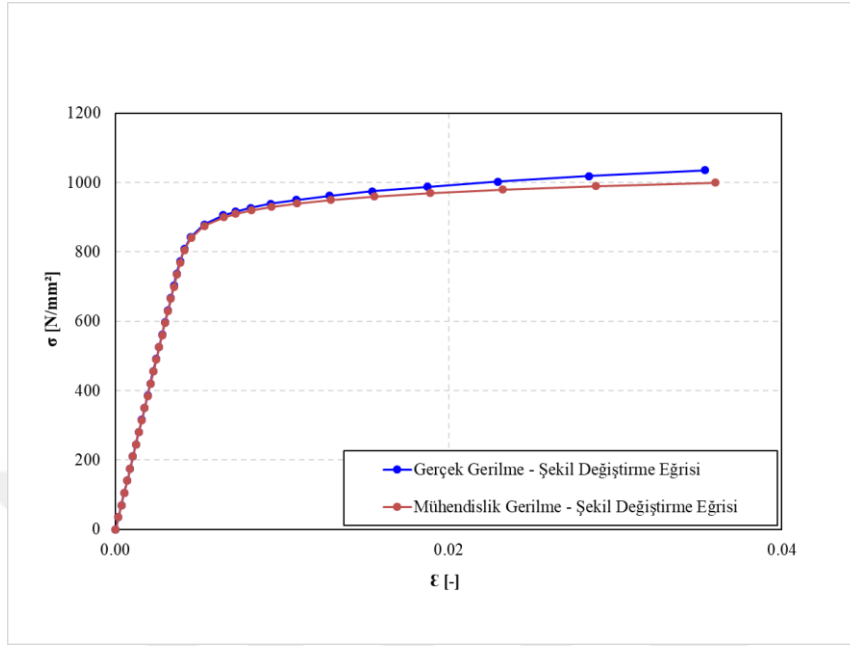
$$n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_u - \frac{F_u}{E}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{F_u}{F_y}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{0,036 - \frac{1000}{200000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{1000}{900}\right)} = 26$$

Hesaplanan n değeri kullanılarak mühendislik gerilme - şekil değiştirme değerlerinin elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerçek gerilme - şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.5: 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme değerleri.

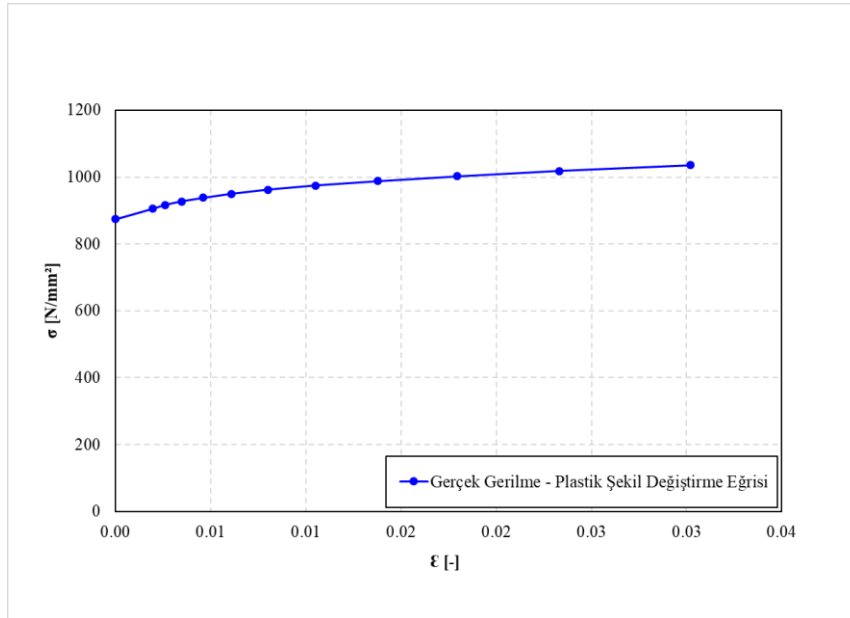
σ_{eng} [MPa]	ϵ_{eng} [-]	σ_{true} [MPa]	ϵ_{true} [-]
0	0,0000	0	0,0000
35	0,0002	35	0,0002
70	0,0004	70	0,0003
105	0,0005	105	0,0005
140	0,0007	140	0,0007
175	0,0009	175	0,0009
210	0,0011	210	0,0010
245	0,0012	245	0,0012
280	0,0014	280	0,0014
315	0,0016	315	0,0016
350	0,0018	351	0,0017
385	0,0019	386	0,0019
420	0,0021	421	0,0021
455	0,0023	456	0,0023
490	0,0025	491	0,0024
525	0,0026	526	0,0026
560	0,0028	562	0,0028
595	0,0030	597	0,0030
630	0,0032	632	0,0031
665	0,0033	667	0,0033
700	0,0035	702	0,0035
735	0,0037	738	0,0037
770	0,0039	773	0,0039
805	0,0041	808	0,0041
840	0,0045	844	0,0045
875	0,0053	880	0,0053
900	0,0065	906	0,0065
910	0,0072	917	0,0072
920	0,0081	927	0,0081
930	0,0093	939	0,0093
940	0,0109	950	0,0108
950	0,0129	962	0,0128
960	0,0155	975	0,0154
970	0,0189	988	0,0187
980	0,0232	1003	0,0230
990	0,0288	1019	0,0284
1000	0,0360	1036	0,0360

Gerçek gerilme - şekil değiştirme ve mühendislik gerilme - şekil değiştirme eğrileri Şekil 7.39’da gösterilmektedir.



Şekil 7.39 : 10.9 bulonlar için elde edilen mühendislik ve gerçek gerilme – şekil değiştirme eğrileri.

ABAQUS yazılımına tanımlanacak olan gerçek gerilme - plastik şekil değiştirme eğrisi Şekil 7.40’ta gösterilmektedir.



Şekil 7.40 : Bulonlar için elde edilen gerçek gerilme – plastik şekil değiştirme eğrisi.

Elde edilen akma sonrası gerilme - plastik şekil değiştirme değerleri, ABAQUS yazılımında birleşik pekleşme (combined hardening) modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Kumar ve diğ. (2015), tekrarlı yükler altındaki davranışta izotropik pekleşme tanımının yetersiz kaldığını, anizotropik durumları ve dayanım azalmasını dikkate alan Bauschinger etkisini temsil edebilen kinematik pekleşme modelinin de dikkate alındığı, yükleme yönünün etkisini göz önünde bulunduran birleşik pekleşme tanımının kullanabileceğini belirtmiştir.

Birleşik pekleşme modeli kinematik pekleşme bileşeni half cycle tanımı ile, izotropik pekleşme bileşeni ise “cyclic hardening” tanımı ile yapılacaktır. Krolo ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda, S275 ve S355 çelikleri için nümerik modellerde kullanılan birleşik pekleşme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlara göre nümerik modeller kalibre edilmiştir (Çizelge 7.6). Bu çalışma sonucunda, birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşenine ait çevrimsel pekleşme (cyclic hardening) özelliğinin nümerik modelde tanımı için gerekli olan Q ve b parametreleri belirlenmiştir. Bu tez kapsamında geliştirilen birleşimlerin sonlu eleman modellerinin analizinde, söz konusu parametreler; kiriş elemanları için S275, kolon elemanları için ise S355 yapı çeliği için önerilen değerler esas alınarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.6: Birleşik pekleşme modelinin izotropik bileşeni için çevrimsel pekleşme parametreleri (Krolo ve diğ, 2016).

Yapısal Çelik Sınıfı	Q [MPa]	b [-]
S275	25,6	4,4
S355	20,8	3,2

Hasar beklenen birleşim elemanlarında hasar durumu, sünek hasar modeli (ductile damage model) kullanılarak değerlendirilmektedir. Birleşimin tasarımı, plastik deformasyonların kirişte meydana gelmesi prensibine dayanmaktadır. Bu nedenle, hasar durumunun gözlenebilmesi için sünek hasar modeli, kiriş elemanlarının malzeme davranışının modellenmesinde dikkate alınacaktır.

Hasar oluşum modeli için sünek hasar başlatma kriteri (ductile criterion) kullanılacaktır. Bu kritere göre, hasarın başladığı andaki, hasar katsayısının sıfır olduğu $D = 0$ eşdeğer plastik şekil değiştirmenin ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$) belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer, tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerine

karşı gelen ε_u şekil değiştirme değerine eşit olarak alınabilir (Krolo, 2017). Ancak çevrimsel yükleme etkisindeki bir elemanın incelendiği durumlarda tek eksenli çekme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar beklenen davranışı yansıtmakta yetersiz kalmaktadır. Krolo (2017) tarafından yapılan çalışmada, çok sayıda çelik levha numunesinin çevrimsel yükler altında analizleri yapılmış ve numuneler için gerilme – şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Testler sonucunda, çevrimsel yükleme etkisindeki davranışın nümerik olarak da temsil edilebilmesi için birleşimlerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve deney sonucu elde edilen gerilme - şekil değiştirme değerlerine yakınsayacak eşdeğer plastik şekil değiştirme ($\bar{\varepsilon}_D^{pl}$) değerleri kalibre edilmiştir. Kalibrasyon çalışmasının S355 yapı çeliği sınıfı için gerçekleştirildiği, ancak S275 yapı çeliği sınıfı için de S355 yapı çeliği sınıfı için elde edilen değerlerin kullanılmasının uygun olduğu belirtilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında, yapısal çelik malzemesinin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla tek eksenli çekme deneyi ile tekrarlı yükler altındaki davranışın karakterize edilmesine yönelik çekme-basınç deneyleri gerçekleştirilmediğinden, Krolo (2017) tarafından yapılan çalışma kapsamında kalibre edilen parametrelerden yararlanılmıştır (Çizelge 7.7).

Birleşim modellerinde elemanlar çok eksenli gerilmeler etkisindedir. Bu nedenle, hasarın başlangıcındaki eşdeğer plastik şekil değiştirmenin ($\bar{\varepsilon}_D^{pl}$) gerilme üç eksenliliğinin (η) bir fonksiyonu olarak ABAQUS yazılımında tanımlanması gerekir. Ayrıca $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$, şekil değiştirme hızına da ($\dot{\varepsilon}_0^{pl}$) bağlıdır. Bu parametreler, deneysel çalışmalarda kullanılan yöntem ve yükleme durumuna bağlı olarak belirlenmektedir. Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çeliği sınıfı ile yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar kullanılarak eşdeğer plastik şekil değiştirme değerleri farklı gerilme üç eksenliliği değerlerine göre elde edilmiştir (Çizelge 7.7). Krolo (2017) tarafından yapılan çalışmalarda şekil değiştirme hızı olarak 0,001 değerinin kullanıldığı belirtilmiştir. ABAQUS yazılımında sünek hasar başlatma kriteri değerleri, bu şekil değiştirme hızı değeriyle birlikte tanımlanmıştır.

Çizelge 7.7: Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ε_D^{pl}	Gerilme Üç Eksenliliği	Şekil Değiştirme Hızı
0,6308	0,330	0,001
0,6249	0,380	0,001

Çizelge 7.7 (devam): Çekme-basınç kuvvetlerinin tekrarlı etkisi altında yapılan deneylerin sonuçlarına göre kalibre edilen parametreler (Krolo, 2017).

ε_D^{pl}	Gerilme Üç Eksenliliği	Şekil Değiştirme Hızı
0,6188	0,430	0,001
0,6124	0,480	0,001
0,6061	0,520	0,001
0,5996	0,570	0,001
0,5931	0,610	0,001

Hasar başlangıcı ile ilgili tanımlar yapıldıktan sonra, hasarın gelişimi ile ilgili gerekli modelleme adımları gerçekleştirilmiştir. Malzemede hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri (ε_f^{pl}), Krolo (2017) tarafından S275 ve S355 yapı çelikleri için gerçekleştirilen çekme testleri kapsamında elde edilmiştir. Bu değer, S275 yapı çeliği için çekme dayanımı değerine karşılık gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 2,6 katı; S355 yapı çeliği için ise çekme dayanımına karşı gelen (ε_u) şekil değiştirme değerinin ortalama olarak 3,0 katı şeklinde verilmektedir. Makalede net olarak belirtilmese de akma gerilmesi dikkate alındığında T-parçanın malzemesinin S275 olduğu tahmin edilmektedir. Bu bilgiler kullanılarak, $\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl}$ olacak şekilde tanımlanmıştır.

$$\varepsilon_f^{pl} = 2,6\varepsilon_D^{pl} = 2,6 \times 0,631 = 1,64$$

Bu değer kullanılarak kırılma anında plastik yer değiştirme $\bar{u}_f^{pl}$ denklem 7.1 ile hesaplanmaktadır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L\bar{\varepsilon}_f^{pl} \quad (7.1)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L : Eleman karakteristik uzunluğu, mm.

$\bar{\varepsilon}_f^{pl}$: Hasarın tamamlandığı, yani toplam hasar değişkeni $D = 1$ değerine ulaşıldığında ortaya çıkan eşdeğer plastik şekil değiştirme ile hasarın başladığı andaki eşdeğer plastik şekil değiştirme arasındaki fark, $\varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_0^{pl}$.

$$\eta = 1/3 \text{ için, } \varepsilon_0^{pl} = \bar{\varepsilon}_D^{pl}$$

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = \varepsilon_f^{pl} - \varepsilon_0^{pl} = 1,64 - 0,63 = 1,01$$

Eleman karakteristik uzunluğu L , elemanın hacminin küp kökü alınarak belirlenir.

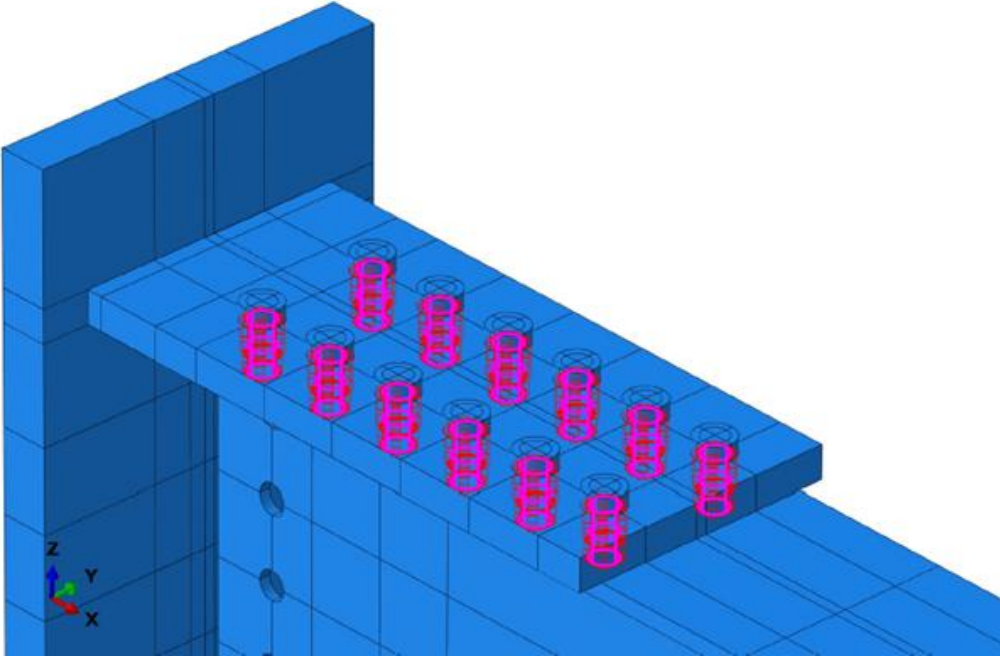
Sonlu eleman modellerinde en yüksek plastik deformasyonun beklendiği bölgelerde ortalama eleman uzunluğu $L = 3,00 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerlerle, kırılma anında plastik yer değiştirme $\bar{u}_f^{pl}$ hesaplanmıştır.

$$\bar{u}_f^{pl} = L \bar{\varepsilon}_f^{pl} = 3,00 \times 1,01 = 3,03 \text{ mm}$$

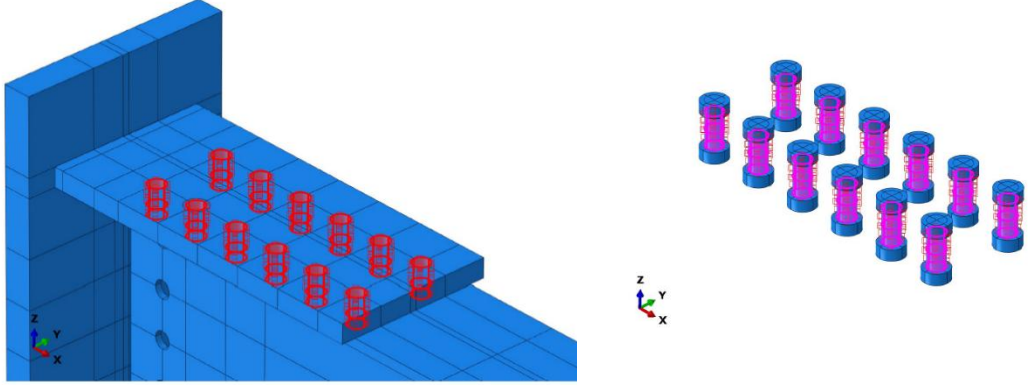
$\bar{u}_f^{pl}$ değeri, ABAQUS yazılımında “damage evolution” tanımı altında, hasar değişkeninin (D), plastik yer değiştirme ile ilişkisinin doğrusal olarak tanımlandığı “linear softening” modeli ile tanımlanmıştır.

7.4 Elemanlar Arasındaki Temas Etkileşimi Modeli

Modellerde birbirleriyle temasta olan elemanlar için yüzeyler arası (yüzey – yüzey) temas modeli esas alınmaktadır ABAQUS yazılımında kullanılan temas algoritmasına göre, tamamlayıcı yüzey (slave surface) esas yüzeye (master surface) nüfuz edebildiğinden, birleşen elemanlardan daha rijit olan ya da daha seyrek sonlu eleman ağ yapısına sahip yüzey esas yüzey olarak tanımlanmıştır (Şekil 7.41).



Şekil 7.41 : Başlık levhası ile bulonlar arasındaki temas yüzeyleri.



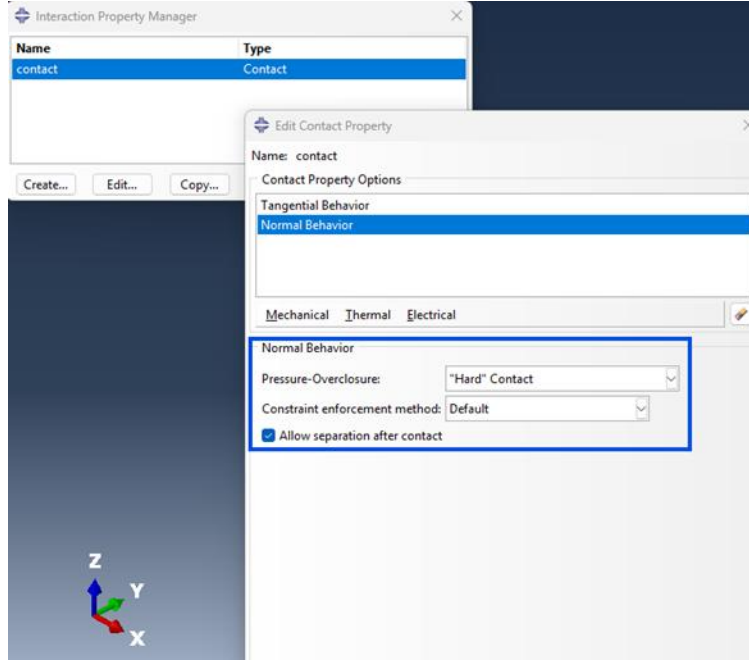
Şekil 7.41 (devam): Başlık levhası ile bulonlar arasındaki temas yüzeyleri.

Küçük kayma etkisi algoritması (small sliding), esas yüzey üzerindeki noktaların tamamlayıcı yüzey üzerindeki hangi noktalar ile ilişkide olacağını belirlemektedir. Analizlerde temasta olan elemanların yüzeyler arasında büyük oranda bir yer değiştirme beklenmediğinden küçük kayma etkisi algoritmasının uygulanması uygun görülmüştür.

7.5 Temas Eden Yüzeyler Arasındaki Etkileşimin Tanımlanması

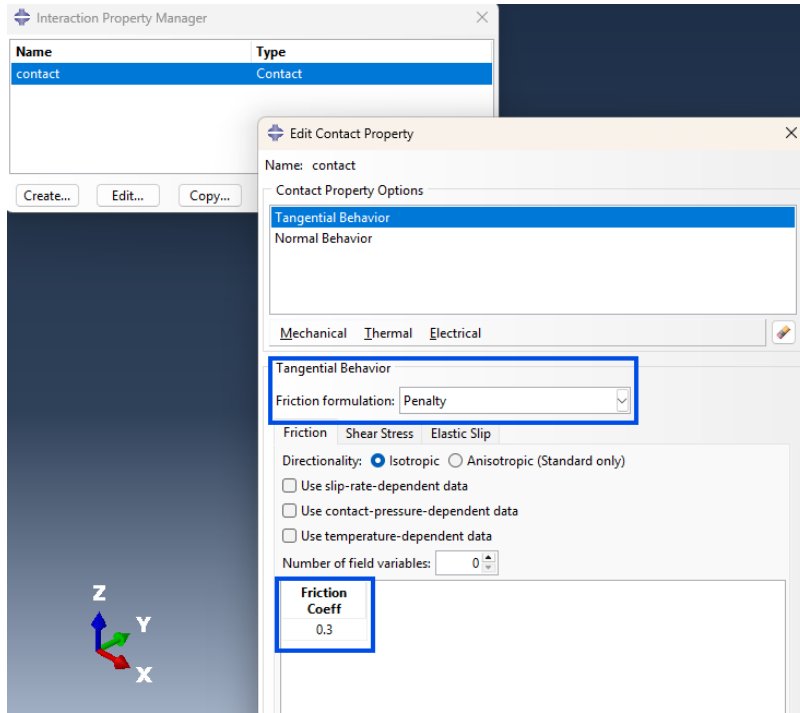
Birleşim modellerinde yer alan bulonlu birleşimlerde, bulonların gövdesinin levhalardaki ve kirişteki delikler ve levhaların temas eden yüzeyleri arasındaki etkileşimler teğetsel ve normal bileşen olarak iki adet davranış modeli kullanılarak tanımlanacaktır.

Birleşim yüzeylerinin normal bileşeninin davranışını belirlemede “Hard Contact” tanımı kullanılacaktır. Bu davranış modeli yüzeyler arasında temas kurulduktan sonra yüzeylerin birbirinden ayrılmasına olanak vermektedir. İki yüzeyi ayıran mesafe sıfırlandığında temas yüzeyi davranışı uygulanmaya başlanmaktadır. Temas yüzeyindeki basınç sıfıra eşit olduğunda veya negatif bir değer aldığı anda ise temas yüzeyinin normal bileşen davranışının uygulanması sona ermektedir (Şekil 7.42).



Şekil 7.42 : Temas yüzeylerinde normal bileşen davranış modeli.

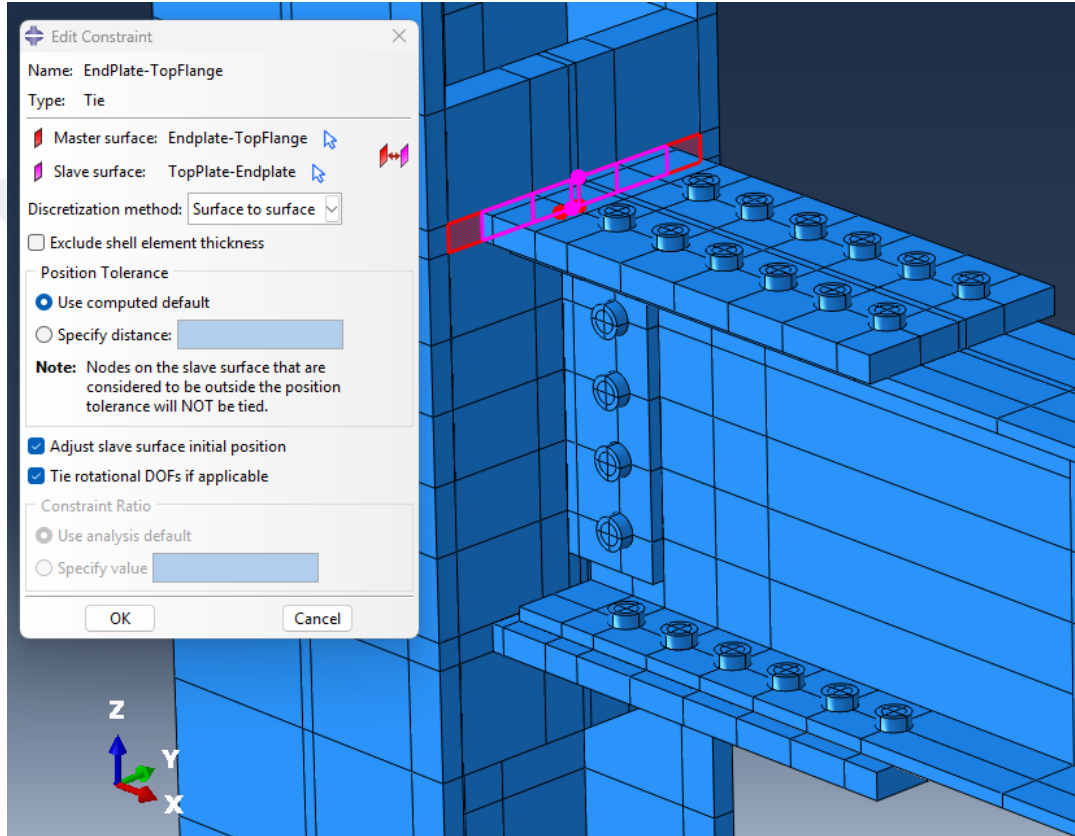
Teğetsel davranış olarak Coulomb sürtünme modeli dikkate alınacaktır. Teğetsel davranış modeli, temas yüzeyleri arasında oluşması beklenen sürtünme etkisinin formülasyonu olarak “Penalty” özelliği seçilmek suretiyle, elemanların yüzeyleri arasındaki sürtünme katsayısı 0,30 alınarak tanımlanmıştır (Şekil 7.43).



Şekil 7.43 : Temas yüzeylerinde teğetsel davranış modeli.

7.6 Kaynaklı Birleşimler için Sonlu Eleman Noktaları Arasında Bağlantının Sağlanması

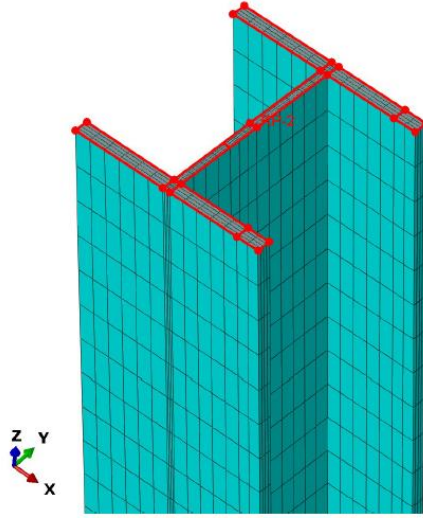
Kaynaklı olarak birleşen eleman yüzeyleri arasındaki bağlantı, “tie constraint” etkileşim modeli kullanılarak iki yüzeyin aynı serbestlik derecesine sahip olması ile sağlanmaktadır. Kaynak işlemi uygulanarak teşkil edilen birleşimler için, kaynak malzemesinin dayanımının daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, bu etkileşim modelinin kullanılması uygun görülmüştür (Şekil 7.44).



Şekil 7.44 : Kiriş-kolon birleşiminde tie constraint tanımı.

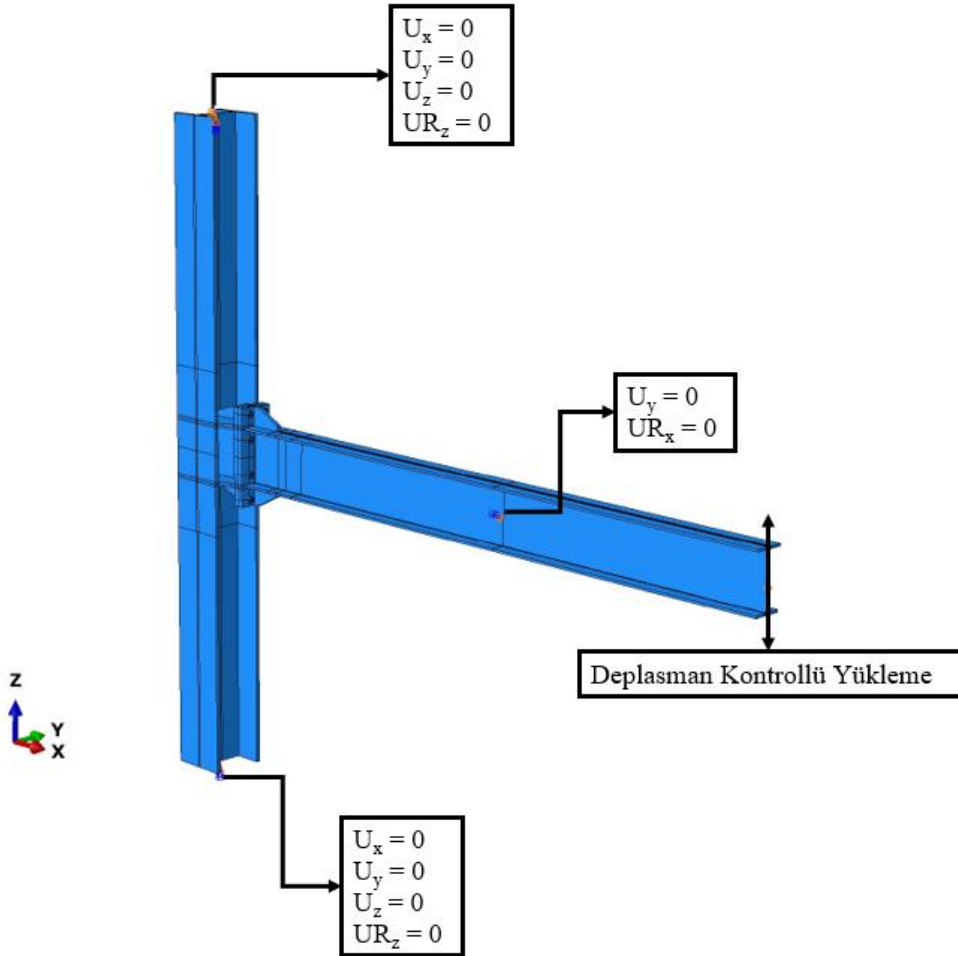
7.7 Mesnetlerin Modellenmesi

Modellerde kolonların alt ve üst uçlarının kesitleri basit mesnetler olarak tanımlanmaktadır. ABAQUS yazılımında ilgili kesit yüzeyleri “Rigid Body” komutu ile bir referans noktasına bağlanmaktadır. Böylece yüzeydeki her bir noktanın beraber hareket etmesi amaçlanmıştır (Şekil 7.45).



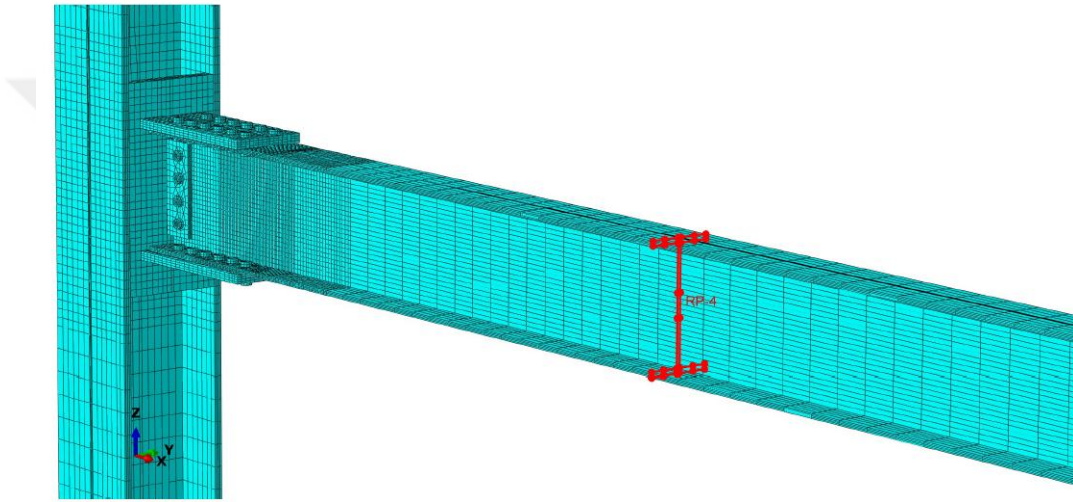
Şekil 7.45 : Rigid body tanımının uygulanması.

Bu işlemin ardından, kolon üst kesitini ve alt kesitini temsil eden referans noktalarına basit mesneti temsil edecek sınır koşulları uygulanmaktadır (Şekil 7.46).



Şekil 7.46 : Mesnetlerin ve yük uygulama noktasının model üzerindeki görünüşleri.

Kiriş, burulma deformasyonu yaparak yanal burkulmasının – yatay doğrultuda ötelenerek kendi eksenini etrafında dönmesinin – önlenmesi amacıyla, uzunluğu boyunca belirli noktalardan yanal olarak desteklenmiştir. Bu işlem kolonların uçları için sınır koşulları uygulanırken kullanılan “Rigid Body” komutuyla sağlanmıştır. Bunun için, belirli enkesitlerde, yanal destekler arasındaki uzaklık 1,00 m olacak şekilde, bölümlendirme (partition) komutuyla oluşturulan kesit yüzeyi, “Rigid Body” komutuyla kesitin ağırlık merkezinde bulunan referans noktasına bağlanmıştır. Referans noktasının sınır koşulları, kirişin kendi eksenini etrafında dönme ve enine ötelenme serbestliklerinin engelleneceği şekilde düzenlenmiştir (Şekil 7.47).



Şekil 7.47 : ABAQUS yazılımında kirişin yanal olarak desteklenmesi.

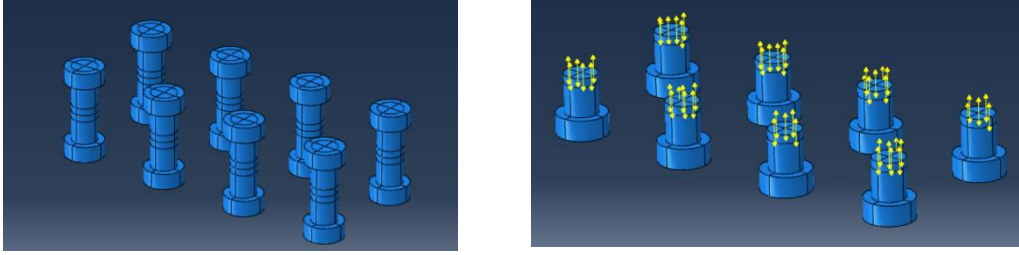
7.8 Ön Çekme Kuvvetinin Uygulanması

Birleşim modellerindeki bulonlar TBDY 2018 9.2.3.2 uyarınca, tam ön çekme kuvveti uygulanarak kullanılacaktır. Bu tip birleşimlerde bulonlara tam ön çekme kuvveti uygulanmasıyla, sürtünme katsayısına bağlı olarak, birleşen yüzeyler arasında bir sürtünme kuvvetinin oluşması sağlanır. Bu yüzeyde oluşan sürtünme kuvveti aşılmadığı sürece birleşim yüzeylerinde rölatif kayma deformasyonu gerçekleşmez.

TBDY 2018 9.2.3.2 uyarınca, bu tür birleşimlerde yüksek dayanımlı bulonların kullanılması gerekmektedir. Bulonlara uygulanan ön çekme kuvveti için ÇYTHYE 2018 Tablo 13.6 esas alınmıştır.

Bulonlara ön çekme kuvveti şantiyede montaj aşamasında genellikle ayarlı tork anahtarları kullanılarak uygulanmaktadır. Bu işlem ABAQUS yazılımında bulonların

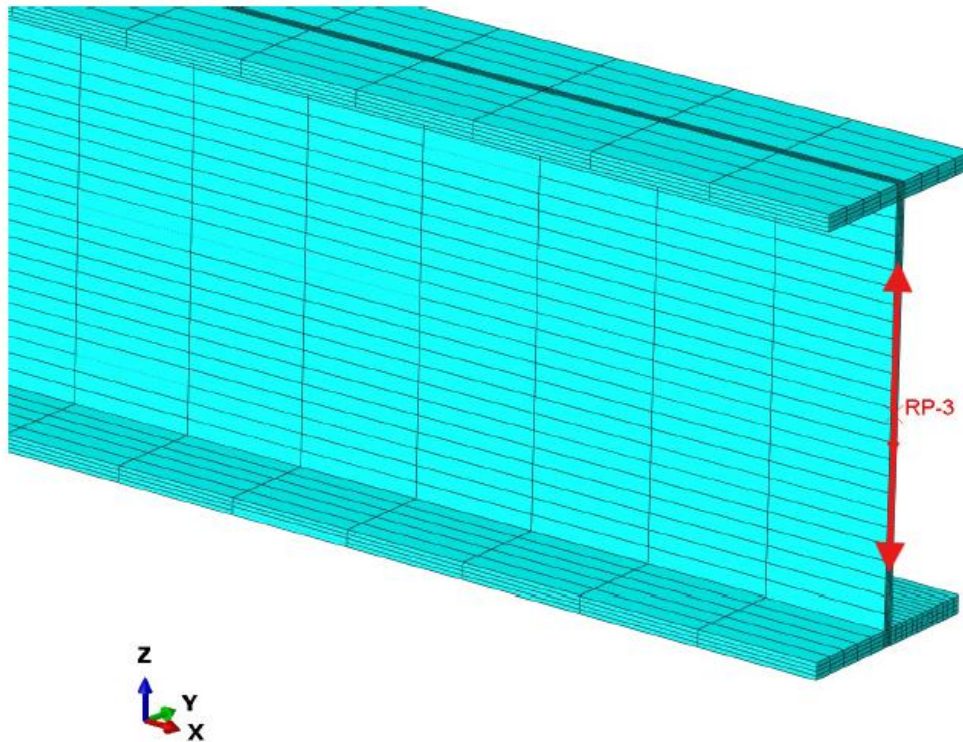
merkez enkesitine çekme kuvvetinin “Bolt Load” komutuyla uygulanmasıyla temsil edilmiştir (Şekil 7.48).



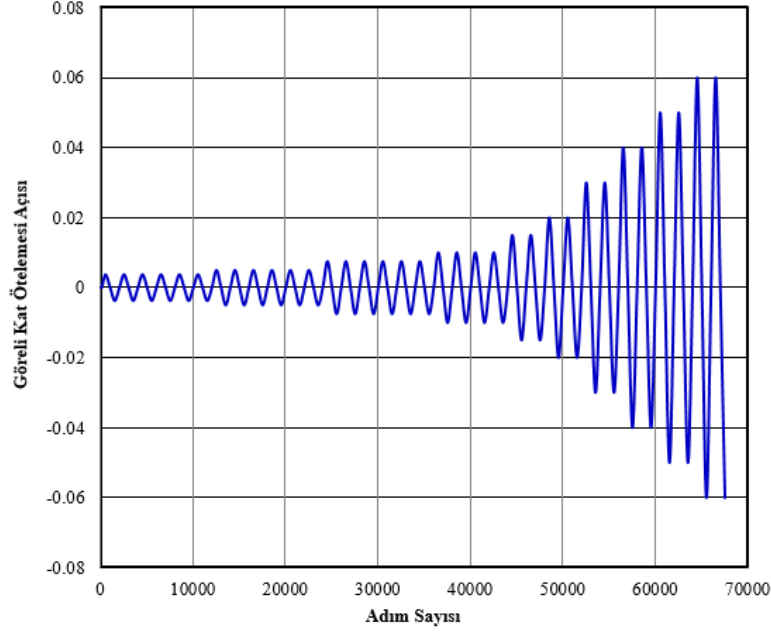
Şekil 7.48 : Bulonların merkez enkesitine çekme kuvvetinin uygulanması.

7.9 Tekrarlı Yük Protokolü

AISC 341-22 Bölüm K2b.4’te tanımlanan yük protokolü birleşim modellerinde kiriş uçlarına yer değiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır (Şekil 7.49). Yükleme değerleri analizler için %6 görelî kat öteleme açısına kadar elde edilmiştir.



Şekil 7.49 : AISC 341-22 Bölüm K2b.4’te tanımlanan yük protokolü ve yüklemenin uygulanması.

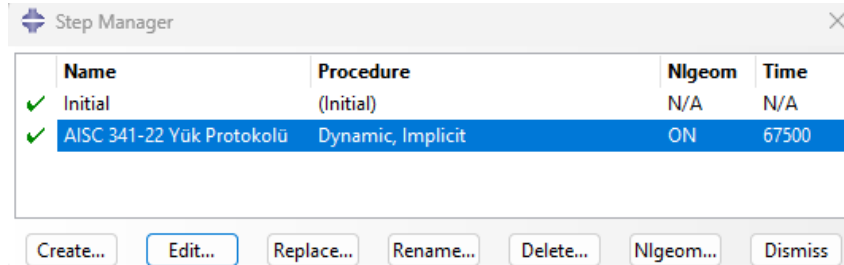


Şekil 7.49 (devam): AISC 341-22 Bölüm K2b.4’te tanımlanan yük protokolü ve yüklemenin uygulanması.

7.10 Analiz Adımları

Birleşim modellerinin sonlu eleman analizleri için ABAQUS yazılımında temel olarak iki analiz adımı oluşturulmuştur. Mesnet tanımları, malzeme modelleri, eleman tipleri, sonlu eleman ağının uygulanması gibi modellerle ilgili temel özellikler başlangıç adımında (initial step) tanımlanarak analizin diğer adımları için hazır hale getirilir.

Yükleme protokolü, %6 görel kat öteleme açısına karşı gelen artım sayısı olan 67500 artımla ikinci adımda uygulanacaktır. Bulonlu birleşimlerde bulon önçekme işlemi, yüklem protokolünün öncesinde aynı adım içerisinde uygulanmaktadır (Şekil 7.50).



Şekil 7.50 : Modellerdeki analiz adımları.

Analizler, ABAQUS yazılımında yer alan “Dynamic, Implicit” analiz türü ve ABAQUS/Standard çözücüsü kullanılarak zaman tanım alanında (direct integration)

dinamik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, yüklemenin göreceli olarak yavaş gerçekleştiği ve atalet etkilerinin sınırlı olduğu durumları temsil eden “quasi-static” (yarı-statik) yaklaşım kapsamında uygulanmıştır. Çözüm sürecinde, doğrusal olmayan denklem sistemlerini çözmek için “Full Newton-Raphson yöntemi” tercih edilmiştir. Sünek malzeme davranışı içeren hasar modelleri kullanıldığında, malzeme Jacobian matrisi genellikle simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu durum, çözüm algoritmasının yakınsama davranışını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, ABAQUS yazılımının çözüm seçenekleri arasında yer alan ve simetrik olmayan sistem matrislerinin çözümüne olanak tanıyan “unsymmetric matrix solver” seçeneği, çözüm kararlılığını artırmak ve yakınsama problemlerini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

7.11 Çevrimsel Eğriler

AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a) uyarınca, süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerde yer alan kiriş-kolon birleşimlerinin, 0,04 rad göreceli kat öteleme açısında kolon yüzündeki eğilme momenti dayanımı, kirişin plastik eğilme momenti kapasitesinin %80’inde ($0,80M_p$) daha küçük olmamalıdır. Diğer bir deyişle, dayanım kaybı $0,20M_p$ değerini aşmamalıdır. Bu durum, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz sonuçları kullanılarak, kolon ucundaki normalize moment (M/M_p) ile göreceli kat öteleme açısı arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel eğriler üzerinden değerlendirilmiştir. Normalize eğilme momenti (M/M_p), kolon ucundaki eğilme oluşan eğilme momentinin (M), kiriş plastik eğilme momenti kapasitesine (M_p) bölünmesiyle elde edilmiştir. M_p değeri, beklenen akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranının (R_y) dikkate alınmasıyla $M_p = R_y F_y$ şeklinde hesaplanmıştır.

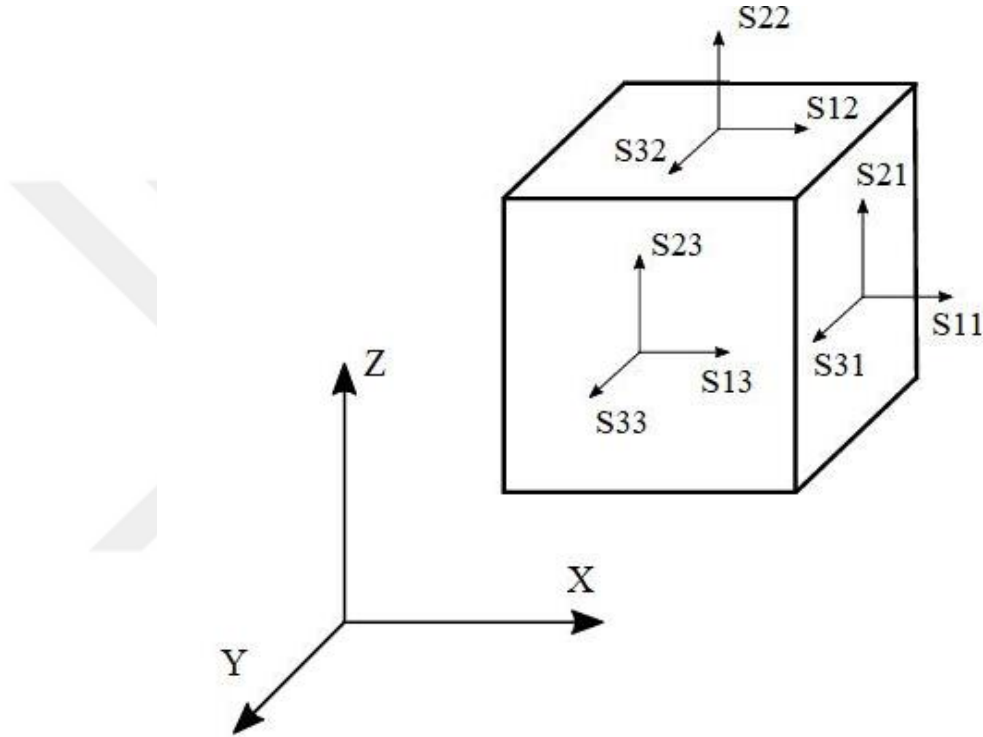
7.12 Kritik Bölgelerde Gerilme Dağılımları ve Yığılmaları

ABAQUS yazılımındaki analiz çıktılarında katı elemanlar için varsayılan olarak 6 (altı) bileşenli simetrik Cauchy gerilme tensörü global koordinat sistemine göre verilmektedir.

- $S_{11} \rightarrow 1$ yönünde (X) normal gerilme
- $S_{22} \rightarrow 2$ yönünde (Y) normal gerilme

- $S_{33} \rightarrow 3$ yönünde (Z) normal gerilme
- $S_{12} \rightarrow 1-2$ düzlemindeki (X-Y) kayma gerilmesi
- $S_{13} \rightarrow 1-3$ düzlemindeki (X-Z) kayma gerilmesi
- $S_{23} \rightarrow 2-3$ düzlemindeki (Y-Z) kayma gerilmesi

Gerilme bileşenlerin notasyonları temsili bir katı eleman üzerinde global eksen takımı ile birlikte Şekil 7.51’de gösterilmektedir.



Şekil 7.51 : Gerilme bileşenleri.

Birleşim modellerinde, kaynak uygulamasının yapıldığı potansiyel yerel çatlak oluşum bölgelerinde belirlenen enkesitlerde S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{12} , S_{13} , S_{23} gerilme yayılışları incelenmiştir. Bu gerilme bileşenlerine ek olarak eşdeğer von Mises gerilme değerleri (S) de değerlendirilmiştir.

7.13 Çatlama ve Kırılma Durumları için Belirleyici İndisler

Nümerik modellemelerde plastik mafsallardaki bölgelerin çatlama ve kırılma davranışları, temsil edilmek üzere malzeme modeli içine dahil edilmemiştir. Bu bölgelerdeki çatlak oluşma olasılığını değerlendirebilmek için kırılma indisi (Rupture

Index, RI) katsayısından yararlanılmıştır (Ricles ve diğ, 2003). Kırılma indisi (RI) denklem 7.2 ile hesaplanmaktadır.

$$RI = \frac{\varepsilon_p / \varepsilon_y}{\exp(-1,5 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eff}})} \quad (7.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε_p : Plastik eşdeğer şekil değiştirme değeri (PEEQ).

ε_y : Malzemenin akma şekil değiştirme değeri.

σ_m : İzotropik basınç, MPa.

σ_{eff} : Eşdeğer (von Mises) gerilme değeri, MPa.

Hancock ve MacKenzie (1976), üç eksenli gerilme durumu için çeliğin kırılma anındaki eşdeğer plastik şekil değiştirmesi üzerine araştırmasında RI değerinin kullanılabileceğini öngörmüştür. Buna göre sünek kırılmaların başlamasına yüksek seviyedeki üç eksenli gerilmeler neden olduğu belirtilmiştir (Ricles, 2013'te belirtildiği gibi).

Üç eksenli gerilmelerin oranı (TR) izotropik basınç değerinin eşdeğer gerilme değerine oranıdır. TR oranının yüksek değerleri malzemenin kopma şekil değiştirme değerini azaltarak sünekliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle RI değerinin arttığı bölgelerde kırılma potansiyelinin daha fazla olduğu söylenebilir (Ricles ve diğ, 2003).

ABAQUS sonlu eleman programında RI indisi direkt olarak elde edilemez. ε_p , σ_m ve σ_{eff} değerlerinin ABAQUS yazılımı analiz sonuçlarından okunmasıyla, RI değeri yukarıdaki denklem 7.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

RI hesaplanırken kullanılan eşdeğer plastik şekil değiştirme değerinin malzemenin akma şekil değiştirmesine oranı plastik şekil değiştirme indisi (PEEQI) olarak tanımlanır. Bu indis yerel elastik olmayan şekil değiştirme talebinin ölçüsü olarak nitelendirilmektedir.

PEEQI tekrarlı yükler altındaki biriken plastik şekil değiştirmelerin bir göstergesidir (Kim ve diğ, 2016). PEEQI, ABAQUS yazılımı analiz sonuçlarından elde edilen PEEQ eşdeğer plastik şekil değiştirme değerinin, malzemenin akma şekil değiştirme değerine bölünmesiyle elde edilmektedir (7.3).

$$PEEQI = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p}}{\varepsilon_y} = \frac{PEEQ}{\varepsilon_y} \quad (7.3)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

ε_{ij}^p : Plastik şekil değiştirme bileşenleri.

ε_y : Malzemenin akma şekil değiştirme değeri.

$PEEQI$: Eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri, ε_p .

Kim ve diğ. (2016), deneysel ve nümerik model karşılaştırmaları yoluyla, RI ve PEEQI değerlerinin yüksek olarak elde edilmesinin çatlak oluşumu ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.



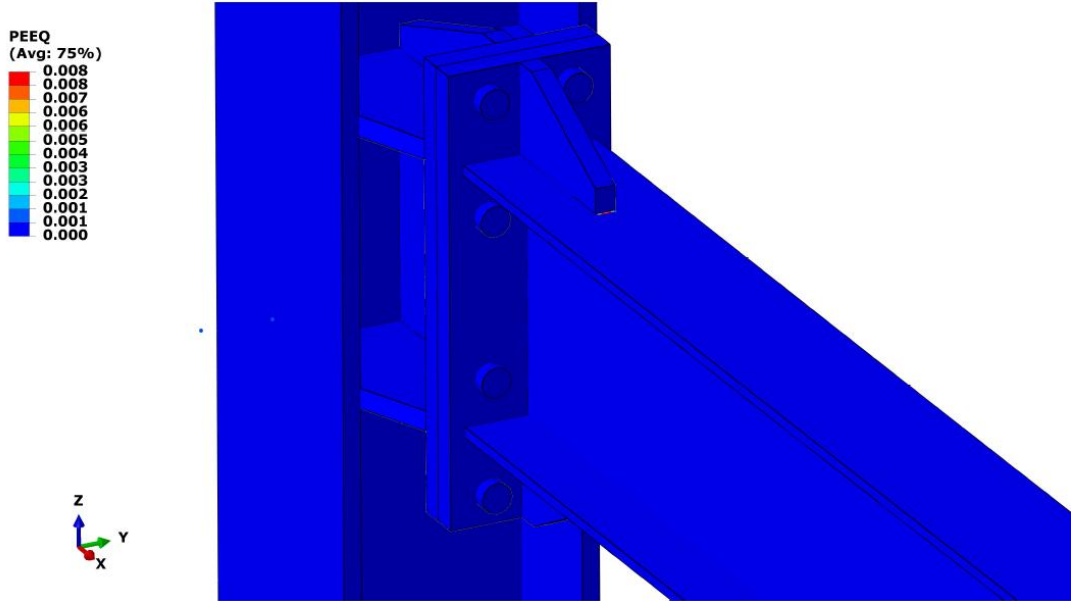
8. SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

8.1 Tam Dayanımlı Bulonlu Alın Levhali I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi

Birleşim modelinin sonlu eleman analizine ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

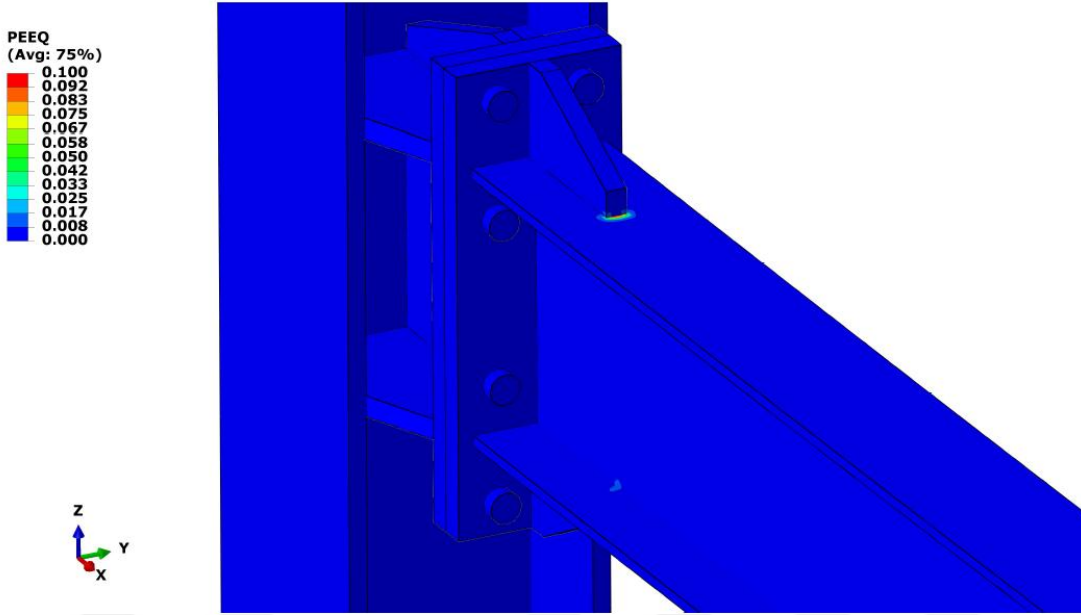
8.1.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı

%1 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, kiriş başlığı ile alın levhasının arasında yer alan rijitleştirici levhanın uç bölgesindeki kiriş enkesitinde, kiriş başlık parçasının orta kısmında plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 8.1).



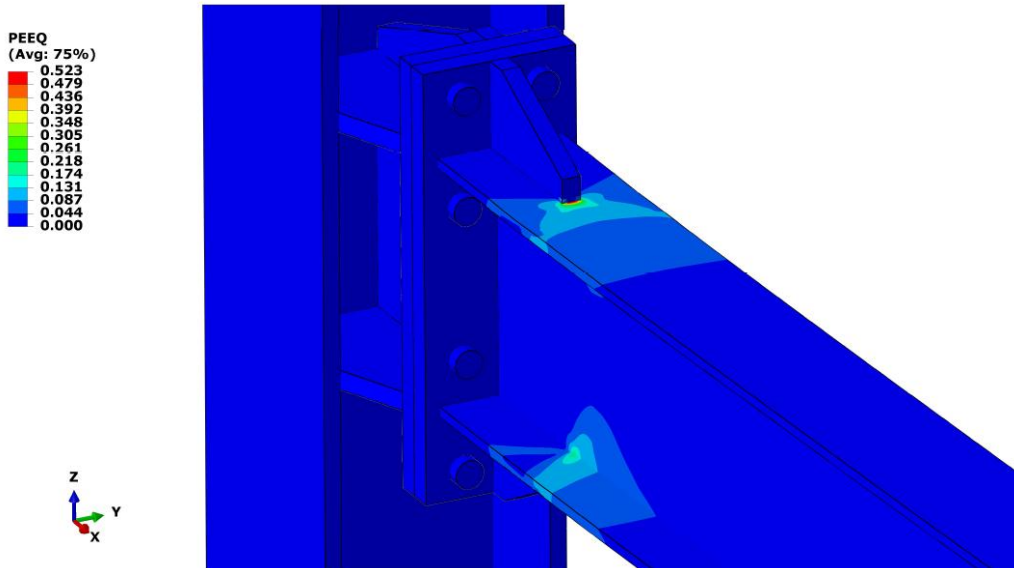
Şekil 8.1 : %1 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

%2 görel kat öteleme açısında rijitleştirici levhanın uç bölgesindeki kiriş enkesitinde plastik şekil değiştirmeler aynı bölgede sınırlı kalmakla birlikte artış göstermiştir. (Şekil 8.2).



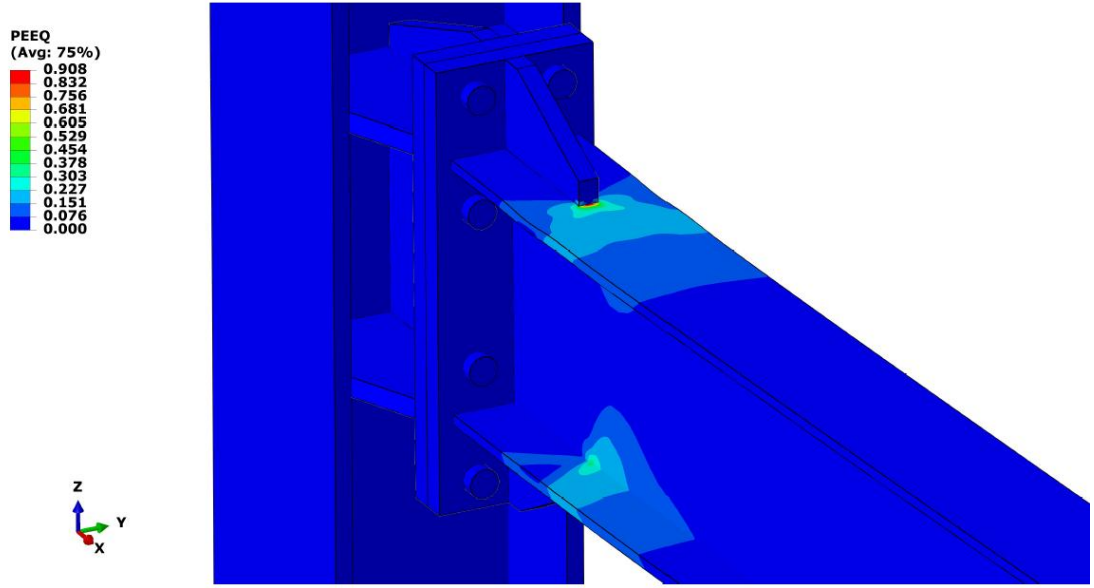
Şekil 8.2 : %2 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

%4 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değıştirmeler kiriş başlık ve gövde parçasına doğru genişlemeye devam ederek daha belirgin hale gelmeye başlamıştır. Rijitleştirici levhanın uç kısmındaki kiriş başlık parçası enkesitinin bulunduğu bölgede başlayan plastik şekil değıştirmeler, kiriş boyuna doğrultusuna doğru da yayılım göstermeye başlamıştır (Şekil 8.3).



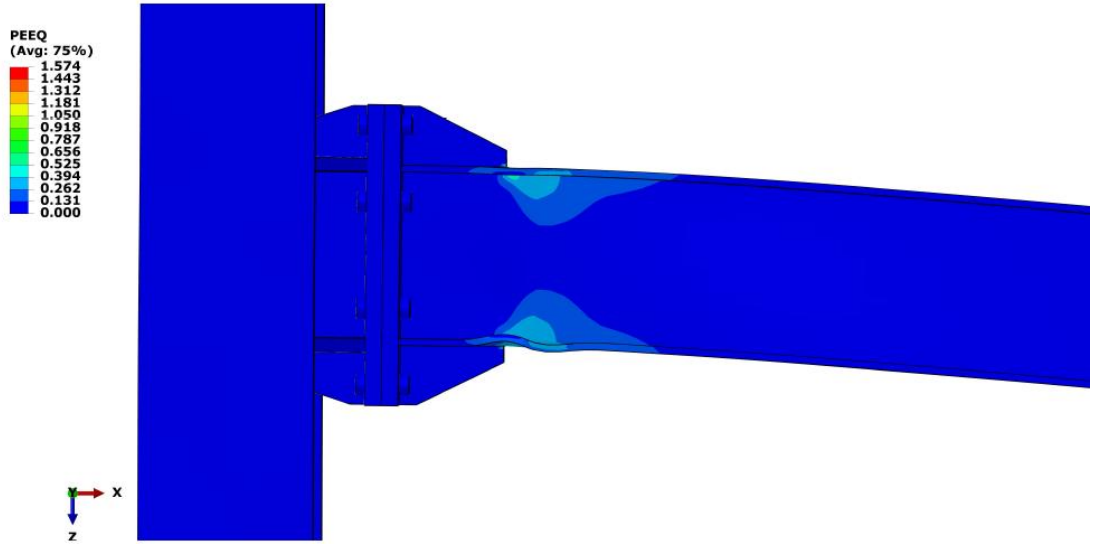
Şekil 8.3 : %4 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

Dönme, %5 görelî kat öteleme açısına geldiğinde, plastik deformasyonların artarak devam ettiğı ve başlık parçasında yerel burkulmanın başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.4).



Şekil 8.4 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

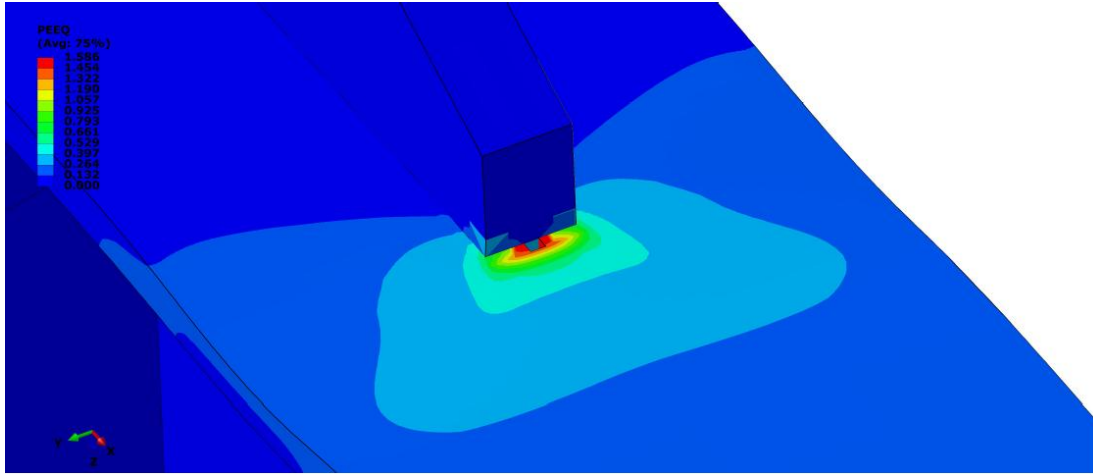
%6 görel kat öteleme açısının ilk iki döngüsü tamamlandığında, yerel burkulma etkilerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.5). Ancak, bir sonraki bölümde sunulan çevrimsel eğri incelendiğinde, yerel burkulma meydana gelmiş olmasına karşın herhangi bir dayanım kaybı gözlemlenmemiştir.



Şekil 8.5 : %6 görel kat öteleme açısında başlık yerel burkulması.

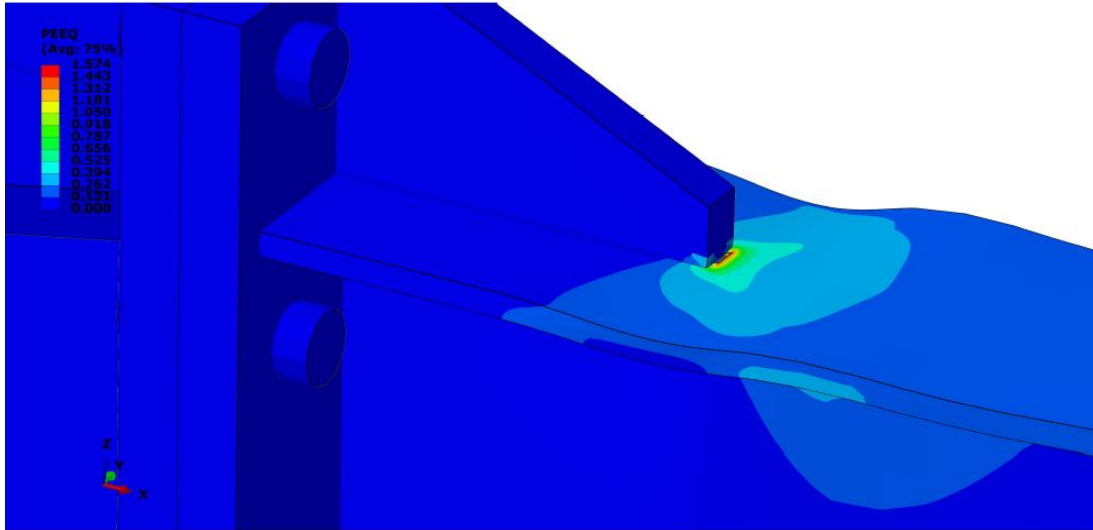
%6 görel kat öteleme açısının üçüncü döngüsünde, plastik deformasyonların artması ve hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, rijitleştirici levhanın uç bölgesindeki kiriş enkesitinde, kiriş başlık parçasının orta kısmında yer alan bazı

sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 8.6).



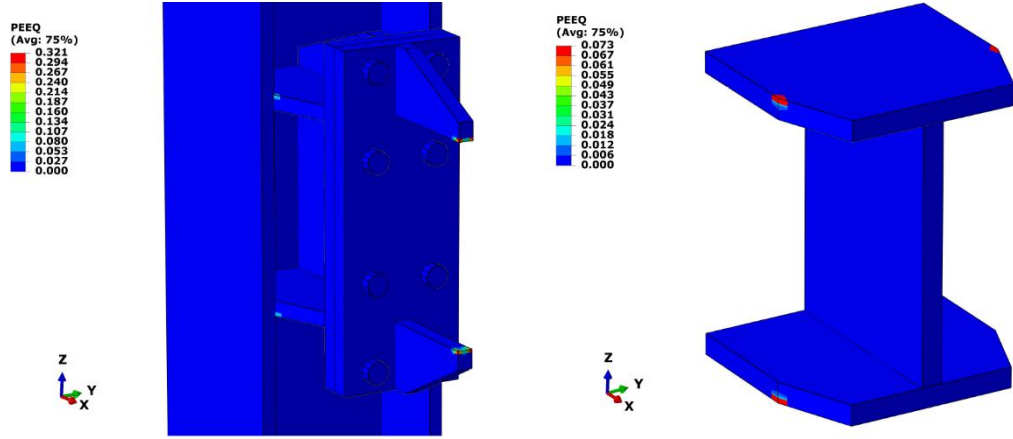
Şekil 8.6 : %6 görelî kat öteleme açısında çatlak oluşumu.

%6 görelî kat öteleme açısına ait tüm döngülerin tamamlanmasının ardından analiz sonlandırılmıştır. Son durumda, çatlakın kirişin enine doğrultusunda ilerlemeye devam ettiğî, kirişin basınç başlığında yerel burkulma deformasyonunun arttığı ve gövdesinde yerel burkulma davranışının başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7 : Analiz sonundaki plastik deformasyon dağılımı.

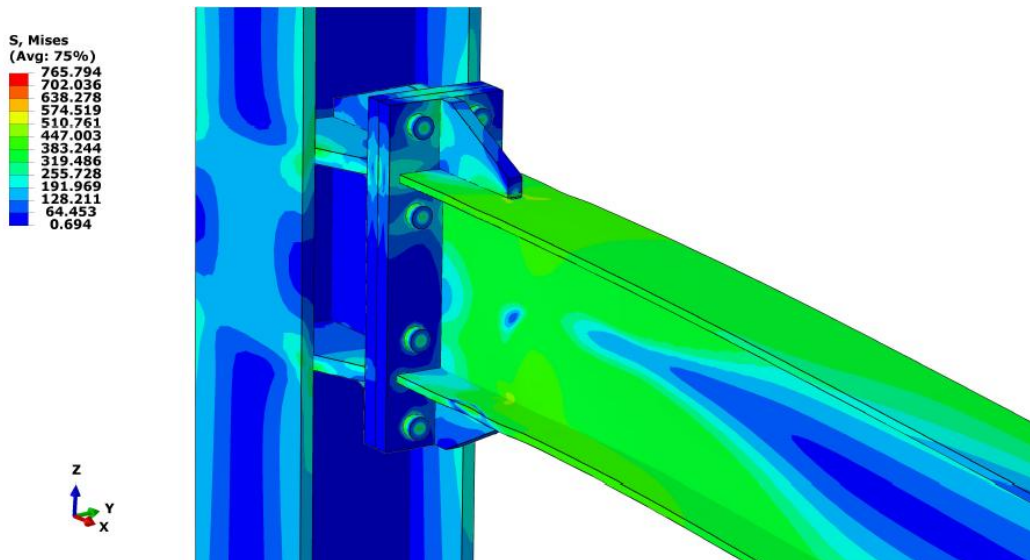
Analiz sonucunda alın levhası ve kiriş başlıkları arasında yer alan rijitleştirici levhanın uç kısmında ve kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiğî bölgede plastik deformasyonların oluştuğû gözlemlenmiştir (Şekil 8.8).



Şekil 8.8 : Rijitleştirici levha ve bağlantı levhalarında plastik deformasyonlar.

Bu bölgelerde elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değerleri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak mertebe olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsal bölgesinde PEEQ değeri 1,58 olarak belirlenmiştir. Rijitleştirici levhanın uç kısmında elde edilen PEEQ değeri, plastik mafsalda oluşan değerın %20,3'üne (0,32) karşılık gelmektedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği bölgede ise bu oran %4,6 (0,073) seviyesindedir. Bu sonuç, plastik deformasyonlarının kirişte meydana gelen plastik mafsalda yoğunlaştığını, birleşimin diğer kısımlarında ise sınırlı düzeyde plastik deformasyonun oluştuğunu göstermektedir.

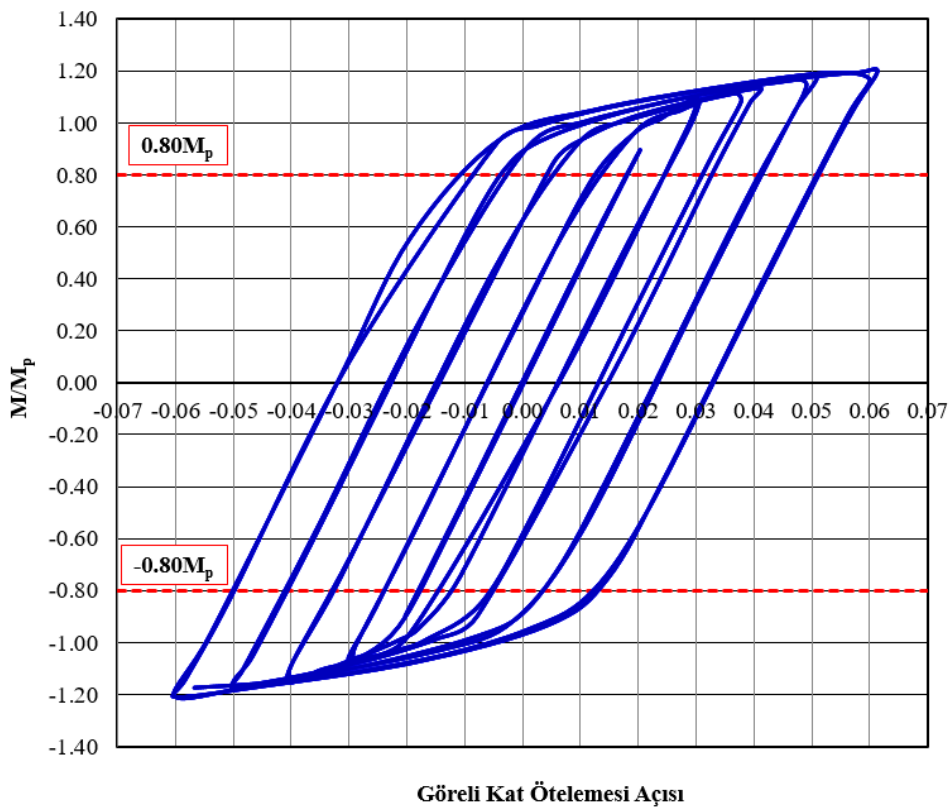
%6 görelî kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.9'da gösterilmiştir.



Şekil 8.9 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

8.1.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görelî kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %6 görelî kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.10). Sonuç olarak, tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)'da yer alan, 0,04 radyan görelî kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değerinin, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır.



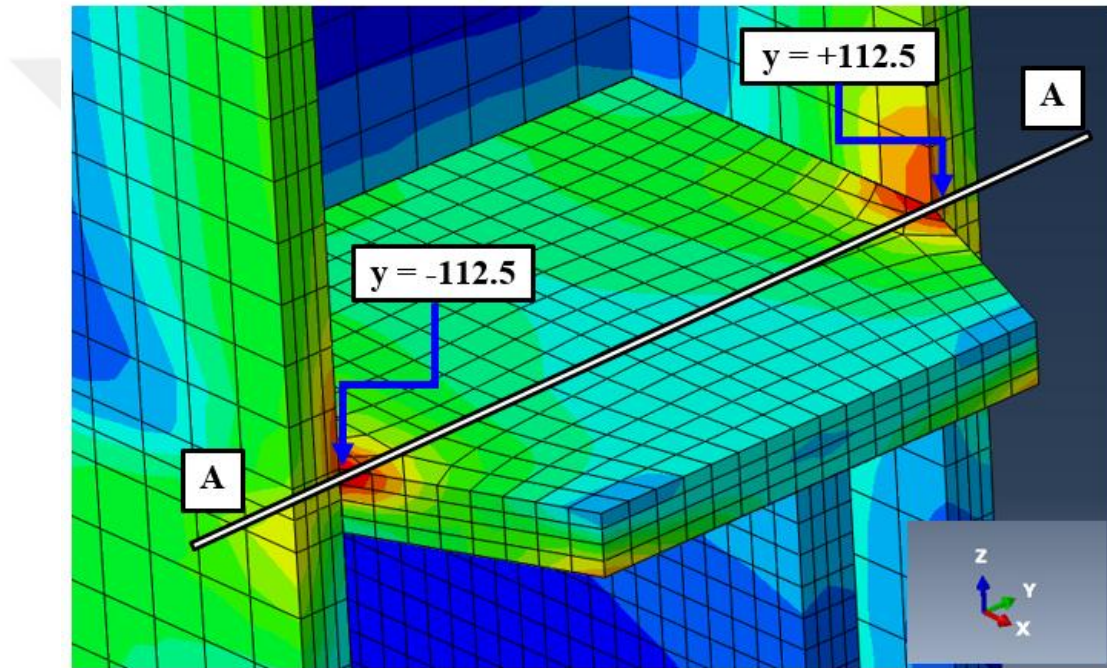
Şekil 8.10 : Çevrimsel eğri.

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, çevrimsel eğrinin formu değerlendirildiğinde, tekrarlı yükler altında oldukça iyi bir performans göstererek (yüksek dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi), eğilme momenti kapasitesi %4 görelî kat öteleme açısında kirişin plastik eğilme momenti dayanımının 1,13 katına ($1,13M_p$) ulaşmıştır.

8.1.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değeriendirilmesi

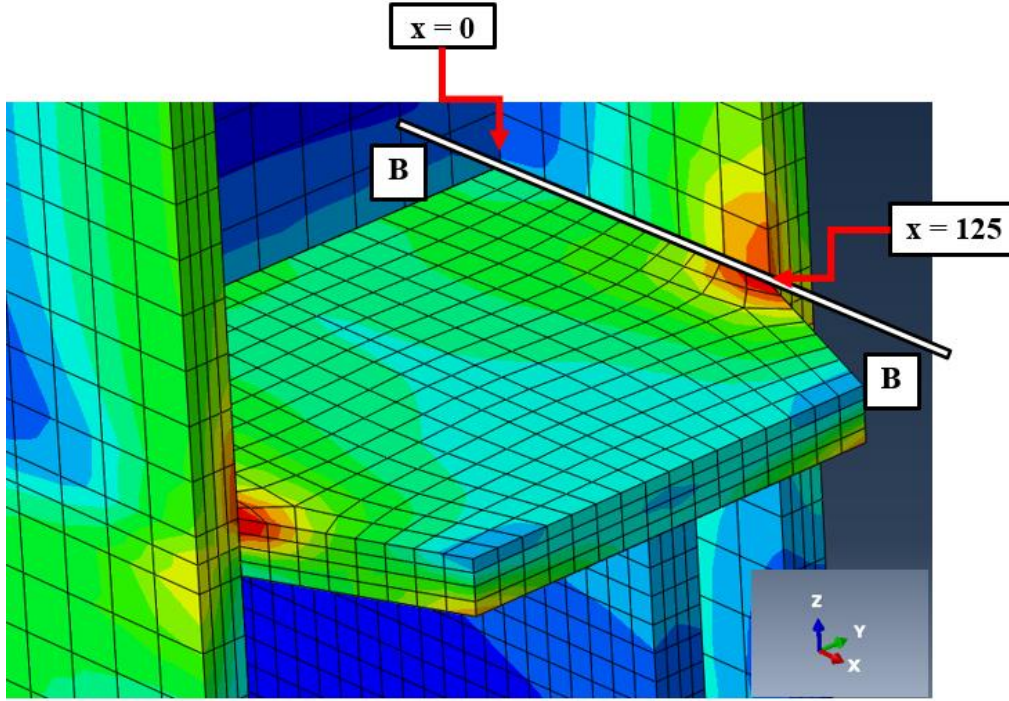
Analiz sonucunda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği ve plastik deformasyonların gözlemlendiği bölgede PEEQ ve RI indisleri değeriendirilmiştir. Bu indisler, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının üst lifinden geçtiği varsayılan A-A ve B-B olmak üzere iki enkesit boyunca hesaplanmıştır. Hesaplama da kullanılan parametreler, bu enkesitler üzerindeki elemanlara ait düğüm noktalarından elde edilmiştir.

A-A enkesiti, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kolon ucundaki enkesitinin üst lif hizasını temsil etmektedir (Şekil 8.11).



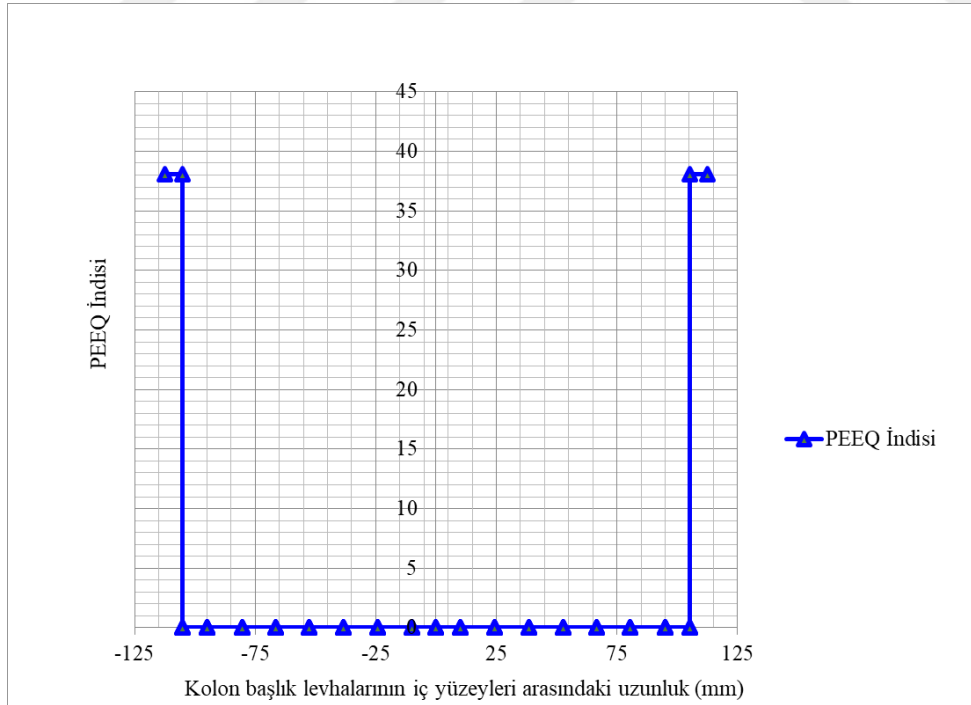
Şekil 8.11 : A-A enkesiti.

B-B enkesiti ise, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kolon başlığı ile birleştiği enkesitinin üst lif hizasını belirtmektedir (Şekil 8.12).

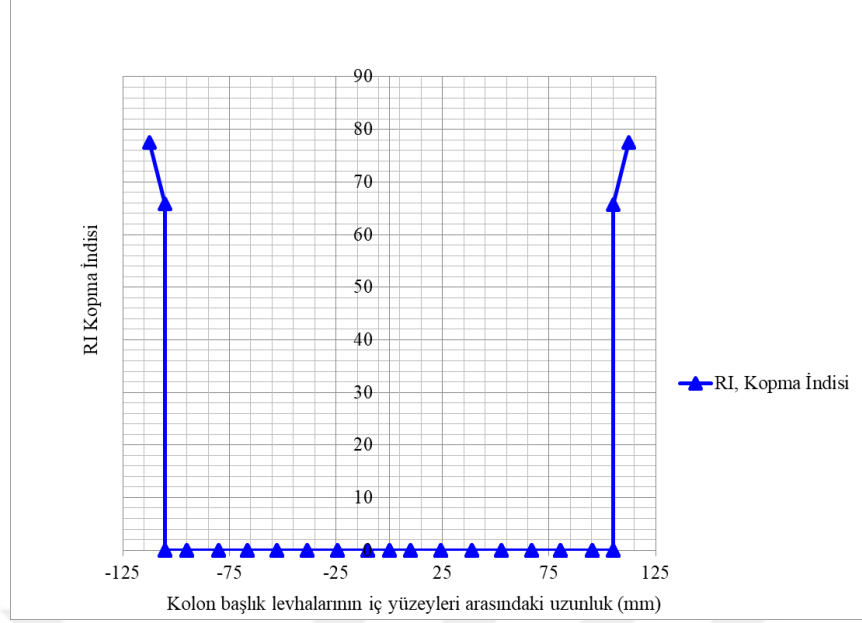


Şekil 8.12 : B-B enkesiti.

A-A enkesiti üzerinde PEEQ ve RI indisleri %6 görelî kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.13'te gösterilmiştir.



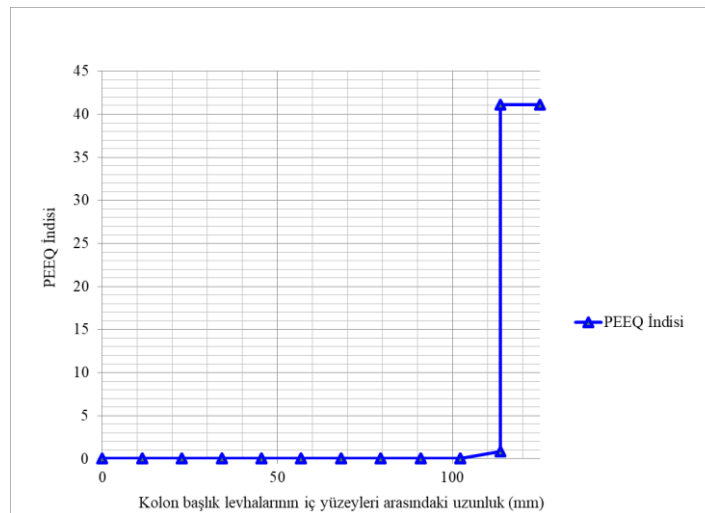
Şekil 8.13 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.



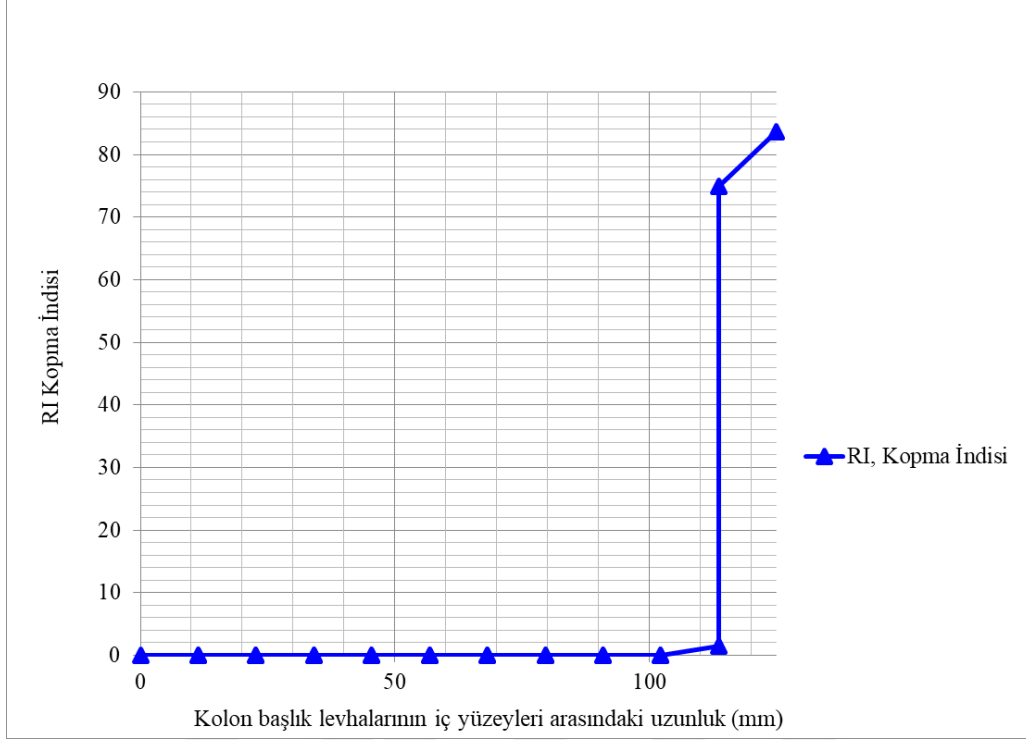
Şekil 8.13 (devam): A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.

Grafikler incelendiğinde, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kiriş ucundaki enkesitinin kolonla birleştiği bölgeler haricinde RI ve PEEQI indislerinin 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir. Levhanın kolonla birleştiği noktalarda ise indislerde ani bir artış dikkat çekmektedir. Ancak bir önceki bölümde değerlendirildiği üzere, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

B-B enkesiti üzerinde de PEEQI ve RI indisleri %6 görelî kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçlar Şekil 8.14`te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.14 : B çizgisi üzerinde PEEQI ve RI indisleri.

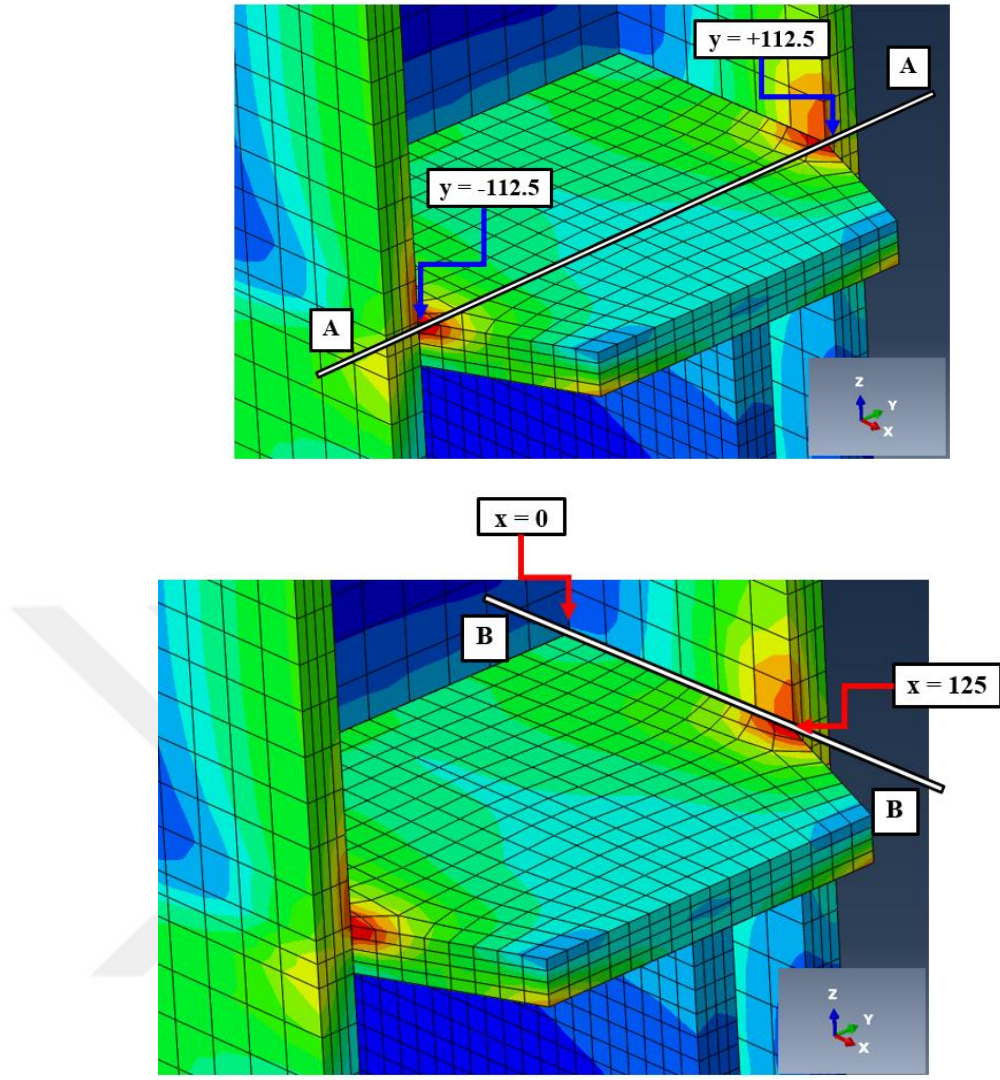


Şekil 8.14 (devam): B çizgisi üzerinde PEEQI ve RI indisleri.

B-B enkesiti dikkate alınarak elde edilen grafikler incelendiğinde, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlığı ile birleştiği enkesitin, kolon başlıklarının ucuna yakın bölgedeki noktalar haricinde, RI ve PEEQI indisleri 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir. Buna karşın, levhanın kolonla birleştiği bölgede bu değerlerde ani bir artış meydana gelmektedir. Bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşük olduğundan, A-A enkesiti için geçerli olan değerlendirme B-B enkesiti için de geçerlidir.

8.1.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirmesi

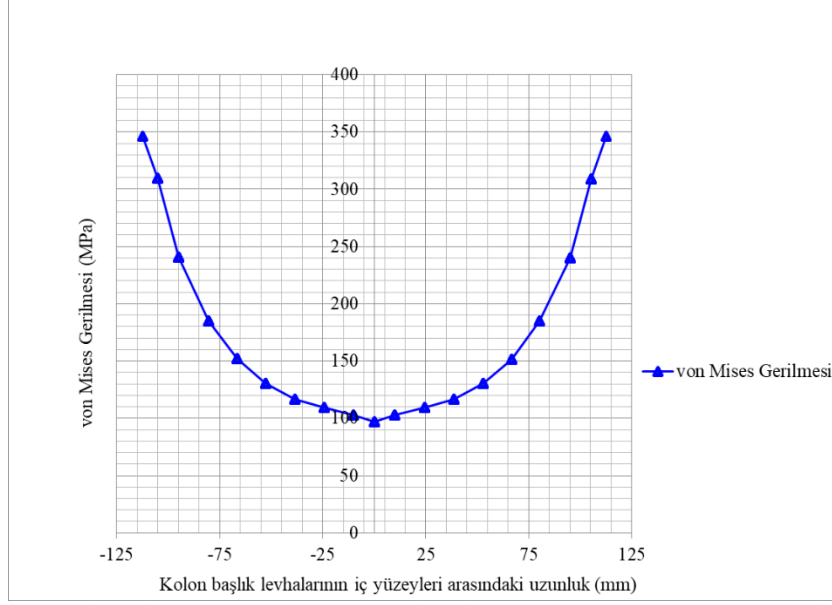
Bu bölümde daha önce belirlenen A-A ve B-B enkesitleri boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir (Şekil 8.15).



Şekil 8.15 : Gerilme dağılımının inceleneceği enkesitler.

A-A enkesiti boyunca normal ve kayma gerilmeleri ile eşdeğer von Mises gerilmesi dağılımları elde edilmiştir.

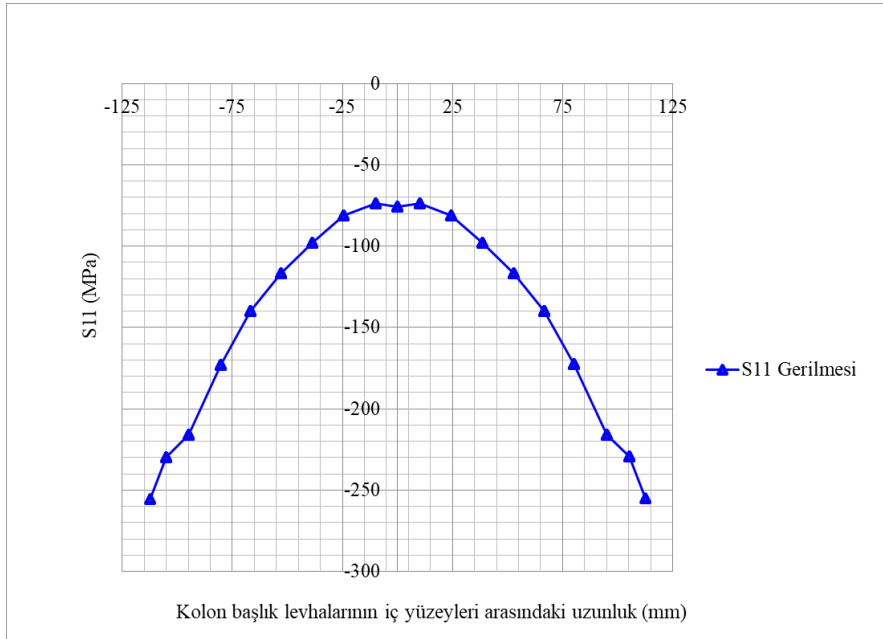
En büyük eşdeğer von Mises gerilmesi (S), bağlantı levhasının kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup 346 MPa'dır. Bu değer, ortalama gerilme değeri olan 171 MPa'nın yaklaşık 2 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise bağlantı levhasının merkezine yakın bölgelerde oluşmuş ve 97 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalamanın yaklaşık %57'sine karşılık gelmektedir. Bu dağılım, birleşimin maruz kaldığı yükleme altında plastik şekil değişiminin kenarlarda yoğunlaştığını ve gerilme dağılımının merkezden kenarlara doğru arttığını göstermektedir. Kenar bölgelerdeki yüksek von Mises gerilmesi, incelenen bağlantı levhasının plastikleşmeye en yakın bölgeleri olarak değerlendirilebilir (Şekil 8.16).



Şekil 8.16 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

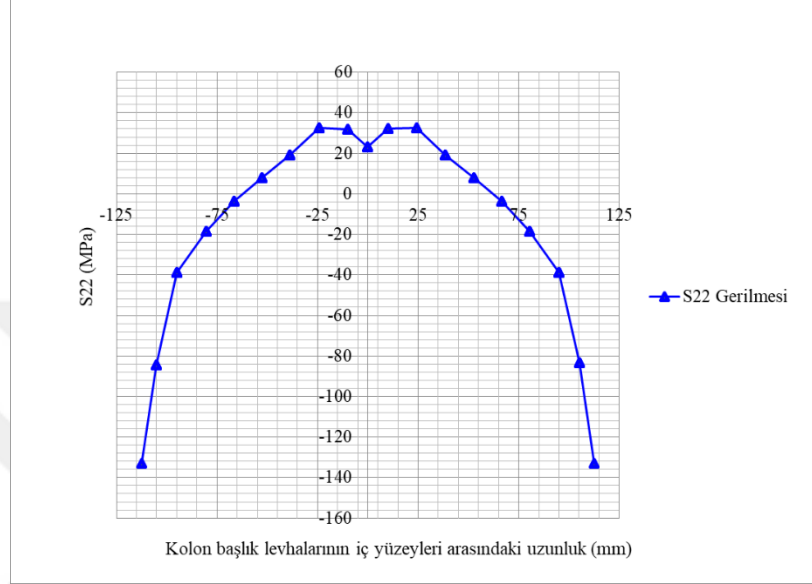
En büyük S11 gerilmesi (X eksenî doğrultusunda normal gerilme) bağlantı levhasının kenarlarında meydana gelmiştir (–256 MPa). Bu değer, ortalama gerilme büyüklüğü olan –143 MPa’nın yaklaşık 1,8 katıdır. En küçük S11 gerilmesi ise levhanın orta bölgesinde oluşmuş olup (–74 MPa), ortalama değerîn yaklaşık %52’sine karşılık gelmektedir.

Bu fark, kenarlarda gerilme yığılması yaşandığını ve orta bölgelerde daha düşük gerilmeler oluştuğunu göstermektedir (Şekil 8.17).



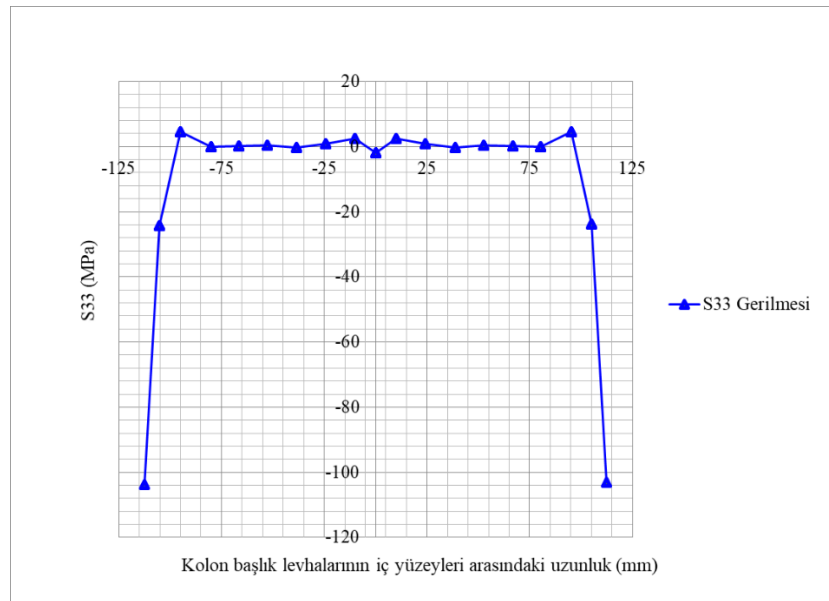
Şekil 8.17 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

En büyük S22 gerilmesi (Y eksenı doğrultusunda normal gerilme) levhanın kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup -133 MPa olarak elde edilmiştir. Levhanın orta kısmında ise 32 MPa büyüklüğünde ve zıt yönde bir gerilme oluşmuştur. Mutlak değerler dikkate alındığında, en büyük gerilme, orta bölgede oluşan gerilmenin yaklaşık 4,2 katıdır (Şekil 8.18).



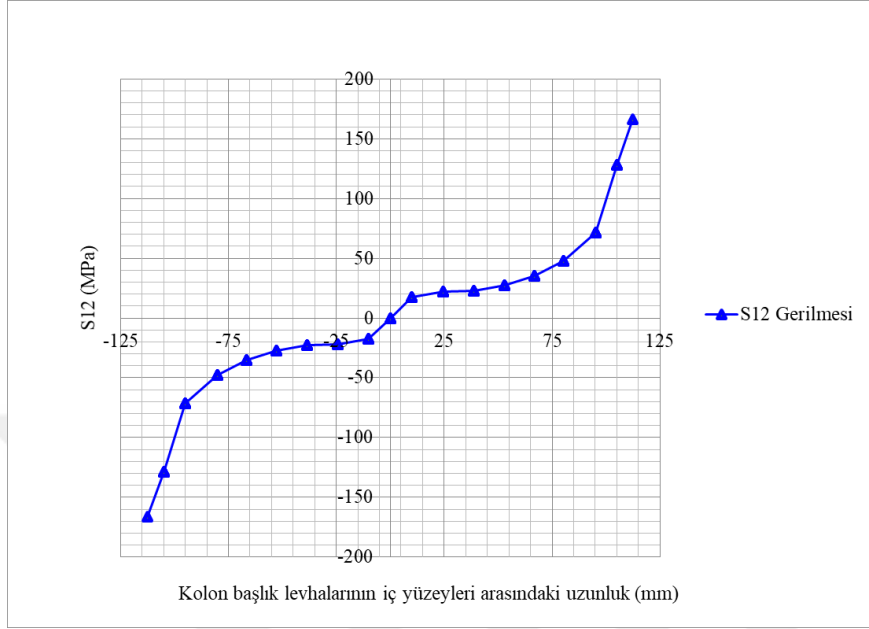
Şekil 8.18 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

En büyük S33 gerilmesi (Z eksenı doğrultusunda normal gerilme), levha kenarlarında meydana gelmiş olup -104 MPa'dır. Levhanın orta bölgelerinde ise gerilme değeri sifıra yakın olarak elde edilmiştir (Şekil 8.19).



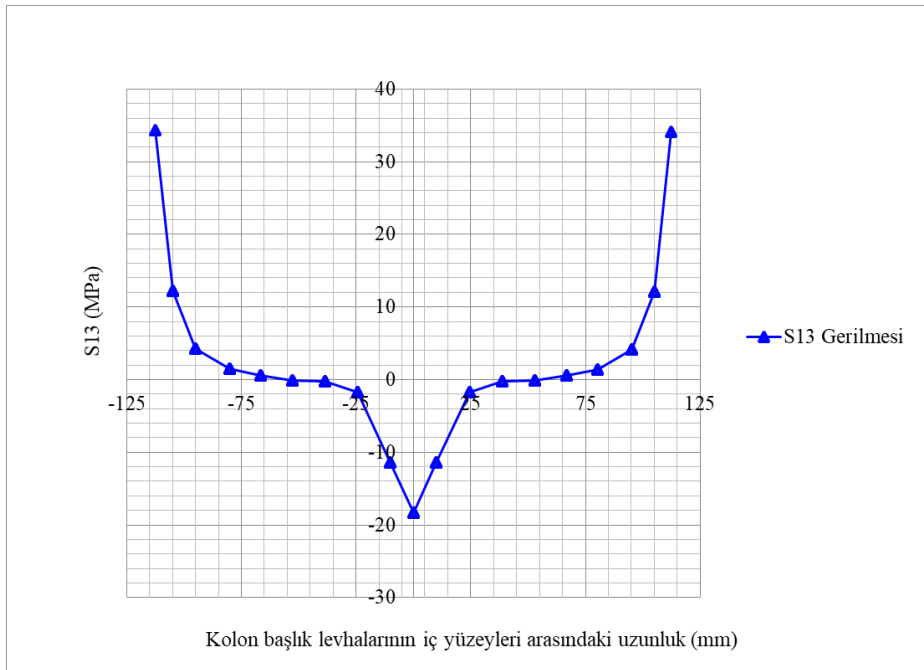
Şekil 8.19 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

En büyük S12 gerilmesi (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), bağlantı levhasının kenarlarında 166 MPa olarak elde edilmiştir. Levhanın orta bölgelerinde ise gerilme değerinin sıfıra yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8.20).



Şekil 8.20 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

S13 gerilme bileşeninde (X-Z düzleminde kayma gerilmesi), en büyük değer levha kenarlarında 34 MPa olarak belirlenmiştir. Levhanın orta bölgelerinde ise gerilme, kenarlarda elde edilene zıt yönde ve -18 MPa seviyesindedir (Şekil 8.21).



Şekil 8.21 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

S23 gerilme bileşeni (Y–Z düzleminde kayma gerilmesi) için en yüksek değer levha kenarlarında 67 MPa olarak okunmuştur. Levhanın geri kalan bölgelerinde ise S23 gerilme değeri sıfıra yakın seviyelerde elde edilmiştir (Şekil 8.22).

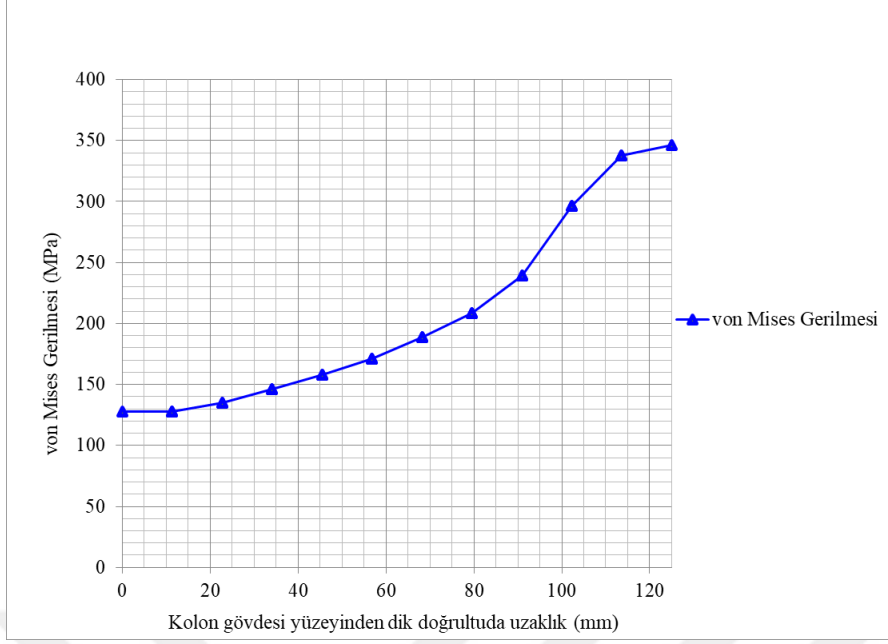


Şekil 8.22 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, levha boyunca simetrik bir gerilme dağılımının meydana geldiği, kiriş başlıkları hizasındaki başlık bağlantı levhalarının kolon başlıklarının uçlarıyla birleştiği bölgelerde gerilme yığılması yaşandığı ve levhaların orta bölgelerinde, kenar kısımlara kıyasla çok daha düşük gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, levha merkezine göre genel bir simetri eğilimi sergilemesi, plastik deformasyonların plastik mafsallarda simetrik şekilde yayılması ve kirişte meydana gelen çatlak oluşumunun merkezden kenarlara doğru dengeli biçimde ilerlemesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

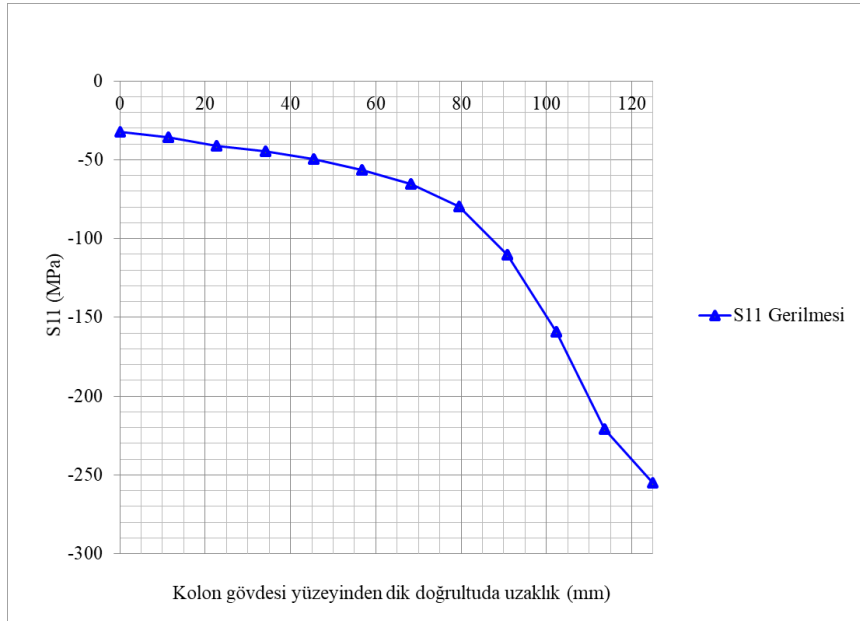
B-B enkesiti boyunca normal ve kayma gerilmeleri ile eşdeğer von Mises gerilmesi dağılımı elde edilmiştir.

En büyük, ortalama ve en küçük eşdeğer von Mises gerilmeleri sırasıyla, 346 MPa, 127,6 MPa ve 204 MPa olarak elde edilmiştir. En büyük değer, ortalamanın yaklaşık 1,70 katı; minimum değer ise ortalamanın yaklaşık %63'ü kadardır. Bu fark, bağlantı levhasının kolon ucu kısmında gerilme yığılması meydana geldiğini ve orta bölgelerde daha düşük gerilmeler oluştuğunu göstermektedir (Şekil 8.23).



Şekil 8.23 : B-B enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

En büyük S11 gerilmesi, kolon başlığının uç kısmında meydana gelmiş olup -255 MPa'dır. En küçük gerilme, kolon gövdesi yüzeyine en yakın noktada oluşmuş ve -33 MPa olarak elde edilmiştir. Ortalama S11 gerilmesi -92 MPa olup, en büyük değer ortalamanın yaklaşık 2,8 katıdır; en küçük değer ise ortalamanın yaklaşık %36'sına karşılık gelmektedir. Bu durum, kolon yüzü ile kolon ucu arasında önemli bir gerilme farkı oluştuğunu göstermektedir (Şekil 8.24).



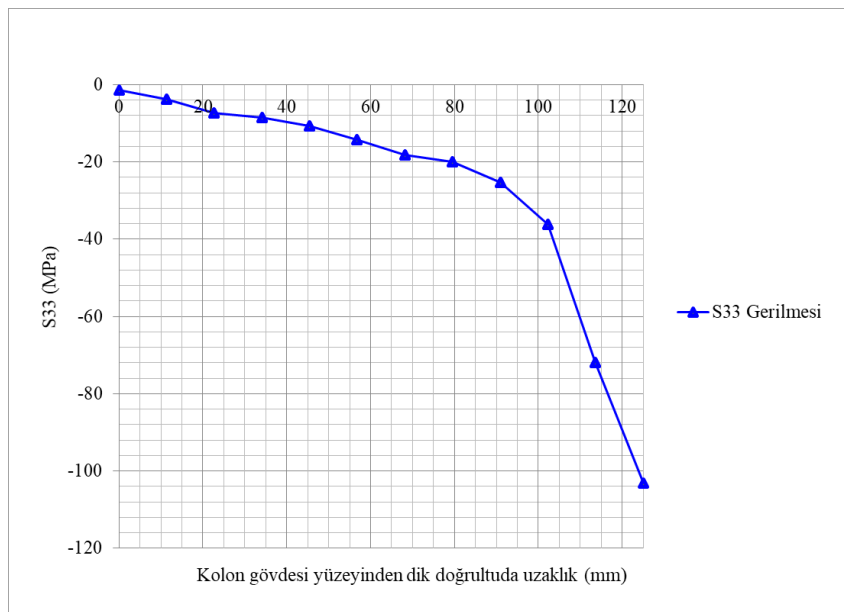
Şekil 8.24 : B-B enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

En büyük S22 gerilmesi -133 MPa, en küçük değer ise $-6,9$ MPa olarak elde edilmiştir. Ortalama gerilme -36 MPa'dır. En büyük gerilme ortalamasının yaklaşık 3,7 katıdır; en küçük gerilme ise ortalamasının yaklaşık %19'u seviyesindedir (Şekil 8.25).



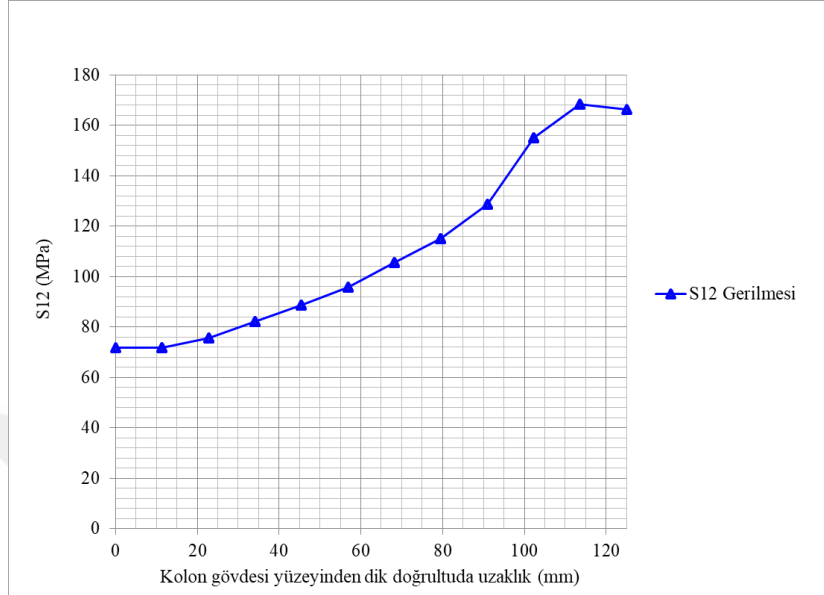
Şekil 8.25 : B-B enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

S33 gerilme bileşeni için kolon gövdesine yakın bölgelerde gerilme değeri yaklaşık 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir. En büyük gerilme değeri ise kolon başlık ucunda oluşmuş olup -103 MPa'dır. Ortalama gerilme -24 MPa'dır. Bu durumda, en büyük değer ortalamasının yaklaşık 4,2 katıdır (Şekil 8.26).



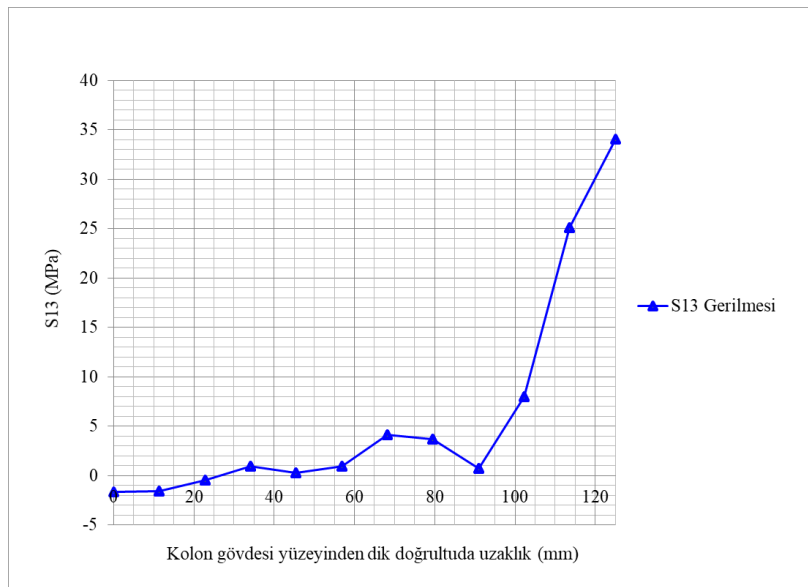
Şekil 8.26 : B-B enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

Maksimum S12 kayma gerilmesi 168 MPa, minimum değer ise 72 MPa olarak belirlenmiştir. Ortalama değer 110 MPa'dır. Maksimum gerilme ortalamasının yaklaşık 1,5 katı, minimum değer ise ortalamasının yaklaşık %65'i düzeyindedir (Şekil 8.27).



Şekil 8.27 : B-B enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

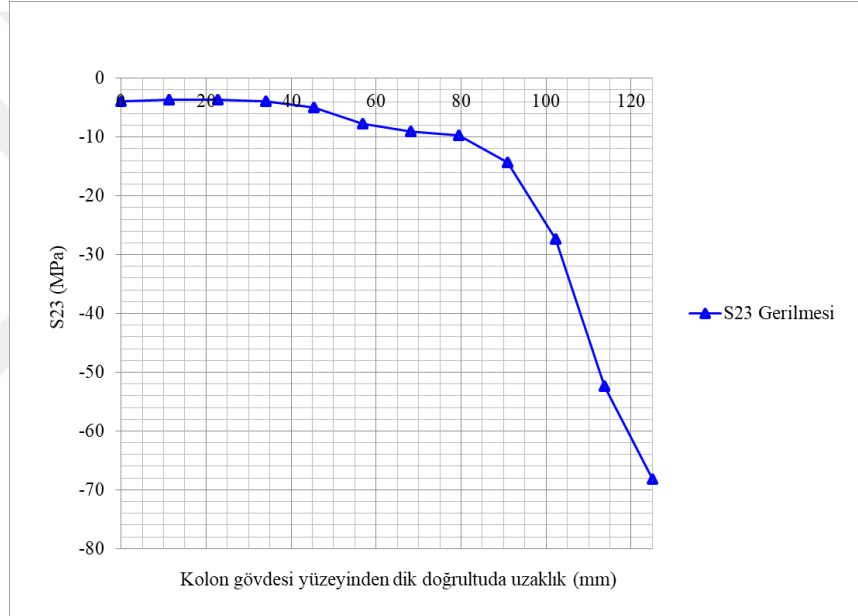
En büyük S13 kayma gerilmesi 34 MPa, en küçük değer ise -1 MPa seviyesindedir. Ortalama S13 gerilmesi 5,3 MPa'dır. En büyük değer, ortalamasının yaklaşık 6,4 katıdır. S13 kayma gerilmelerinin A-A enkesitinde, kolon gövdesinden başlık ucuna doğru büyük oranda -2 MPa ile 5 MPa arasında dağıldığı, enkesit ucunda ise ani şekilde arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.28).



Şekil 8.28 : B-B enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

En büyük S23 gerilmesi -68,2 MPa olarak elde edilmiştir. Ortalama -15,7 MPa'dır. En küçük değer (-3,7 MPa) ortalamanın yaklaşık 4,35 katıdır. Bu dağılım, özellikle Y-Z düzleminde levhanın köşe bölgelerinde yüksek kayma gerilmelerinin oluştuğunu göstermektedir. S13 kayma gerilmeleriyle benzer şekilde, gerilmelerin A-A enkesitinin kolon gövdesinden ucuna doğru olan büyük bir kısmında düzenli olarak yayıldığı ardından enkesitin uç kısmında keskin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

En büyük S23 kayma gerilmesi -68 MPa olarak elde edilmiştir. Ortalama değer -16 MPa, en küçük değer ise -3,7 MPa'dır. En büyük gerilme, ortalamanın yaklaşık 4,3 katıdır. Bu dağılım, özellikle Y-Z düzleminde levhanın kolon ucunda yer alan kısmında yüksek kayma gerilmeleri oluştuğunu göstermektedir (Şekil 8.29).



Şekil 8.29 : B-B enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

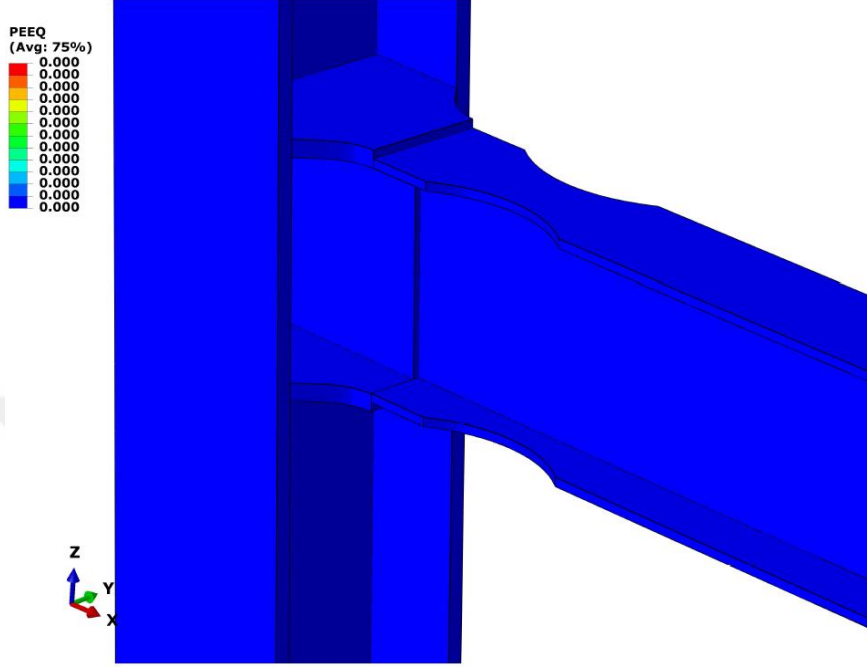
Sonuç olarak, B-B enkesitindeki gerilme yayılışları incelendiğinde, kiriş başlığı hizasındaki bağlantı levhasının kolon başlığı ile birleştiği enkesitte, kolon gövdesi yüzünden kolon ucuna doğru gittikçe kayma ve normal gerilmelerin arttığı gözlemlenmiştir.

8.2 Kaynaklı Azaltılmış I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi

Birleşim modelinin sonlu eleman analizine ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

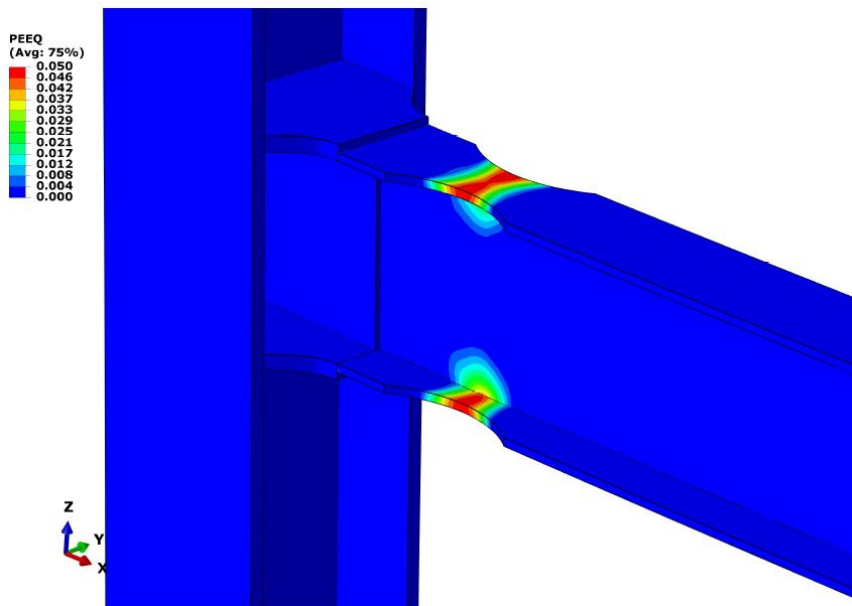
8.2.1 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi

%1 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirme meydana gelmemiştir (Şekil 8.30).



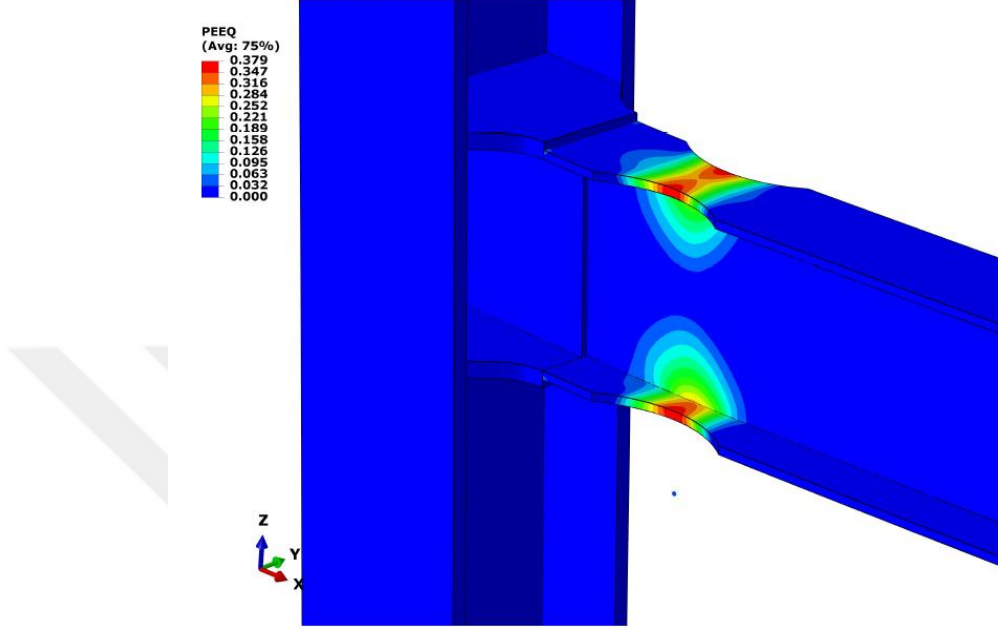
Şekil 8.30 : %1 görel kat öteleme açısında model görünüşü.

%2 görel kat öteleme açısında azaltılmış kiriş enkesitinin orta kısmında, kiriş başlığında oluşmaya başlayan plastik şekil değiştirmeler, kiriş gövdesine doğru yayılmaya başlamıştır (Şekil 8.31).



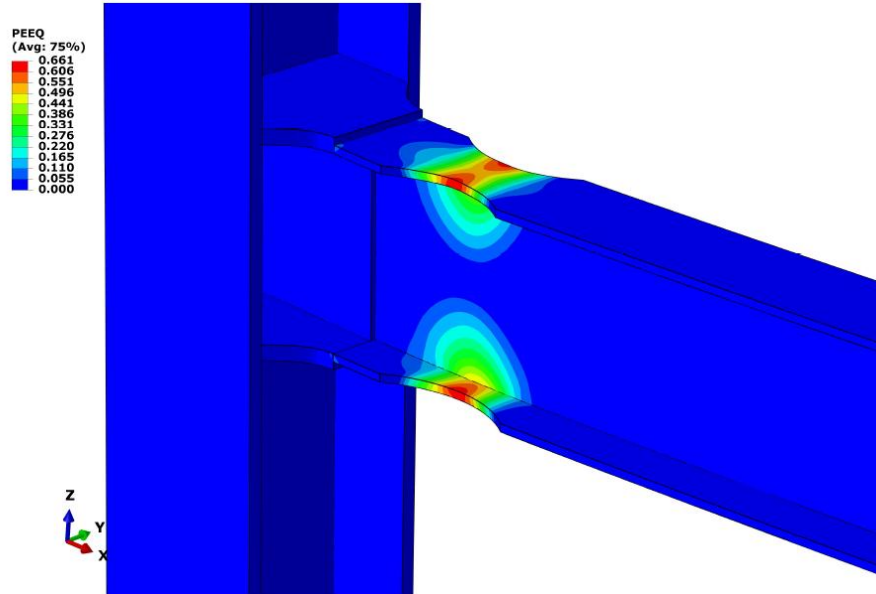
Şekil 8.31 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

%4 görel kat öteleme açısında, plastik şekil değıştirmeler kiriş başlıkları ve gövdesinde genişlemeye devam etmiş ve daha belirgin hale gelmeye başlamıştır. Plastik şekil değıştirmelerin, kirişlerin başlığında yer alan zayıflatılmış bölgenin büyük bir kısmına yayıldığı tespit edilmiştir (Şekil 8.32).



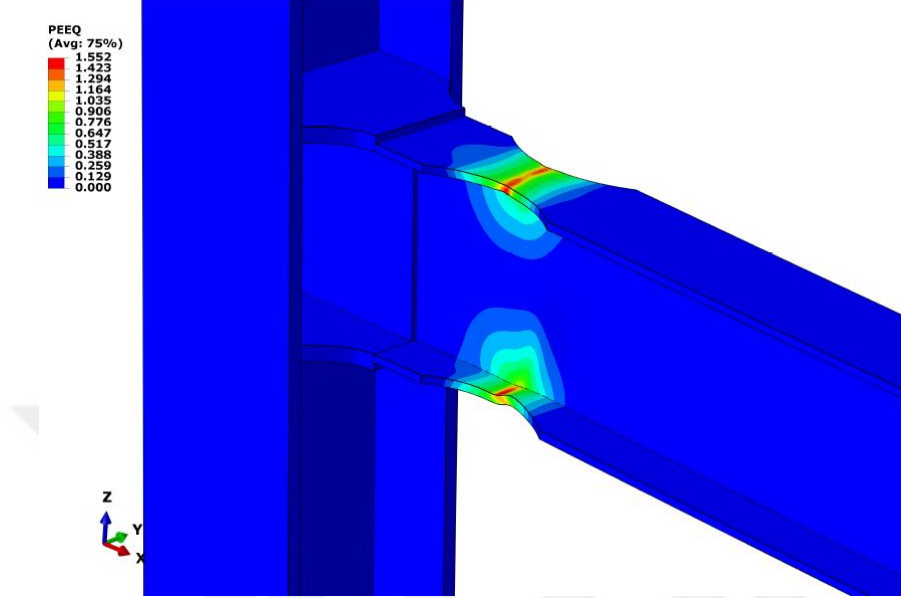
Şekil 8.32 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

Analiz %5 görel kat öteleme açısına gelindiğinde plastik deformasyonların mertebesinin artmaya devam ettiği gözlemlenmiştir (Şekil 8.33).



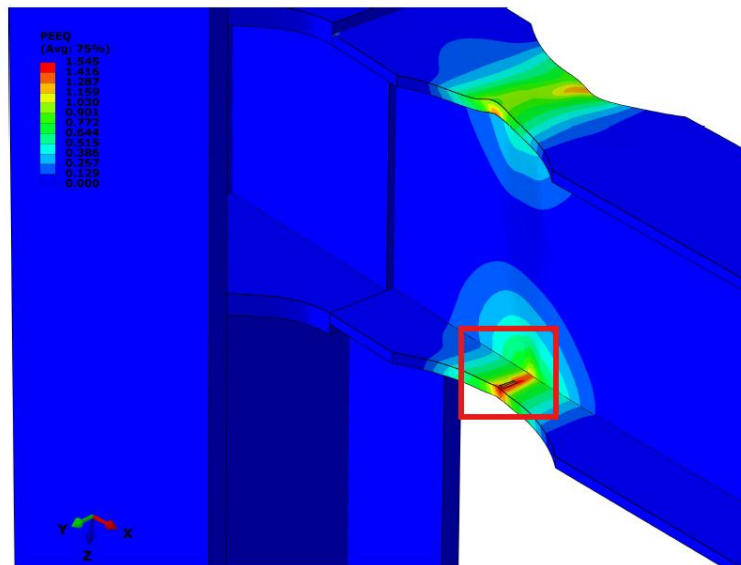
Şekil 8.33 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

%6 görel kat öteleme açısının ilk iki döngüsü tamamlandığında, kiriş başlıkları ve gövdesinde yerel burkulma davranışının meydana gelmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.34).



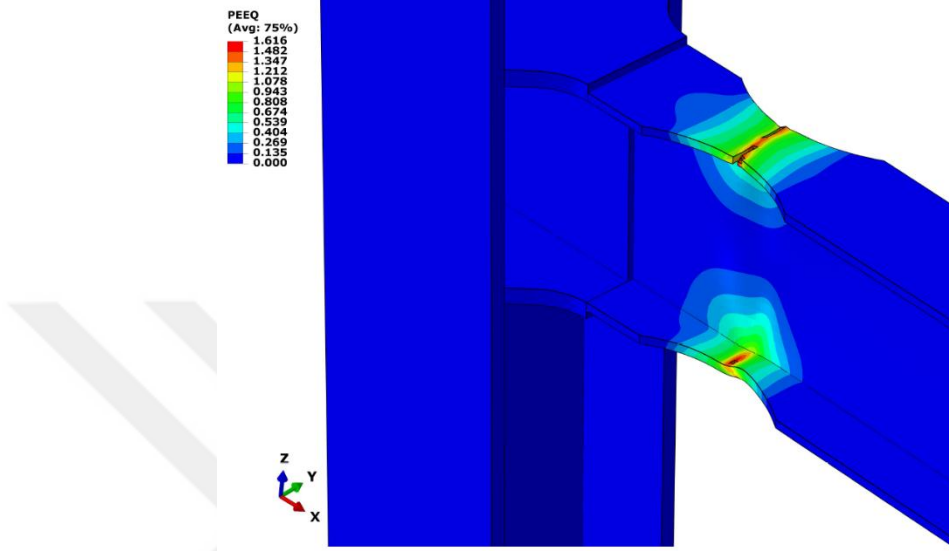
Şekil 8.34 : %6 görel kat öteleme açısında başlık yerel burkulma deformasyonu.

%6 görel kat öteleme açısının üçüncü döngüsünde, yerel burkulma etkilerinin artması ve plastik deformasyonların hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşmasıyla birlikte, kiriş başlığında, azaltılmış kiriş enkesitinde yer alan bazı sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun başladığını işaret etmektedir (Şekil 8.35).



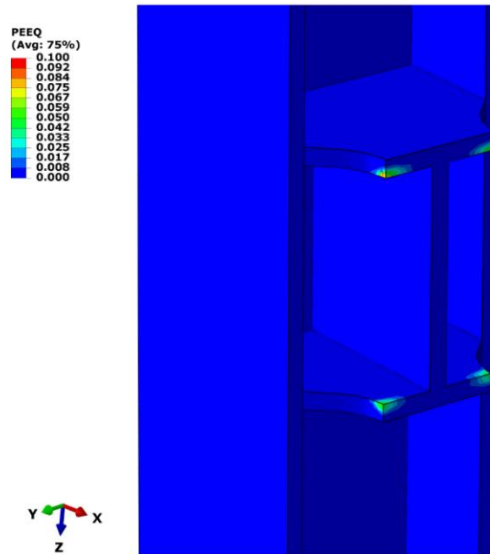
Şekil 8.35 : %6 görel kat öteleme açısında çatlak oluşumu.

%6 görelî kat öteleme açısına karşılık gelen son yükleme döngüsünde analiz sonlandırılmıştır. Bu adımda, kiriş başlığındaki çatlağın enine doğrultuda ilerlemeye devam ederek kırılma noktasına yaklaştığı ve gövdeye doğru yayıldığı; ayrıca, kirişin basınç başlığı ile gövdesinde yerel burkulma seviyesinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.36).



Şekil 8.36 : %6 görelî kat öteleme plastik deformasyonları.

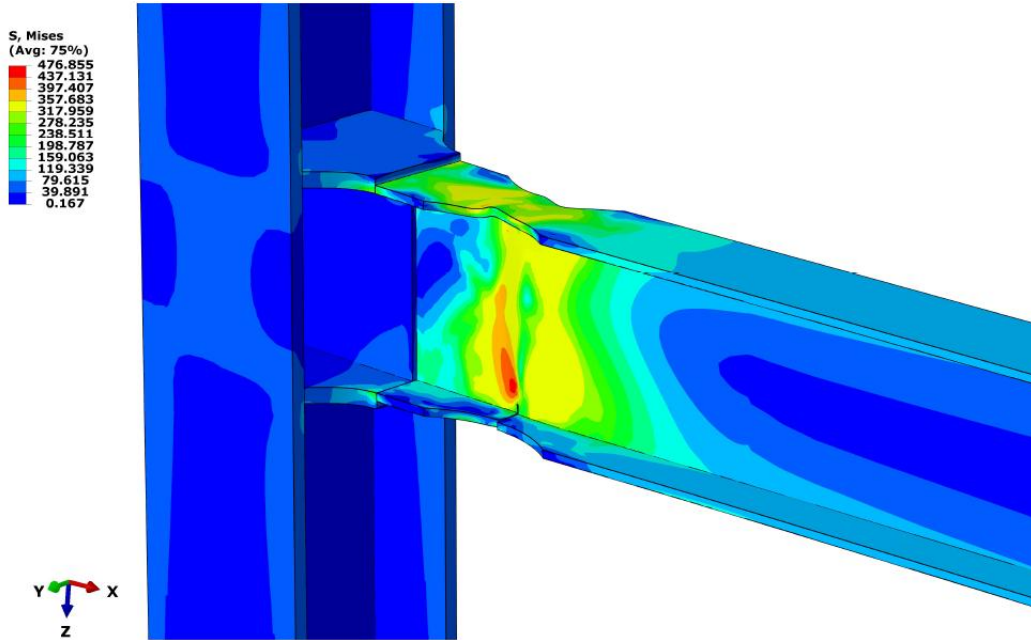
Analiz sonucunda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği bölgede plastik deformasyon oluşmamıştır. Ancak, kiriş başlıkları ile bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, özellikle levha köşelerinde plastik deformasyon meydana gelmiştir (Şekil 8.37).



Şekil 8.37 : Başlık bağlantı levhalarında plastik deformasyonlar.

Bu bölgede elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değeri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak merteye olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsallarda elde edilen PEEQ değeri yaklaşık 1,55 seviyesindedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği bölgede elde edilen PEEQ değeri ise bu değer %6,5'ine karşılık gelmekte olup yaklaşık 0,10 seviyesindedir. Bu sonuç, plastik deformasyonlarının kirişte meydana gelen plastik mafsalda yoğunlaştığını, birleşimin diğer kısımlarında ise sınırlı düzeyde plastik deformasyonun meydana geldiğini göstermektedir.

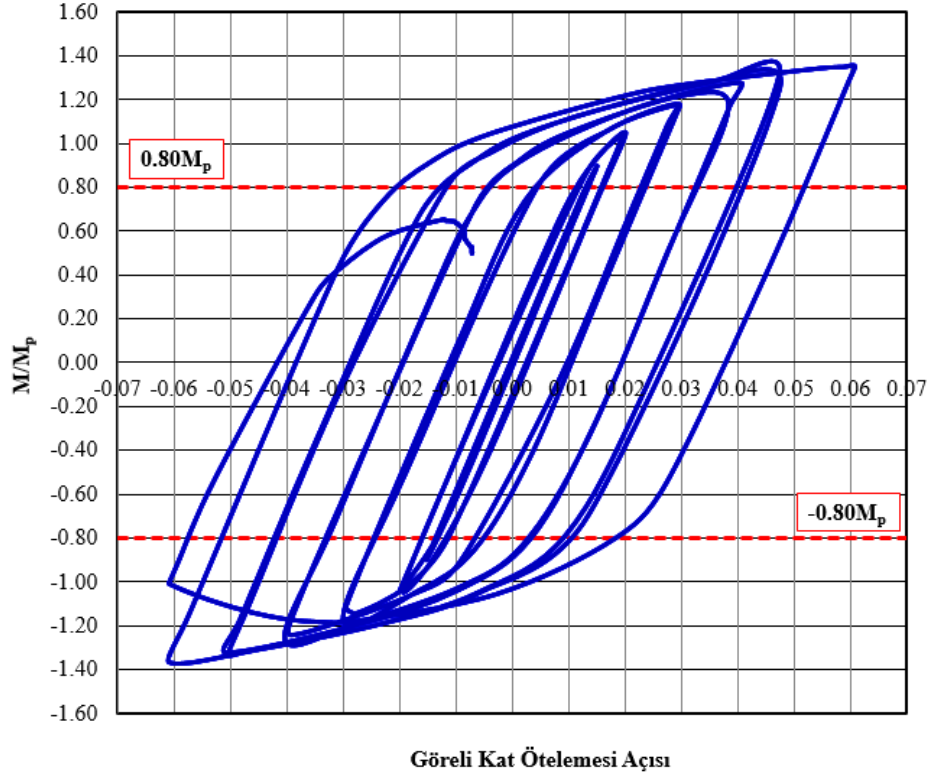
%6 görelî kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.38'te gösterilmiştir.



Şekil 8.38 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

8.2.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görelî kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %6 görelî kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.14). Sonuç olarak, kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)'da yer alan, 0,04 radyan görelî kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değerinin, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır (Şekil 8.39).



Şekil 8.39 : Çevrimsel eğri.

%6 görel kat öteleme açısına karşılık gelen yer değiştirmenin uygulandığı adımın üçüncü döngüsünde, kiriş başlığı ve gövdesinde meydana gelen çatlak oluşumuna bağlı olarak dayanım kaybının başladığı çevrimsel egride belirgin şekilde görülmektedir.

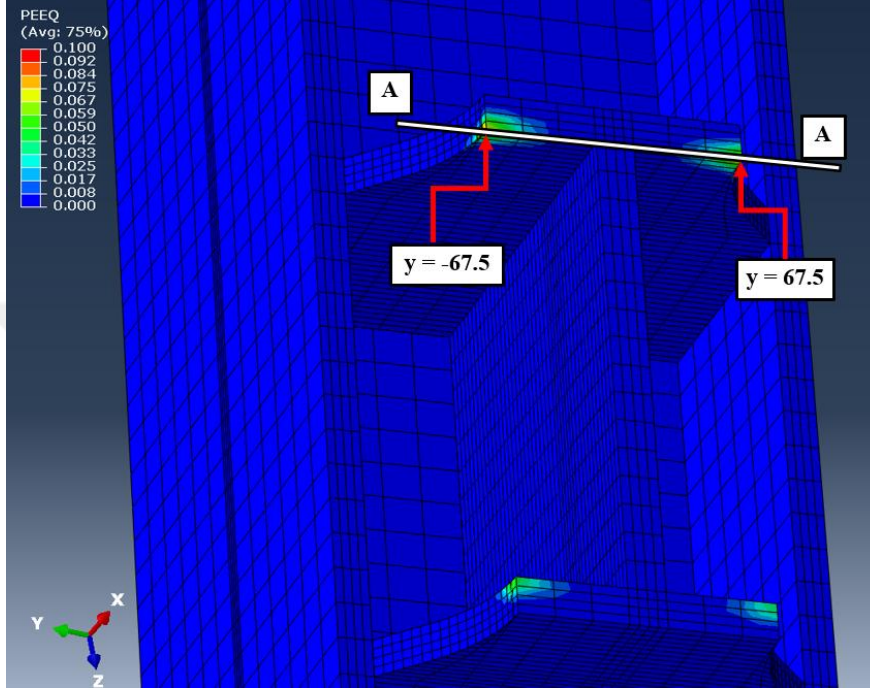
Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, çevrimsel eğrinin formu değerlendirildiğinde, tekrarlı yükler altında oldukça iyi bir performans göstererek (yüksek dayanım ve enerji sönümlleme kapasitesi), eğilme momenti kapasitesi %4 görel kat öteleme açısında azaltılmış kiriş enkesitinde hesaplanan plastik eğilme momenti dayanımının 1,25 katına ($1,25M_p$) ulaşmıştır.

8.2.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi

Birleşimlerde potansiyel yerel çatlak oluşum bölgelerinden biri, kaynaklı birleşim bölgeleridir. Analiz sonucunda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarıyla birleştiği kaynak bölgesinde plastik deformasyon oluşmadığından, bu bölgede PEEQI ve RI indisleri değerlendirilmemiştir.

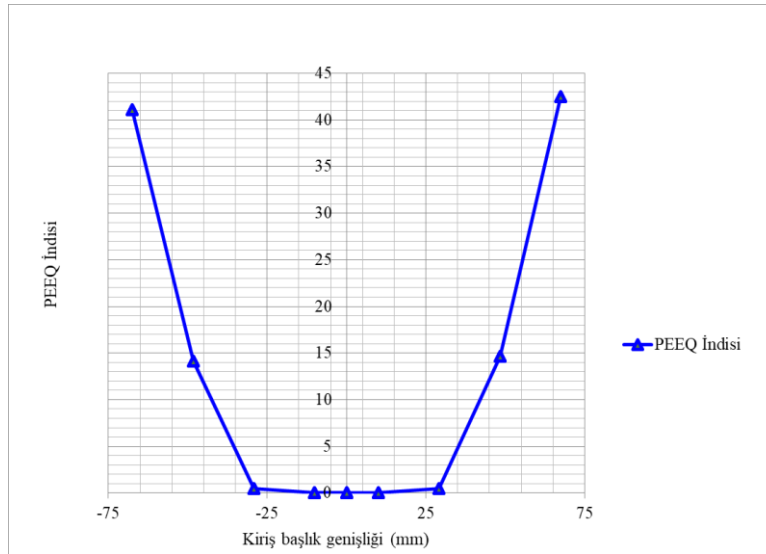
Plastik deformasyonların, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, özellikle levha köşelerinde meydana geldiği

gözlemlendiğinden, bu bölge için PEEQ ve RI indislerinin değerlendirilmesi uygun görülmüştür. Bu indisler, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, bağlantı levhasının alt lifinden geçtiği varsayılan A-A enkesiti boyunca hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan parametreler, söz konusu enkesit üzerindeki elemanlara ait düğüm noktalarından elde edilmiştir (Şekil 8.40).

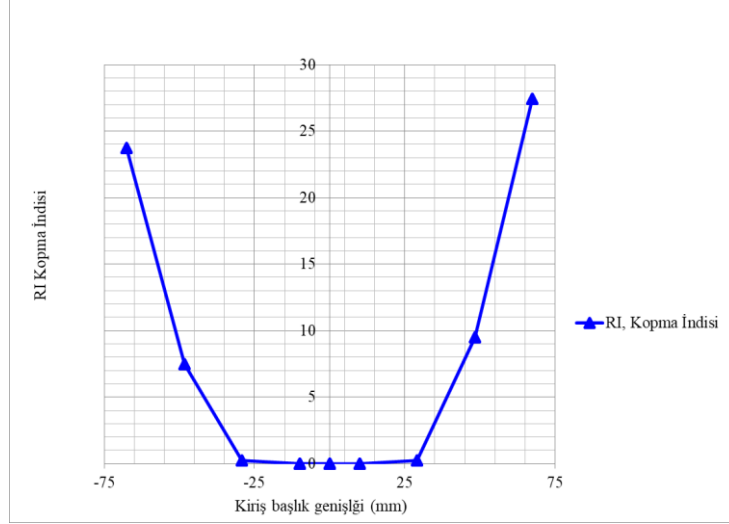


Şekil 8.40 : A-A enkesiti.

A-A enkesiti üzerinde PEEQI ve RI indisleri %6 görelî kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.41’de gösterilmiştir.



Şekil 8.41 : A-A enkesitinde PEEQI ve RI indisleri.

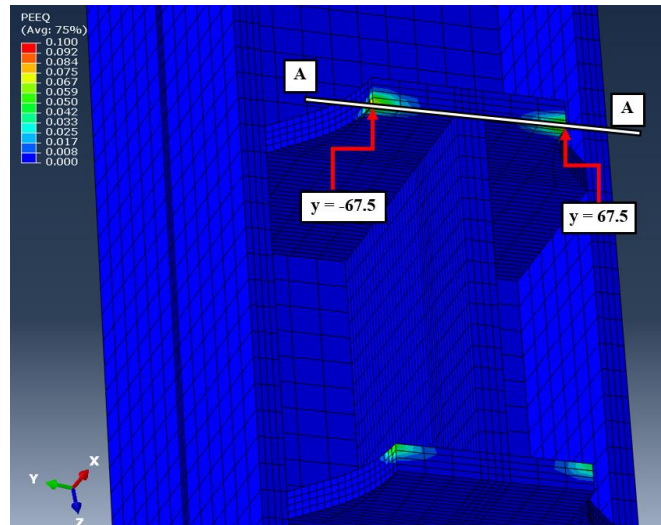


Şekil 8.41 (devam): A-A enkesitinde PEEQI ve RI indisleri.

Grafikler incelendiğinde, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, RI ve PEEQI indislerinin bağlantı levhasının orta kısmından kenarına doğru arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bir önceki bölümde değerlendirildiği üzere, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

8.2.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirmesi

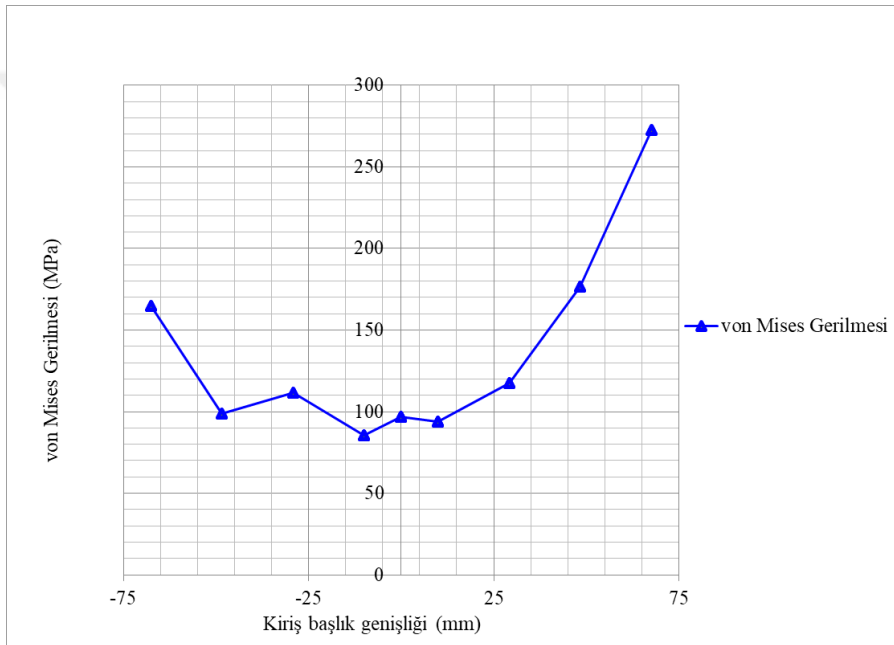
Bu bölümde daha önce belirlenen A-A enkesiti boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir (Şekil 8.42).



Şekil 8.42 : Gerilme dağılımının inceleneceği A-A enkesiti.

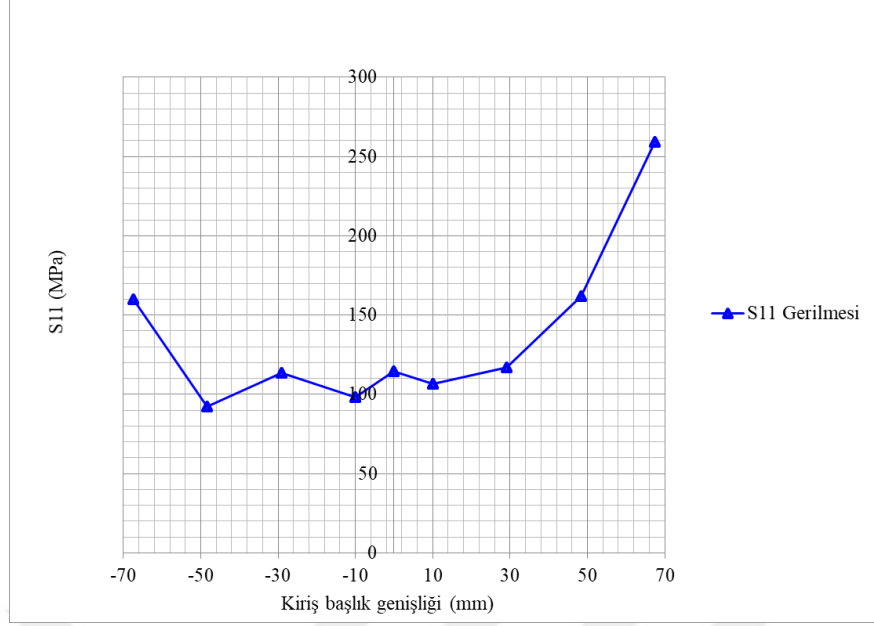
A-A enkesiti boyunca normal ve kayma gerilmeleri ile eşdeğer von Mises gerilmesi dağılımları elde edilmiştir.

En büyük von Mises gerilmesi bağlantı levhasının kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup yaklaşık 272 MPa'dır. Bu değer, ortalama von Mises gerilmesi olan 127 MPa değerinin yaklaşık 2,1 katı seviyesindedir. En küçük gerilme ise levhanın orta bölgesinde görülmüş ve 85 MPa olarak elde edilmiştir; bu da ortalamanın yaklaşık %67'sine karşılık gelmektedir. Kenar bölgelerdeki yüksek von Mises gerilmesi, incelenen bağlantı levhasının plastikleşmeye en yakın bölgeleri olarak değerlendirilebilir (Şekil 8.43).



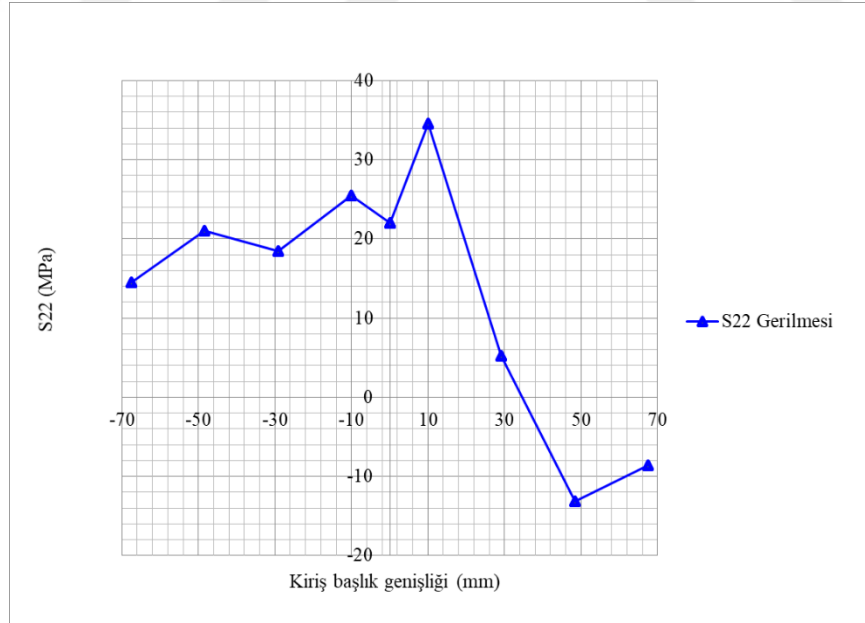
Şekil 8.43 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

En büyük S11 gerilmesi bağlantı levhasının kenarında meydana gelmiş olup 259 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalama gerilme olan 131 MPa değerinin yaklaşık 2 katı büyüklüğündedir. En küçük S11 gerilmesi ise levhanın orta bölgesinde meydana gelmiş ve 92 MPa olarak ölçülmüştür. Bu, ortalama değerinin yaklaşık %70'ine karşılık gelmektedir. Bu durum, S11 gerilmesinin kenarlarda yoğunlaştığını, orta bölgelerde ise daha sınırlı olduğunu göstermektedir (Şekil 8.44).



Şekil 8.44 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

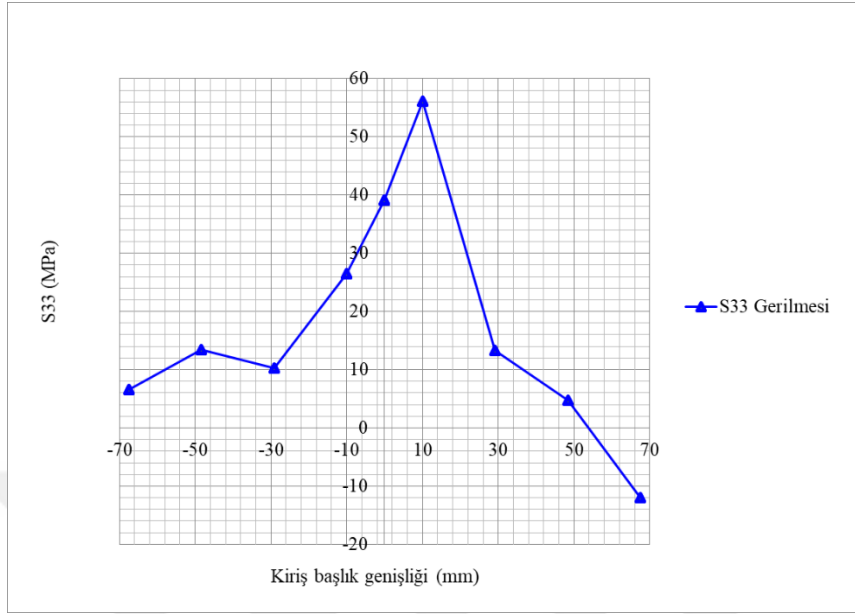
En büyük S22 gerilmesi 34,6 MPa (çekme), en küçük gerilme ise -13 MPa (basınç) olarak elde edilmiştir. Mutlak anlamda en büyük gerilme, en küçük gerilmenin yaklaşık 2,6 katıdır. Bu durum, S22 bileşeninde hem çekme hem basınç etkilerinin birlikte geliştiğini göstermektedir (Şekil 8.45).



Şekil 8.45 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

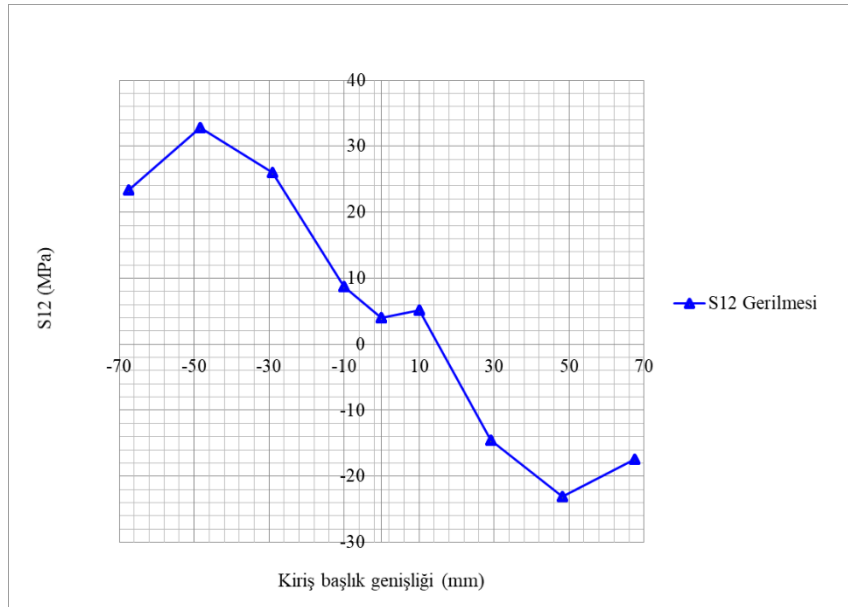
En büyük S33 gerilmesi 56 MPa, en küçük gerilme $-11,9$ MPa olarak gözlemlenmiştir. Mutlak olarak değerlendirildiğinde, en büyük değer en küçüğün yaklaşık 4,7 katıdır.

Bu fark, S33 bileşeninde çekme etkilerinin baskın olduğunu göstermektedir (Şekil 8.46).



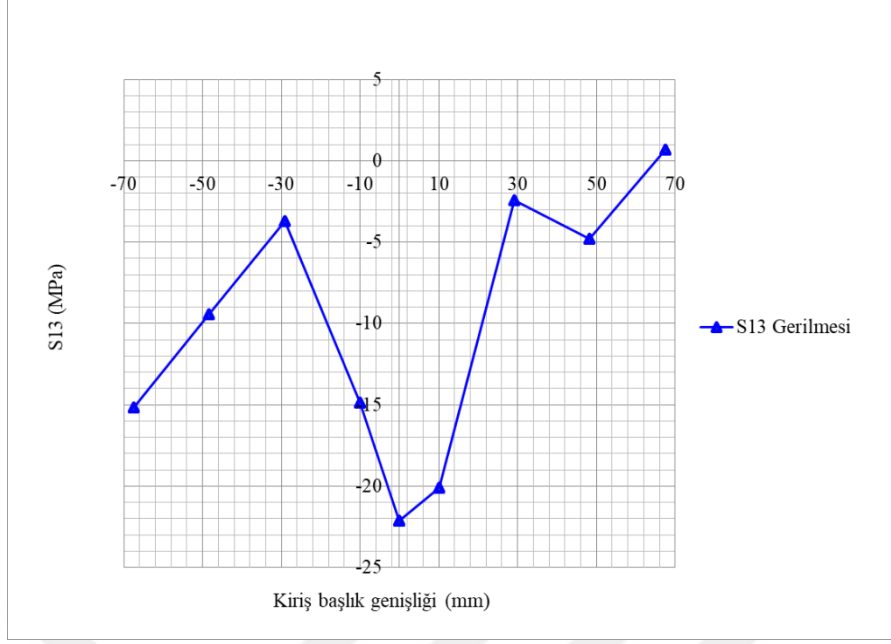
Şekil 8.46 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

En büyük S12 kayma gerilmesi 32,7 MPa, en küçük gerilme -23,1 MPa'dır. Mutlak anlamda en büyük değer, en küçük değerın yaklaşık 1,4 katıdır (Şekil 8.47).



Şekil 8.47 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

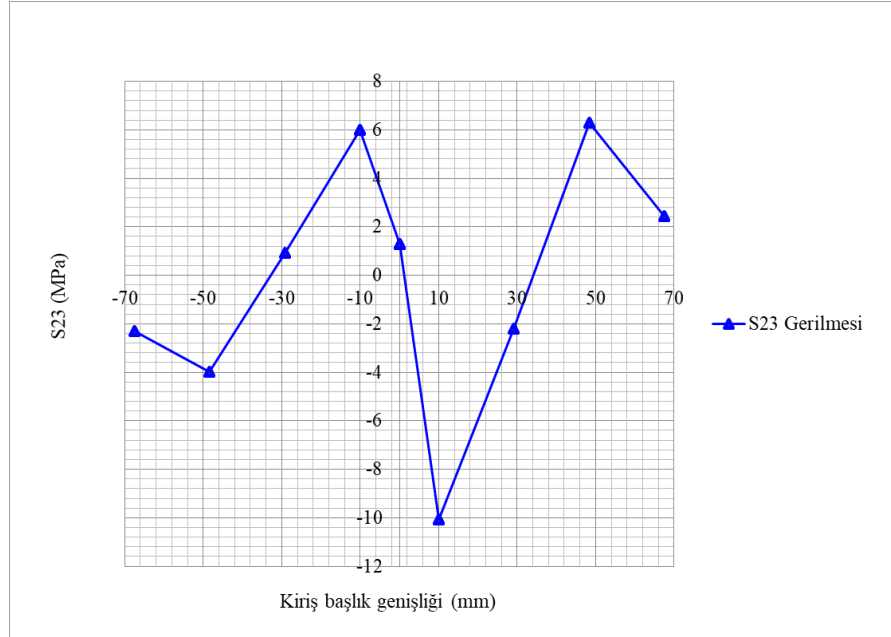
En büyük S13 gerilmesi -22 MPa olarak levhanın ortasında elde edilmiştir. Levhanın bir kenarında -15 MPa olarak elde edilen S13 gerilmesi, diğer kenarında ise yaklaşık 0 (sıfır) olarak ölçülmüştür (Şekil 8.48).



Şekil 8.48 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

En büyük S23 gerilmesi -10 MPa, en küçük değer ise 6,2 MPa'dır. Mutlak olarak bakıldığında, en büyük değer en küçüğün yaklaşık 1,6 katıdır.

En büyük S23 gerilmesi -10 MPa olarak levhanın ortasından 10 mm uzakta elde edilmiştir. Levhanın bir kenarında -3 MPa olarak elde edilen S13 gerilmesi diğer kenarında ise 2 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 8.49).



Şekil 8.49 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

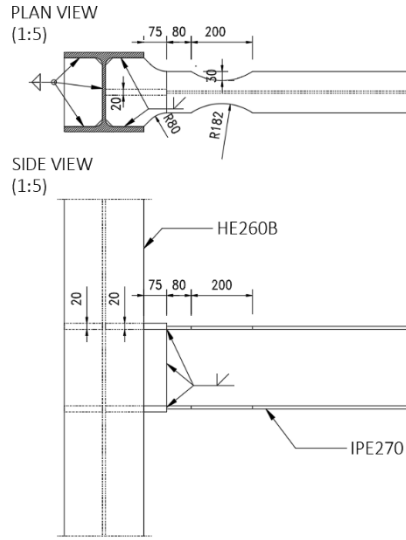
Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, dağılımının tam anlamıyla simetrik olmadığı görülmektedir. Bu durumun, enkesitten belirli bir mesafe uzaklıkta, kiriş başlığının yalnızca bir tarafında meydana gelen çatlak oluşumunun yanı sıra; akma sonrası gelişen plastik deformasyon düzensizlikleri ve yerel burkulma etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

8.2.5 Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi hakkında bilimsel makale çalışması

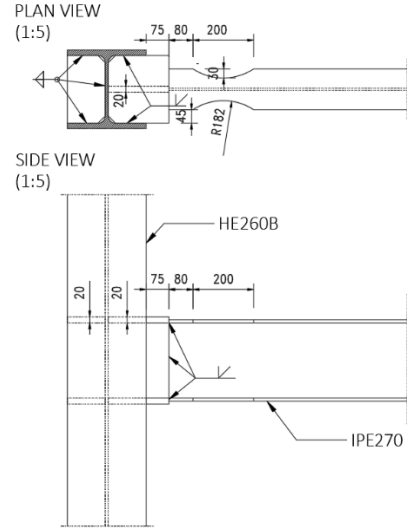
Tez çalışması kapsamında, doktora mezuniyet koşullarından biri olan bilimsel bir makale hazırlanmıştır. Bu doğrultuda, kaynaklı zayıflatılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin deprem yükleri altındaki davranışını, plastik deformasyon dağılımlarını, enerji yutma kapasitelerini ve farklı tasarım parametrelerinin birleşimin performansı üzerindeki etkilerini içeren, "Nonlinear Behavior of I-Shaped Reduced Beam-to-H-Shaped Column Weak Axis Moment Connections Under Cyclic Loading" başlıklı bilimsel makale, Arabian Journal for Science and Engineering dergisinde 2024 yılında yayımlanmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, kaynaklı zayıflatılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli birleşimlerin çevrimsel (tekrarlı tersinir) yükler altındaki doğrusal olmayan davranışını kapsamlı olarak incelemektir. Özellikle, bu tür birleşimlerdeki kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının geometrisinin ve azaltılmış enkesitin konumunun, birleşimin süneklik kapasitesi, plastik deformasyonların dağılımı ve potansiyel hasar oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

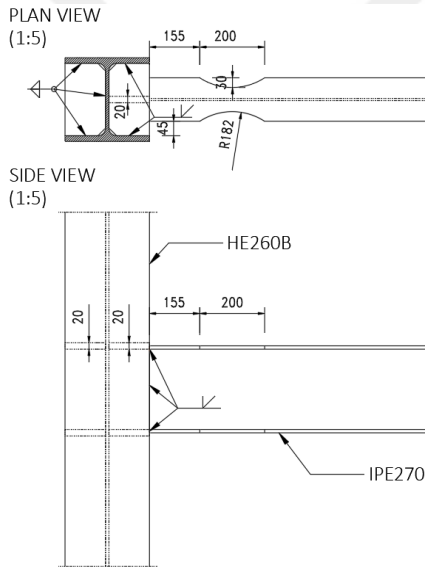
Çalışmada beş farklı birleşim tipi (RBS-A, RBS-AA, RBS-B, RBS-C, RBS-D) yer almaktadır (Şekil 8.50). Bu tez kapsamında geliştirilen ve I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşim, RBS-A adıyla referans birleşim olarak makalede tanımlanmıştır. Diğer birleşimler ise makale kapsamında, referans birleşim ile karşılaştırmak amacıyla geliştirilmiştir. Diğer birleşim tipleri ise, referans birleşim ile karşılaştırma yapmak amacıyla geliştirilmiş ve analiz edilmiştir (Şekil 8.50).



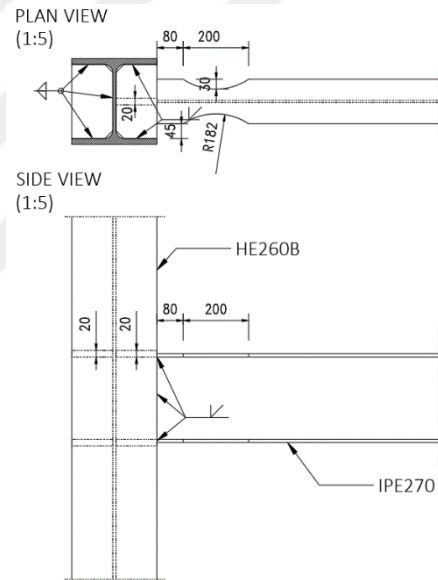
(a) RBS-A



(b) RBS-B



(c) RBS-C

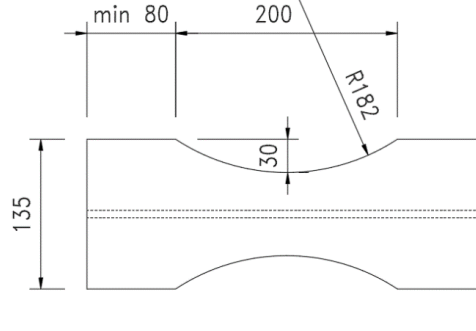


(d) RBS-D

Şekil 8.50 : RBS-A, RBS-B, RBS-C ve RBS-D kiriş-kolon birleşimlerinin çizimleri.

Azaltılmış kiriş enkesitinde kiriş başlıklarının kesim geometrisi AISC 358-22 şartnamesinde belirtilen sınırlama ve denklemler esas alınarak belirlenmiş ve tüm birleşimlerde bu geometri aynı tutulmuştur.

Buna göre, azaltılmış kesit uzunluğu 200 mm, azaltılmış kesitin merkezindeki kesme derinliği 30 mm olarak hesaplanmıştır. Kesimin eğrilik yarıçapı ise, kiriş enkesit yüksekliği (270 mm) ve kiriş başlık genişliği (135 mm) dikkate alınarak 182 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 8.51).



Şekil 8.51 : Kiriş başlıklarının kesim geometrisi.

Önceki bölümlerde belirtildiği üzere, referans birleşim olan RBS-A, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlıklarının ucundan dışarıya doğru eğrisel bir formda 75 mm uzatılması esasına göre tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, Driscoll ve diğ. (1982) tarafından, I-enkesitli kirişin I-enkesitli kolonun gövdesine bağlandığı moment aktaran birleşimlerde yapılan çalışmalarda önerilen detaylara dayanmaktadır. Söz konusu çalışmalarda, bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmının daralan enkesitli olarak teşkil edilmesinin, çevrimsel yükler altında daha yüksek süneklik düzeyi sağladığı belirtilmiştir. Bu doğrultuda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmı, kiriş ucuna doğru eğrisel şekilde daralan bir enkesit geometrisiyle boyutlandırılmıştır. Azaltılmış kiriş kesitinin merkezi, kolon başlıklarının ucundan 255 mm mesafede konumlandırılmıştır.

Makale kapsamında, referans birleşime alternatif olarak RBS-AA birleşimi tasarlanmıştır. Bu birleşim, RBS-A modeliyle geometrik olarak büyük ölçüde benzer olup, tek fark, kiriş başlıklarının ve gövdesinin hizasındaki bağlantı levhalarının kalınlıklarının, kirişin başlık ve gövde kalınlıklarıyla eşit olacak şekilde belirlenmiş olmasıdır.

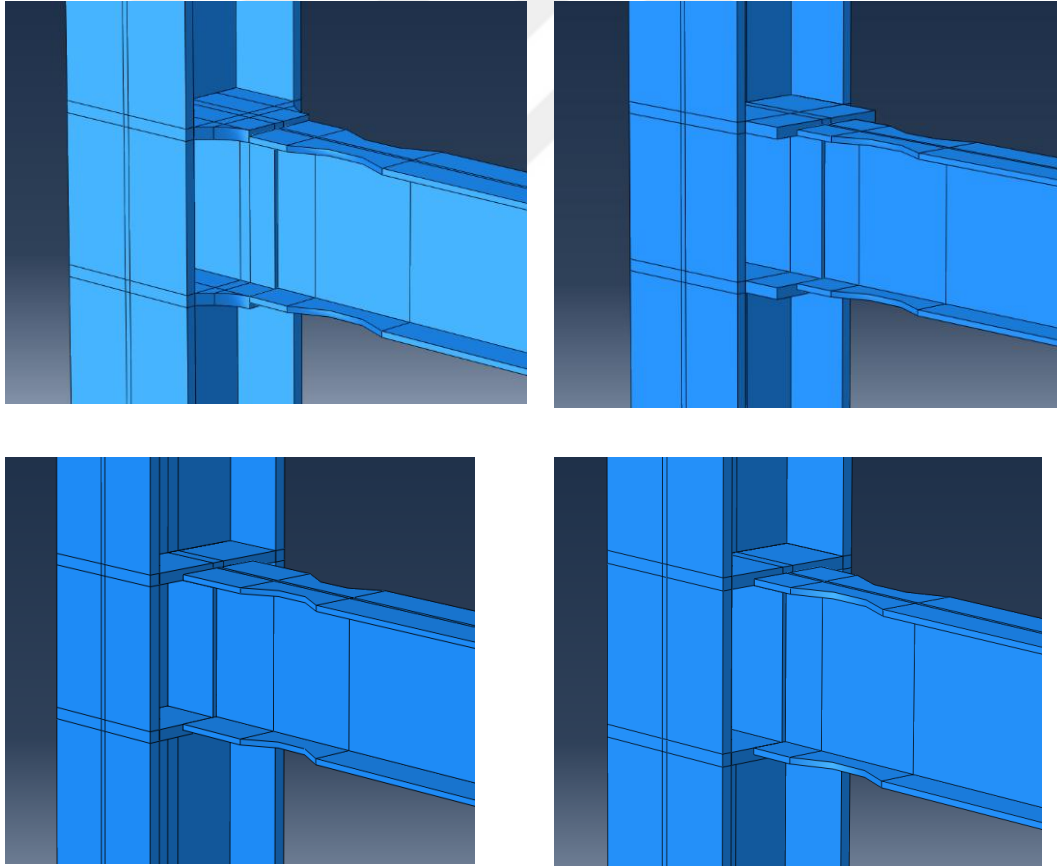
RBS-B birleşimi, kiriş başlıkları ve gövdesinin hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının dışına uzayan kısmının geometrisi dışında, RBS-A ile aynı elemanlara ve boyutlara sahiptir. Bu birleşimde, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan kısmı kiriş uç enkesitine doğru daralmayacak şekilde düz bir geometriye sahiptir.

RBS-C birleşiminde kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının hizasında sonlanmakta ve doğrudan kiriş ucuna bağlanmaktadır.

RBS-D birleşiminde de kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhaları kolon ucundan dışarıya doğru uzamamaktadır. Ancak bu birleşimin RBS-C birleşiminden farkı,

azaltılmış kiriş enkesitinin merkezi, AISC 358-22 standardına şartnamesine göre kolon yüzü ile azaltılmış kesit başlangıcı arasındaki izin verilen minimum mesafe korunarak kolon yüzüne doğru 75 mm daha yaklaştırılmıştır. Azaltılmış kiriş enkesitinin yerinin değiştirilmesi, plastik mafsala da kolon yüzüne doğru yaklaşmasına sebep olmaktadır. Çünkü tasarım prensibi olarak, plastik mafsala azaltılmış enkesit bölgesinde oluşması amaçlanmaktadır. Böylece, RBS-C ve RBS-D numuneleri karşılaştırılarak, azaltılmış kiriş enkesitinin konumunun değiştirilmesinin birleşim davranışı üzerindeki etkisi incelenebilecektir.

Bu makale çalışması kapsamında tasarımı yapılan birleşimlerin sonlu eleman modelleri, önceki bölümlerde doğrulama çalışmaları sonucunda uygunluğu gösterilmiş, eleman ve malzeme modelleri, pekleşme modeli, yüzey etkileşimi modeli, eleman tipleri ve olası hasar durumu gibi önemli modelleme tanımlarının uygulanmasıyla oluşturulmuştur (Şekil 8.52).

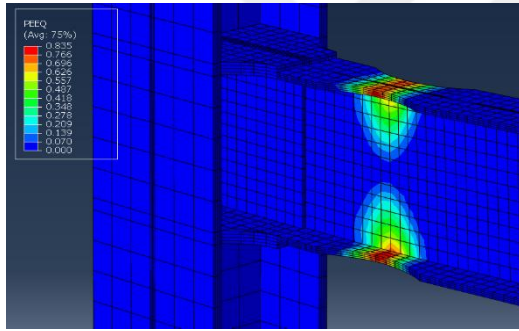


Şekil 8.52 : RBS-A, RBS-B, RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin sonlu eleman modeli görüşleri.

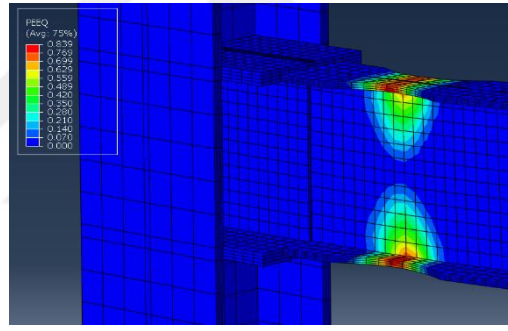
İlgili makalenin teslimi sırasında henüz hasar modeli geliştirilmediğinden makale çalışmasında kullanılan nümerik modellerde malzeme hasar tanımı uygulanmamıştır. Hasar modellemesi ise tez çalışmasının ilerleyen aşamalarında geliştirilmiş ve bu makale kapsamındaki referans birleşim RBS-A üzerinde uygulanmış ve sonuçları bir önceki bölümde belirtilmiştir. Bu makale kapsamında ise çatlak oluşma potansiyeli PEEQI ve RI indisleriyle değerlendirilmiştir.

Birleşimlerin sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımı ile oluşturulduktan sonra, AISC 341-22’de tanımlanan yükleme protokolü altında çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir.

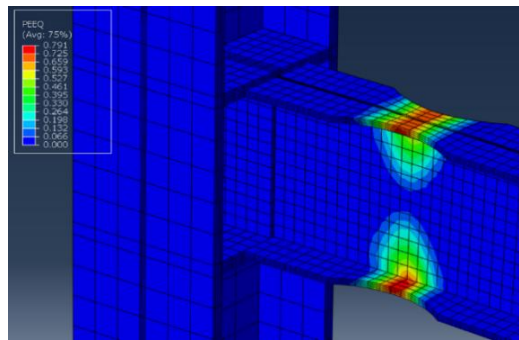
Analizlerin sonucunda, RBS-A, RBS-B, RBS-C ve RBS-AA birleşimlerinin, çevrimsel yükler altında oldukça benzer bir davranış sergilediği ve tüm birleşimlerde plastik deformasyonların büyük ölçüde azaltılmış kiriş enkesitlerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.53).



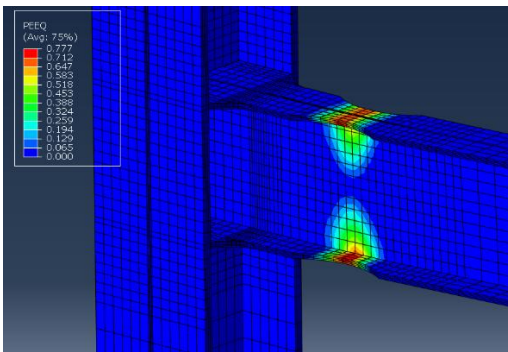
(a) RBS-A



(b) RBS-B



(c) RBS-C

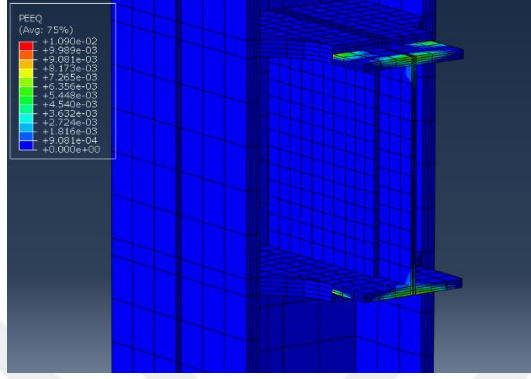


(d) RBS-AA

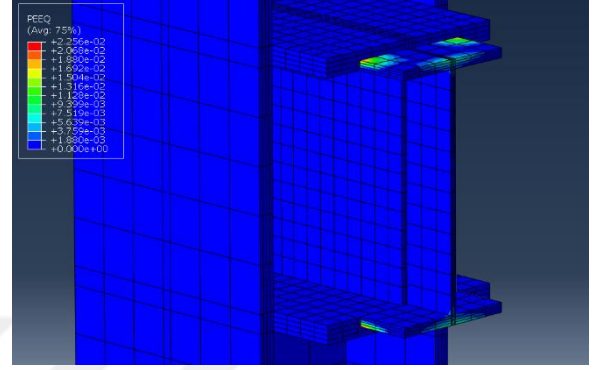
Şekil 8.53 : RBS-A, RBS-AA, RBS-B, ve RBS-C birleşimlerinde %5 dönme değerinde plastik şekil değiştirmeler.

Tüm birleşimlerde elde edilen eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ) değerleri benzer düzeyde olmakla birlikte, bu değerler arasında en yüksek PEEQ, %5 görelî kat öteleme açısında RBS-B numunesinde 0,84 olarak elde edilmiştir.

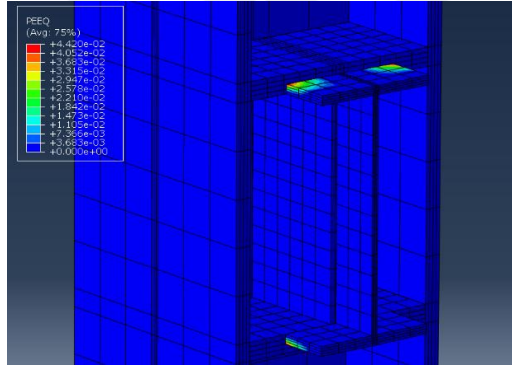
Azaltılmış kiriş enkesitinin başlık bölgesinde akma davranışı, %1 görelî kat ötelenmesi açısının oluştuğu çevrimlerde başlamıştır. Kiriş başlıklarının her iki kenarında, kiriş başlıkları ile kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhasının birleştiği bölgede, akma davranışı %1,5 görelî kat öteleme açısında gözlenmiştir. Şekil 8.54'te gösterildiği gibi, kiriş ucu enkesitinde de plastik deformasyonlar meydana gelmiştir.



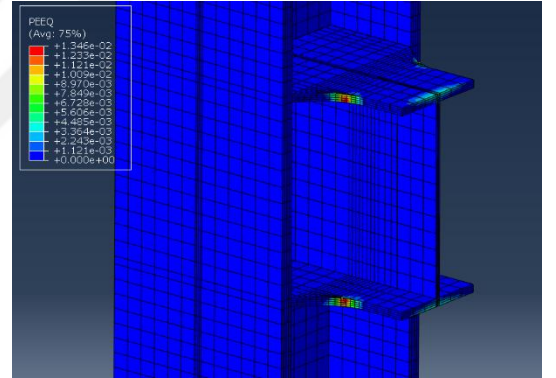
(a) RBS-A



(b) RBS-B



(c) RBS-C



(d) RBS-AA

Şekil 8.54 : RBS-A, RBS-AA, RBS-B, ve RBS-C birleşimlerinde %5 dönme değeriinde kiriş ucundaki plastik şekil değıştirmeler.

Ancak RBS-A, RBS-B ve RBS-C numunelerindeki PEEQ değeriilerinin karşılaştırılması, bağlantı levhası-kiriş birleşim bölgesinde gözlenen PEEQ değeriilerinin, azaltılmış kesitte elde edilen değeriilere kıyasla oldukça düşük olduğunu göstermiştir; bu oran yaklaşık %1,5 ila %5 arasında değışmektedir. Ayrıca, plastik şekil değıştirme yalnızca kiriş başlığında sınırlı kalmış, kirişin gövdesine yayılmamıştır.

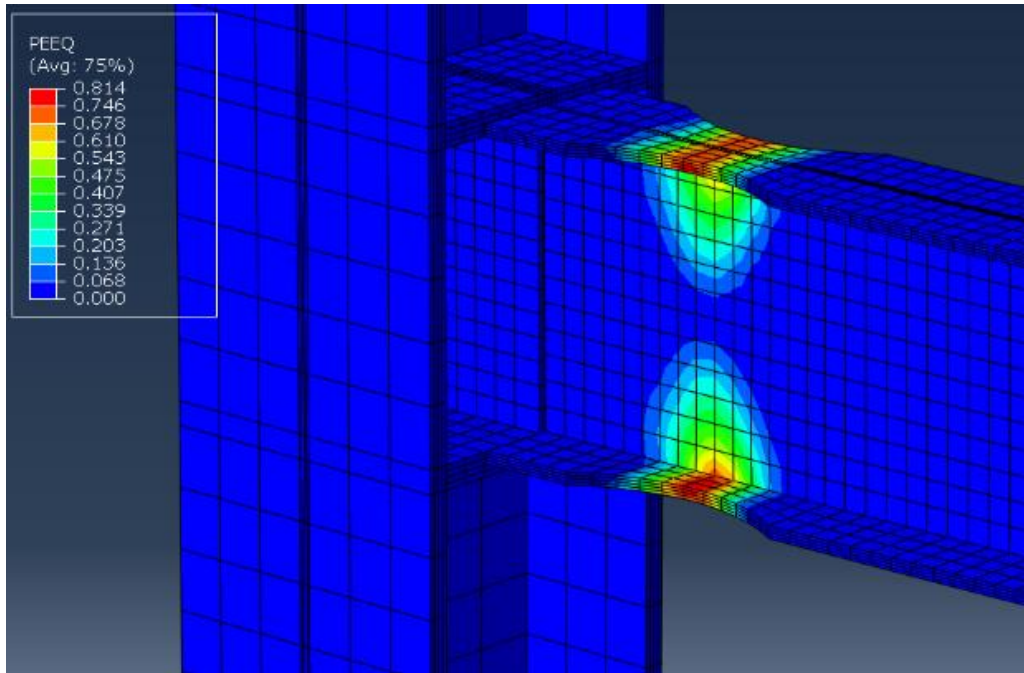
Ancak, RBS-A, RBS-B ve RBS-C numunelerinde azaltılmış enkesitte elde edilen PEEQ değeriileri ile bağlantı levhası-kiriş birleşim bölgesinde elde edilen değeriiler karşılaştırıldığında, bağlantı bölgesindeki PEEQ değeriilerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür; bu değeriiler, azaltılmış kiriş enkesitinde gözlenen değeriirin yaklaşık %1,5

ila %5'i aralığında kalmaktadır. Ayrıca, plastik şekil değiştirmelerin yalnızca kiriş başlıklarında yoğunlaştığı ve kiriş gövdesine yayılmadığı gözlemlenmiştir.

Diğer birleşimlerden farklı olarak, RBS-AA numunesinde bağlantı levhası-kiriş birleşimindeki PEEQ değeri, azaltılmış kesitteki değerin yalnızca %0,05'i kadardır. Önemli olarak, diğer birleşimlerin aksine, RBS-AA birleşiminde kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlığı dışına uzayan eğrisel bölgesinde plastik deformasyonlar tespit edilmiştir. Bu durum, diğer birleşimlere kıyasla, bu birleşimdeki bağlantı levhalarının daha ince kullanılmış olmasına bağlanmıştır. Bu bölgede okunan PEEQ değeri, azaltılmış enkesitteki değerin yaklaşık %1,5'i seviyesindedir.

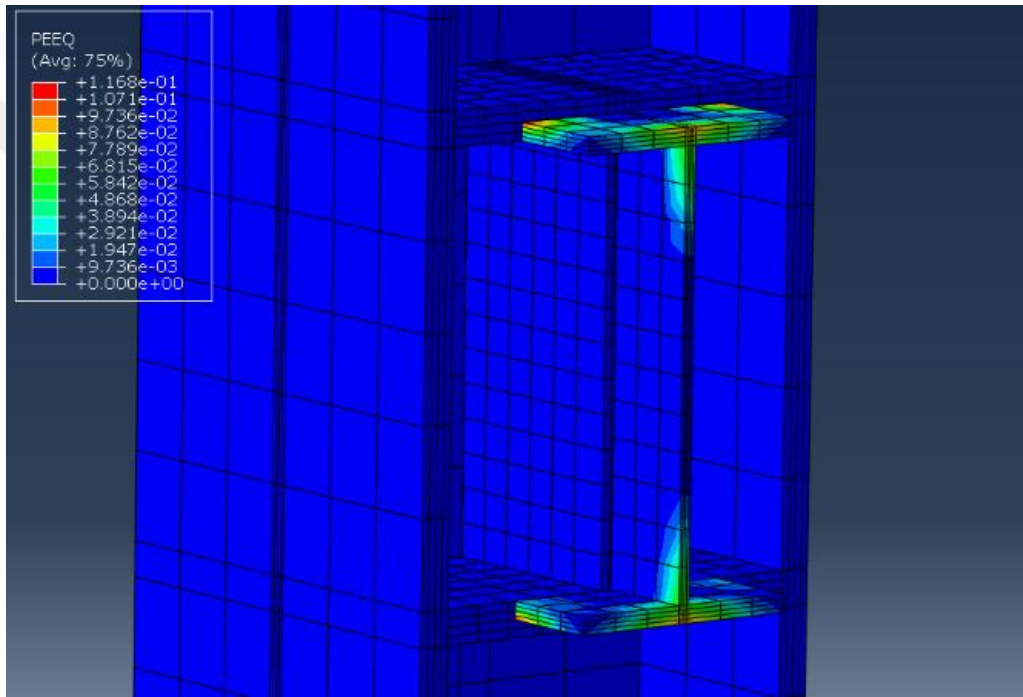
RBS-D numunesinde ise, kiriş başlığının azaltılmış kesitte akmaya başlaması %1 göreceli kat öteleme açısından gerçekleşmiştir. Diğer numunelerden farklı olarak, bağlantı levhasının birleştiği noktadaki kiriş başlıklarının kenarlarında akma, %1,5 göreceli kat öteleme açısından gözlenmiştir. Şekil 9'da gösterildiği gibi, azaltılmış kesitteki plastik deformasyonlar analiz boyunca başlıktan gövdeye doğru yayılmıştır.

RBS-D birleşiminde, azaltılmış kiriş enkesitinde, kiriş başlığı %1 kat öteleme açısındaki yükleme adımlarında akma davranışı göstermeye başlamıştır. Şekil 8.55'te gösterildiği üzere, azaltılmış kiriş enkesitinde oluşan plastik deformasyonlar, analiz süresince kiriş başlığından gövdeye doğru yayılım göstermiştir.



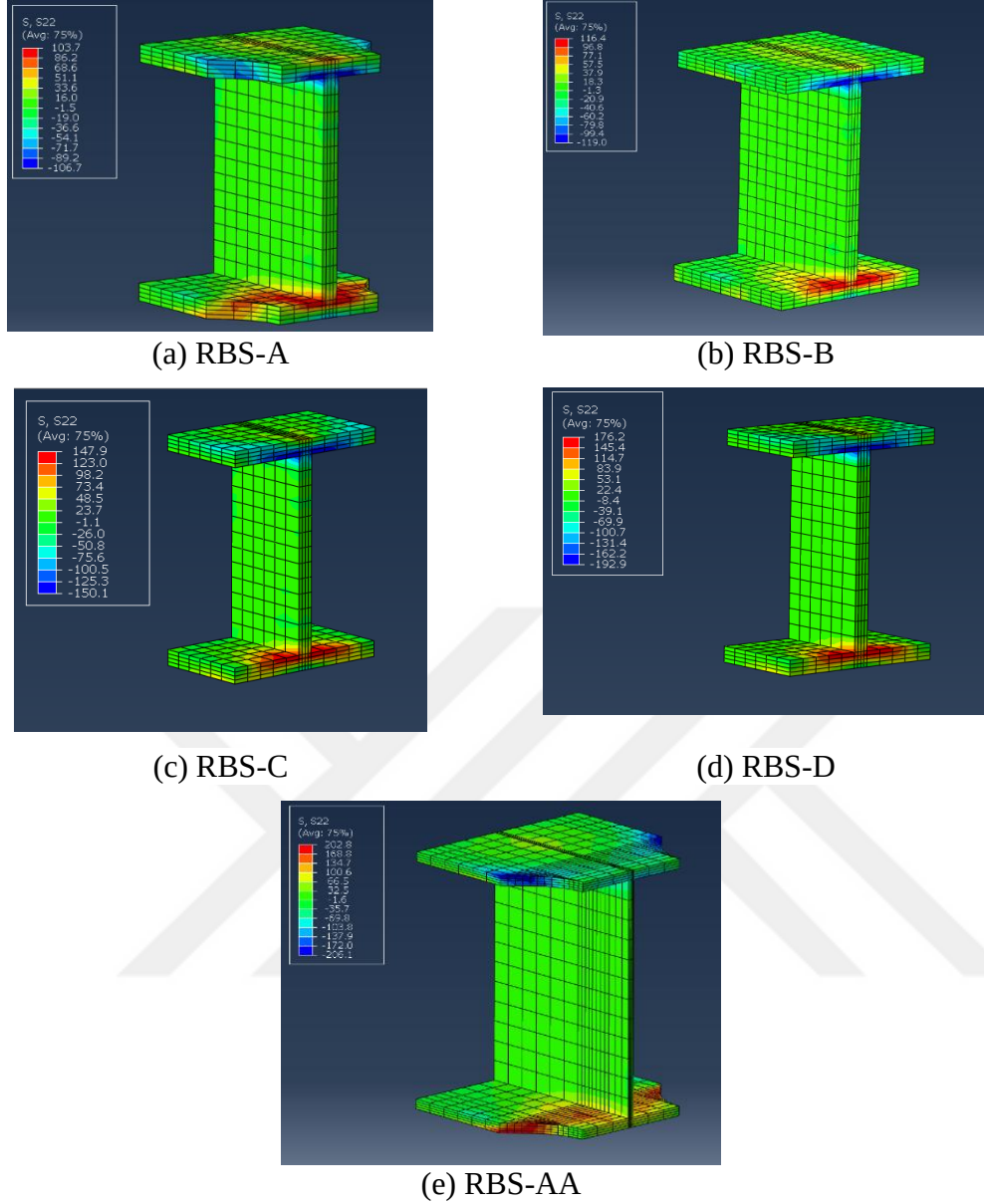
Şekil 8.55 : RBS-D birleşiminde %5 dönme değerinde plastik şekil değiştirmeler.

Diğer birleşim modellerinden farklı olarak, RBS-D birleşiminde bağlantı levhası–kiriş birleşiminde oluşan plastik deformasyonlar, kiriş gövdesine kadar ilerlemiştir (Şekil 8.56). Azaltılmış kiriş enkesitinin kolon yüzüne çok yakın konumlandırılması, beklenildiği şekilde plastik şekil değiştirmelerin kolon yüzeyinden azaltılmış kiriş enkesitine etkin şekilde aktarılmasını sağlayamamıştır. Bu yetersizlik, kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhaları ile kiriş arasındaki kaynaklı birleşimde erken göçme oluşmasına neden olabilir. Plastik şekil değiştirmelerin yalnızca azaltılmış kiriş enkesit bölgesinde sınırlandırılabilmesi için, bu enkesitin kolon yüzeyinden yeterli uzaklıkta konumlandırılması gerekmektedir.



Şekil 8.56 : RBS-D birleşiminde kiriş ucundaki plastik şekil değiştirmeler.

Kolon başlıklarına dik doğrultuda oluşan enine gerilme (S22) dağılımı, kiriş ile kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhaları arasındaki birleşim bölgesinde incelenmiştir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıkları tarafından kısıtlandığı durumu yansıtan, levhaların kolon başlıklarının uç kısmında sonlandığı birleşimlerde (RBS-C ve RBS-D), levhaların kolon başlıklarının dışına doğru uzadığı birleşimlere (RBS-A ve RBS-B) kıyasla belirgin şekilde daha yüksek S22 gerilmeleri gözlemlenmiştir (Şekil 8.57).

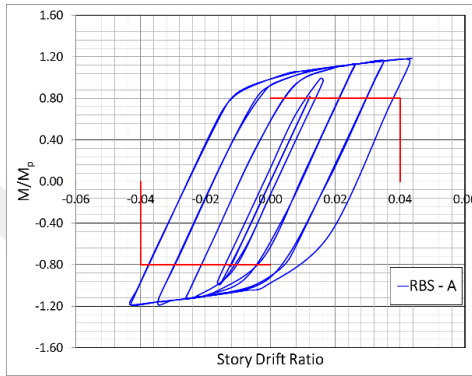


Şekil 8.57 : Kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarında PEEQ dağılımları.

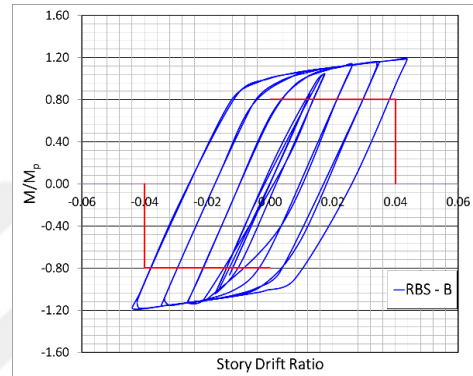
RBS-AA birleşiminde okunan maksimum enine gerilme, RBS-A birleşimindekinin yaklaşık 2 (iki) katı ve RBS-C birleşimindekinden ise 1,36 kat daha yüksek olarak elde edilmiştir. RBS-A ve RBS-B numuneleri arasında ise enine gerilmeler açısından anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Kirişin eğilmesinden kaynaklanan, kiriş boyuna doğrultusundaki gerilmelerle birleşen kiriş enine doğrultusundaki gerilmeler, kiriş ile bağlantı levhaları arasında iki eksenli gerilmelere ve buna bağlı olarak şekil değiştirme yığılmalarına neden olmaktadır. Gerilme düzeyinin yeterince yüksek olması durumunda, malzeme ya da kaynak bölgesi erken kırılma ile hasar görebilir (Driscoll ve diğ, 1982). Bu durum, özellikle yorulma yüklemelerinde dikkate alınması gereken çatlak başlangıcı ihtimalini artırmaktadır.

AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) uyarınca, süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerde yer alan kiriş-kolon birleşimlerinin dayanımının, 0,04 radyan görelî kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değeri, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması gerekmektedir.

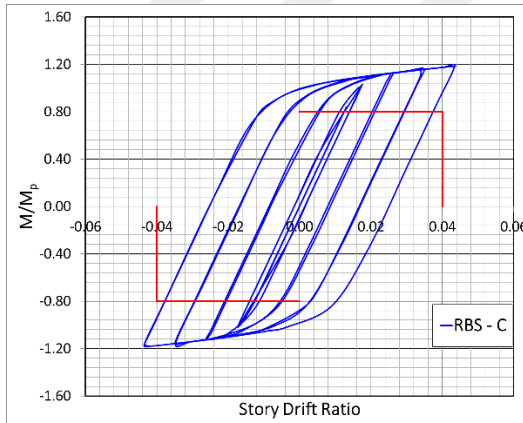
Tüm birleşimler çevrimsel yükleme altında iyi bir performans göstermiş ve AISC 341-22 şartnamesinde süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerin birleşimleri için belirtilen gereklilikleri karşılamıştır (Şekil 8.58).



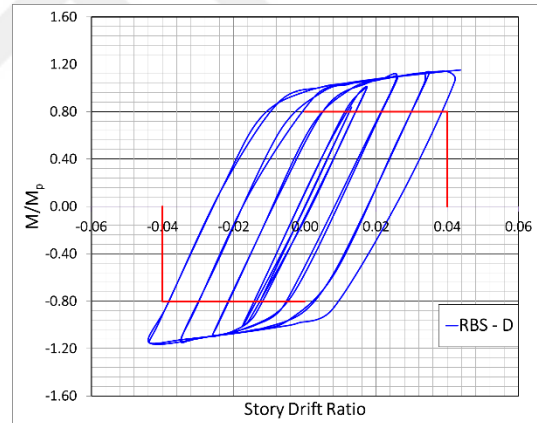
(a) RBS-A



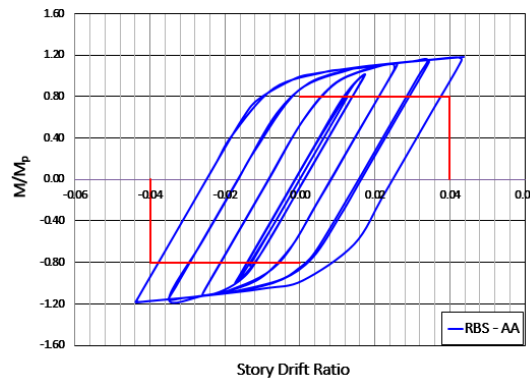
(b) RBS-B



(c) RBS-C



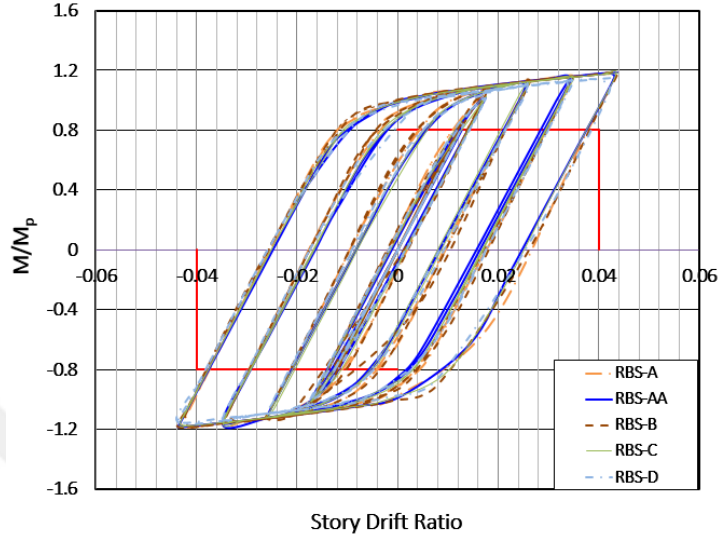
(d) RBS-D



(e) RBS-AA

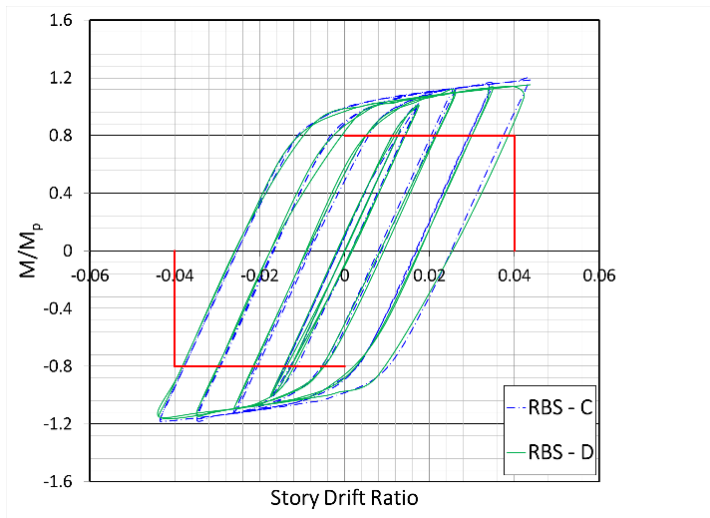
Şekil 8.58 : Tüm birleşimlerinin çevrimsel eğrileri.

Şekil 8.58’de birleşim davranışının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla tüm birleşimlere ait çevrimsel eğriler aynı grafik üzerinde üst üste gösterilmiştir. Şekil 8.59 incelendiğinde, birleşim modellerinin davranışlarının benzer özellikler gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 8.59 : Tüm birleşimlerin çevrimsel eğrilerinin karşılaştırması.

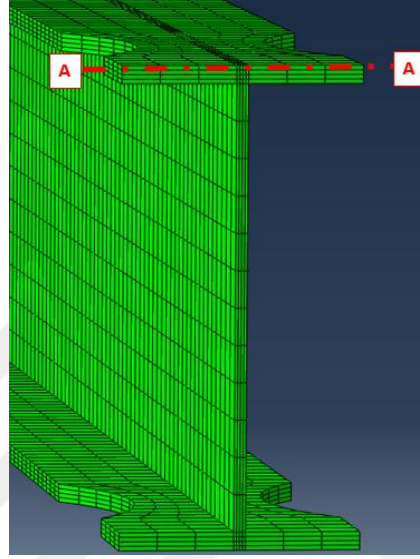
Şekil 8.60’ta, azaltılmış kiriş enkesitinin kolon yüzüne doğru kaydırılmasının etkisini değerlendirmek amacıyla RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. %5 göreceli kat öteleme oranında oluşan maksimum eğilme momenti bakımından iki model arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Yapılan analiz sonuçlarına göre, bu çalışmada dikkate alınan azaltılmış kiriş enkesitinin kolon başlığına olan uzaklığı, birleşimin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir.



Şekil 8.60 : RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin çevrimsel eğrileri.

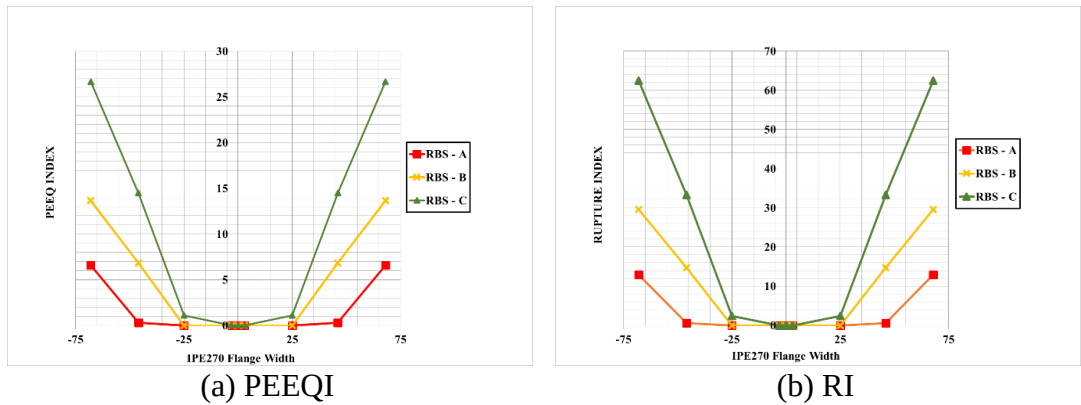
Çatlak oluşma potansiyeli, yerel plastik şekil değiştirme talebinin yüksek olduğu bölgelerde RI ve PEEQI indislerinin belirlenmesi yoluyla yorumlanmıştır.

Plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgelerdeki gerilme dağılımını ve plastik şekil değiştirme talebini belirlemek amacıyla, 0,04 radyan görelî kat öteleme açısında, kiriş başlığının en üst liflerinden geçtiği varsayılan A-A enkesiti boyunca RI ve PEEQI indisleri hesaplanmıştır (Şekil 8.61).



Şekil 8.61 : PEEQI ve RI indislerinin elde edileceği A-A enkesiti.

Bağlantı levhalarının, kolon başlığının ucundan dışarıya doğru uzayacak şekilde boyutlandırılmasının, kiriş başlıklarının kenarlarında oluşan plastik talebi azalttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.62).

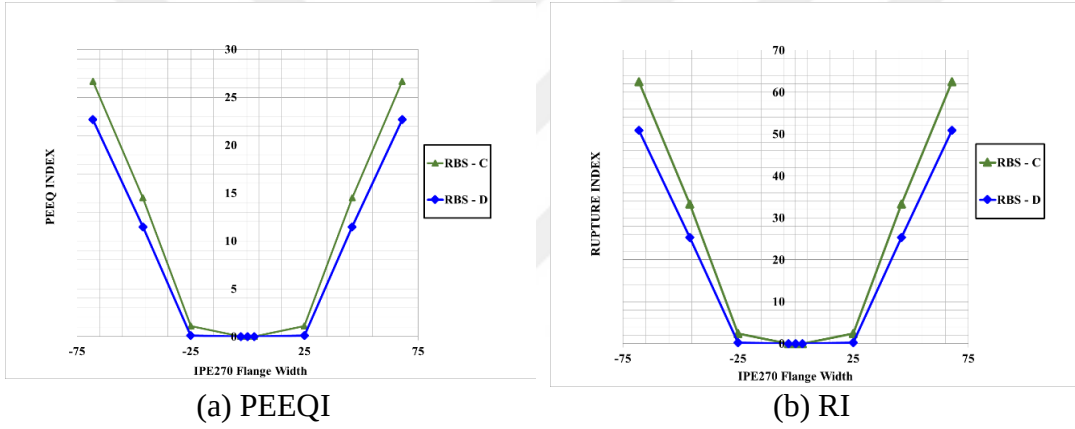


Şekil 8.62 : A çizgisi boyunca elde edilen PEEQI ve RI indisleri.

Ayrıca, kiriş başlıklarının hizasındaki bağlantı levhalarının kolon ucundan dışarıya doğruyu uzayan kısmının dairesel bir eğri şeklinde tasarlanmasının, kiriş ucunda

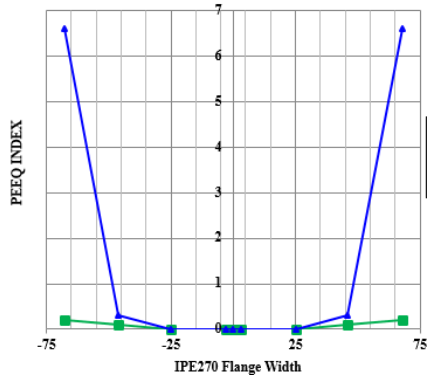
oluşan PEEQI ve RI indislerini düşürdüğü ve bunun da çatlak ilerleme olasılığını azalttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, kiriş başlığı kenarlarında oluşan plastik talebin, enkesit orta bölgesine kıyasla daha yüksek olduğu da ortaya konmuştur.

Azaltılmış kiriş enkesitinin konumunun etkisi, RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir. RBS-C numunesinde kiriş başlığının kenarındaki PEEQI ve RI indisleri, RBS-D numunesine kıyasla bir miktar daha yüksek bulunmuştur (Şekil 8.63). Bu durum, plastik mafsalın kolon yüzeyinden daha uzak bir konumda oluşmasıyla birlikte, bu bölgede meydana gelen kesme kuvvetinin neden olduğu ek eğilme talebinden kaynaklanmaktadır. Eğriler, azaltılmış kiriş enkesiti kolon yüzeyinden uzaklaştıkça çatlak oluşma olasılığının bir miktar arttığını göstermektedir.

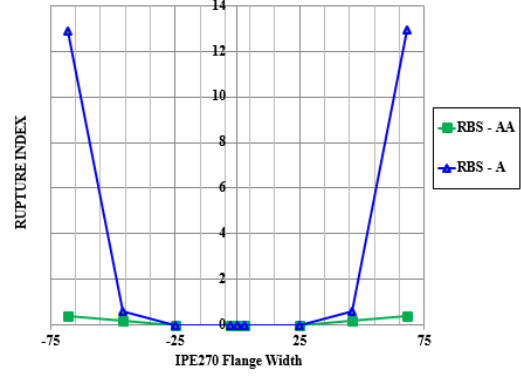


Şekil 8.63 : RBS-C ve RBS-D birleşimlerinin PEEQI ve RI indisleri.

Kiriş başlıkları ve gövdesi hizasında yer alan bağlantı levhaların kalınlıklarının, en uygun azaltılmış I-enkesitli zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşim tipinin belirlenmesi üzerindeki etkisi, RBS-A ve RBS-AA numunelerinin davranışlarının karşılaştırmalı analizi ile incelenmiştir. RBS-AA numunesinde elde edilen PEEQI ve RI değerleri, RBS-A numunesine kıyasla belirgin şekilde daha düşük seviyelerde hesaplanmıştır. Bu farklılık, ani rijitlik geçişlerinin neden olduğu gerilme yığılmalarıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle, bağlantı levhaları ile kiriş başlıkları ve gövdesi arasındaki rijitlik farkı, RBS-A numunesinde RBS-AA numunesine kıyasla daha belirgindir. Bu durum, RBS-A numunesinde çatlak oluşumu olasılığını artıran bir etken olarak değerlendirilmektedir (Şekil 8.64).



(a) PEEQI



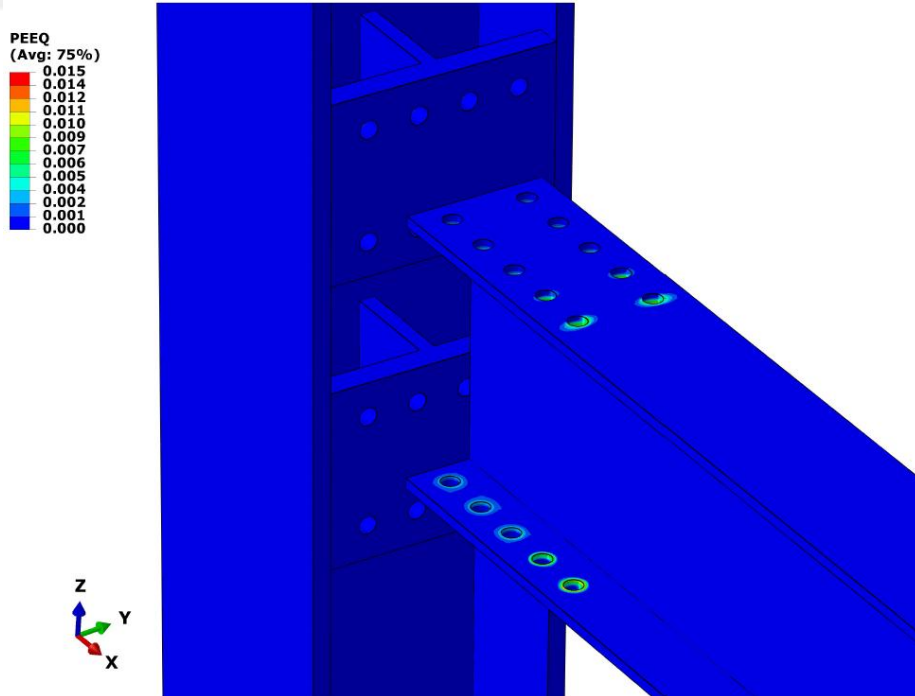
(b) RI

Şekil 8.64 : RBS-A ve RBS-AA birleşimlerinin PEEQI ve RI indisleri

8.3 Bulonlu T-parçalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi

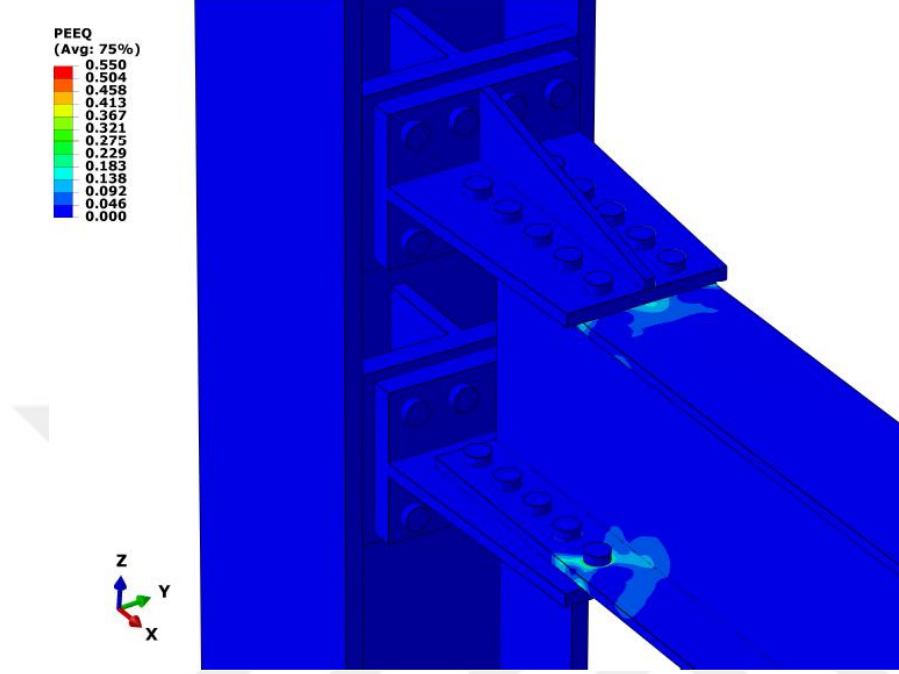
8.3.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı

%1 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 8.65).



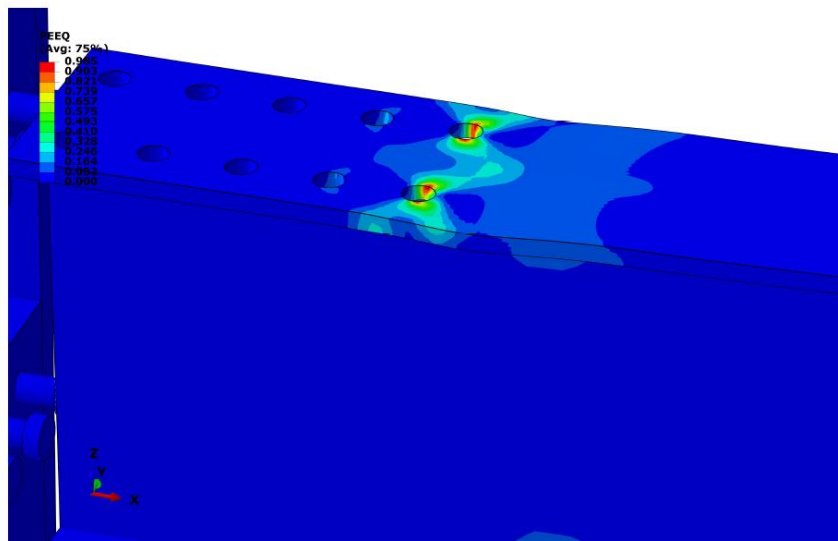
Şekil 8.65 : %1 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

%4 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirmeler kiriş başlık ve gövdesine doğru genişlemeye devam ederek ve daha belirgin hale gelmeye başlamıştır (Şekil 8.66).



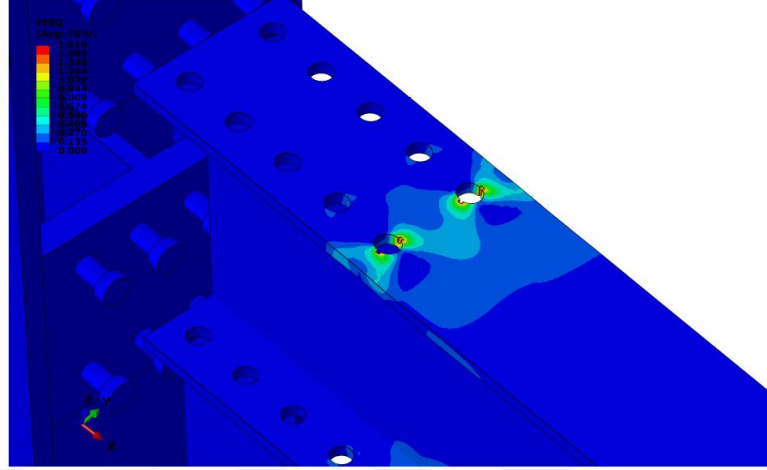
Şekil 8.66 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

%5 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirmeler kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasında artmaya devam ettiği ve kiriş başlığında yerel burkulmanın başladığı gözlemlenmiştir. (Şekil 8.67).



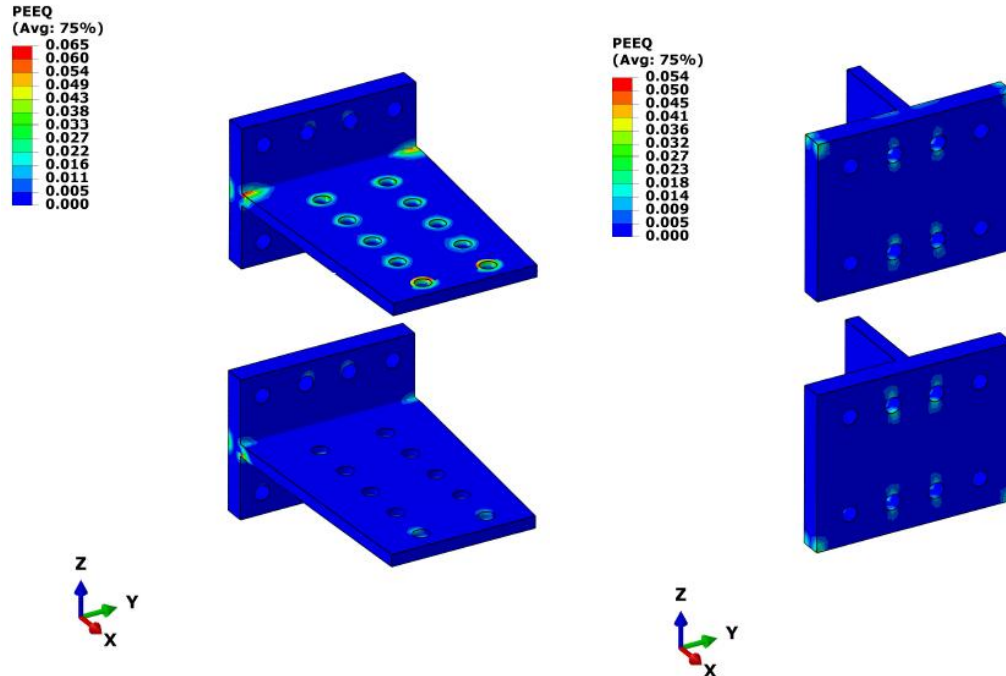
Şekil 8.67 : %5 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve kiriş başlığında yerel burkulma başlangıcı.

%6 görelî kat öteleme açısında, plastik deformasyonların artması ve hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki deliklerin kenarında yer alan bazı sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 8.68).



Şekil 8.68 : %6 görelî kat öteleme açısında çatlak oluşumu.

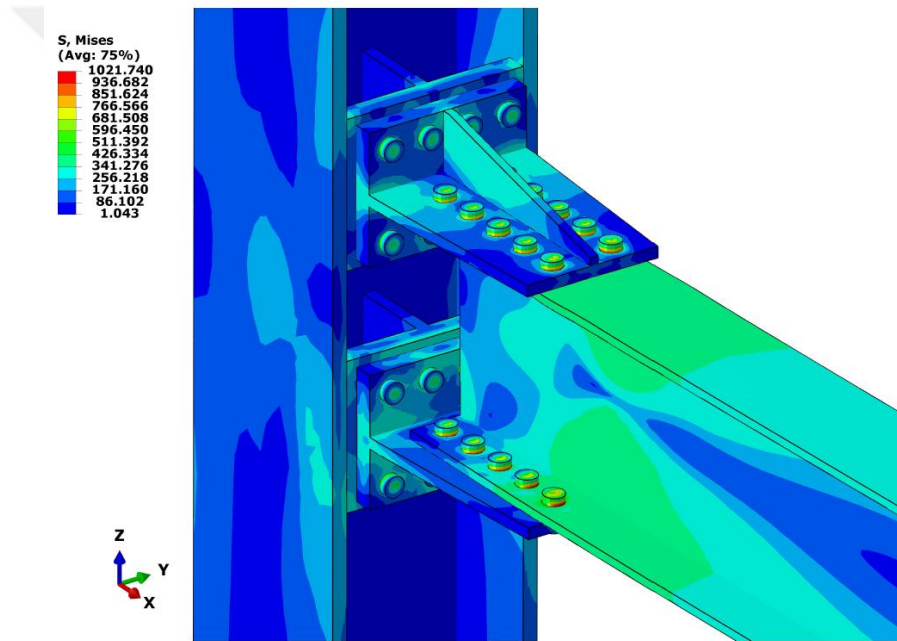
Analiz sonucunda T-parçalarda plastik deformasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.69 : T-parçalarda plastik deformasyonlar.

Bu bölgelerde elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değerleri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak merteye olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsal bölgesinde PEEQ değeri 1,62 olarak elde edilmiştir. Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçalarda elde edilen PEEQ değeri, plastik mafsalda oluşan değer in %3,3'üne (0,054) karşılık gelmektedir. Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalarda ise bu oran %4 (0,065) seviyesindedir. Bu sonuç, plastik deformasyonlarının kirişte meydana gelen plastik mafsalda yoğunlaştığını, birleşimin diğer kısımlarında ise sınırlı düzeyde plastik deformasyonun oluştuğunu göstermektedir.

%6 görel i kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.70'te gösterilmiştir.



Şekil 8.70 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

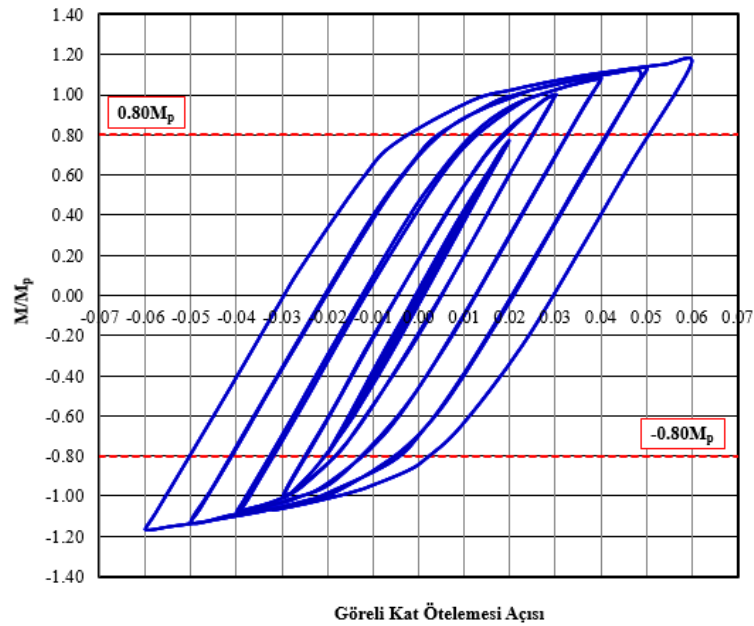
Analiz boyunca, bulonların bulunduğu enkesit incelendiğinde, bulonlar ile bulon delikleri arasındaki temas yüzeylerinde sürtünme kuvvetinin aşılmadığı, dolayısıyla bu bölgede rölatif kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, YZ düzleminde neredeyse hiç kayma gerilmesi (S23) oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, genellikle I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimlerde kullanılan kayma levhası olmaksızın yapılan bu birleşim tasarımının, hedeflendiği şekilde yeterli kayma dayanımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 8.71).



Şekil 8.71 : Analiz sonucunda elde edilen S23 kayma gerilme dağılımı.

8.3.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

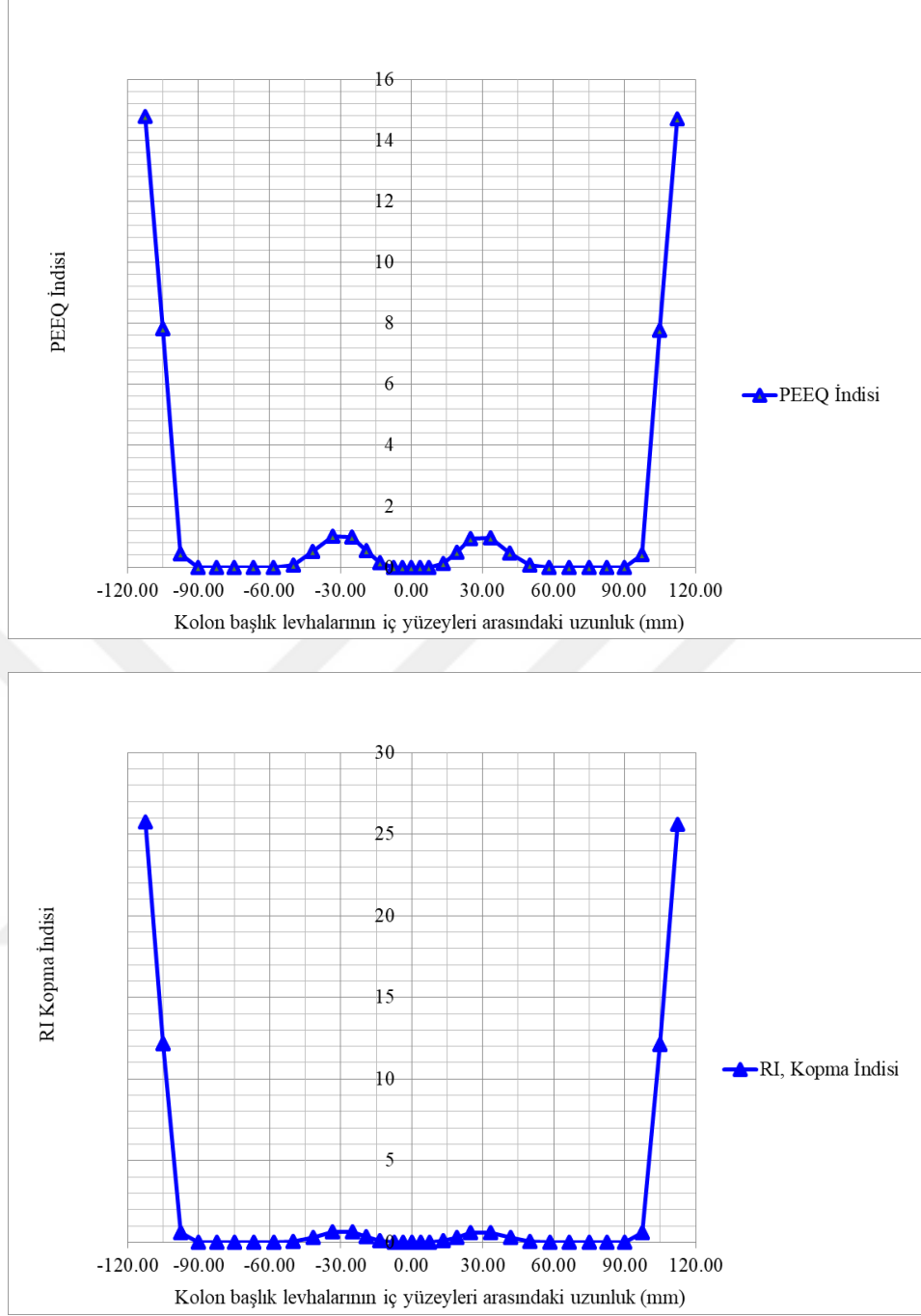
Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görelî kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %6 görelî kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.72). Sonuç olarak, tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)’da yer alan, 0,04 radyanlık görelî kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değerinin, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80’ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır.



Şekil 8.72 : Çevrimsel eğri.

8.3.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi

A-A enkesiti üzerinde PEEQI ve RI indisleri %6 göreceli kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.74'te gösterilmiştir.



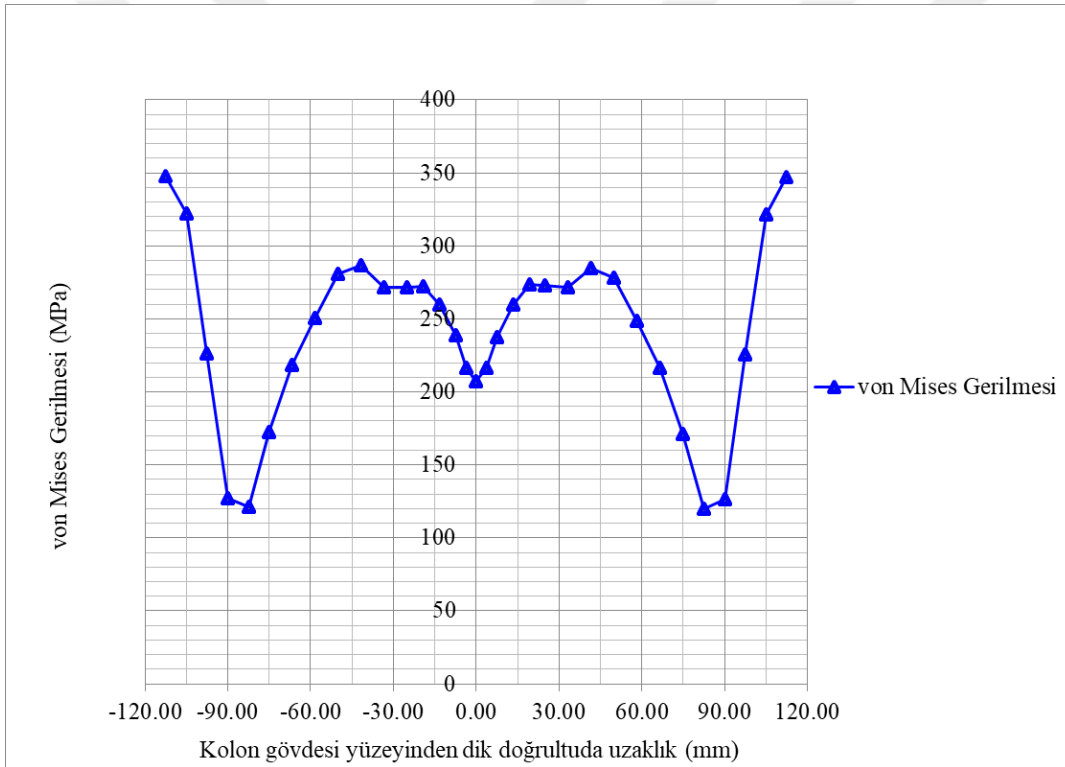
Şekil 8.74 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.

Grafikler incelendiğinde, T-parçaların başlıklarının kolon başlıkları ile birleştiği bölgeler dışında RI ve PEEQI indislerinin yaklaşık 0 (sıfır) olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. T-parçanın başlığının kolon başlığı ile birleştiği noktalarda ise indislerde ani bir artış meydana gelmiştir. Ancak bir önceki bölümde değerlendirildiği üzere, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

8.3.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirilmesi

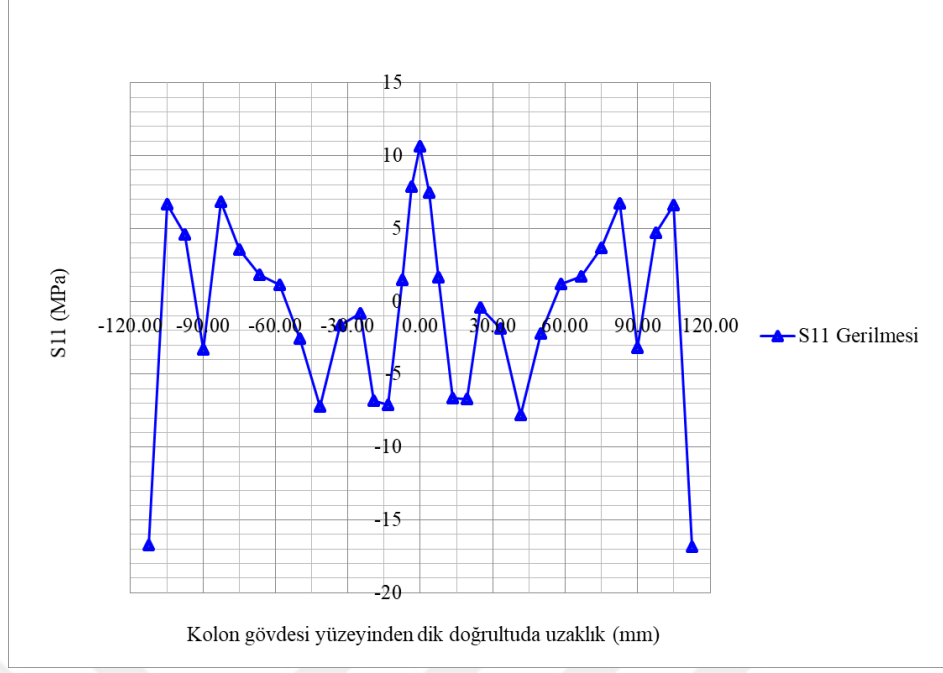
Bu bölümde daha önce belirlenen A-A enkesiti boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir.

En büyük eşdeğer von Mises gerilmesi, T-parçaların kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup 347 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalama gerilme değeri olan 237 MPa değerinin yaklaşık 1,46 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise ilk bulon deliklerinin hizasındaki enkesitte oluşmuş ve 120 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalamanın yaklaşık %51'ine karşılık gelmektedir. Bu dağılım, birleşimin maruz kaldığı yükleme altında plastik şekil değişiminin T-parçaların başlıklarının kolonla birleştiği bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir (Şekil 8.75).



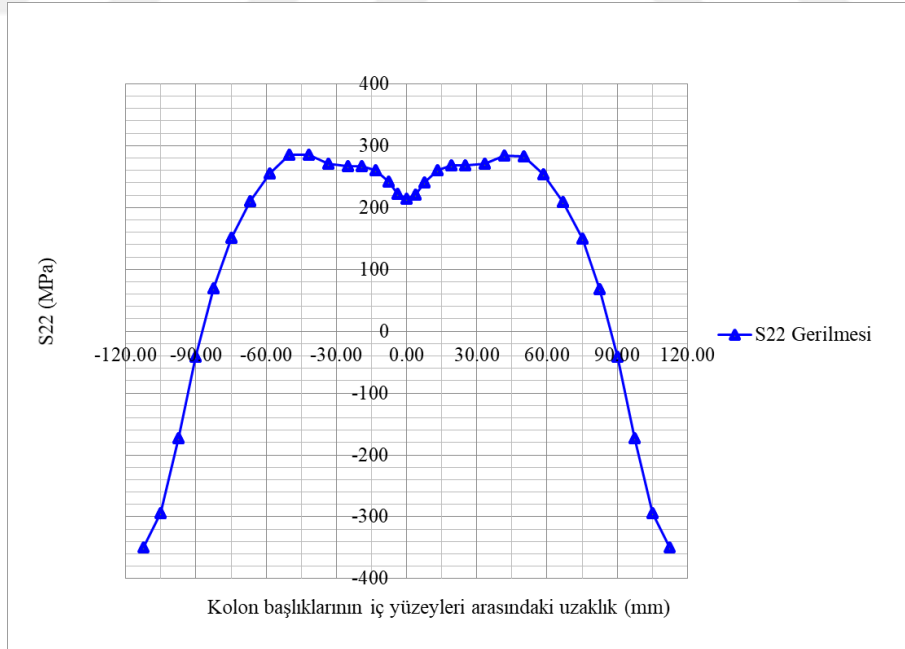
Şekil 8.75 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

En büyük S11 gerilmesi (X eksenini doğrultusunda normal gerilme) T-parçaların kenarlarında meydana gelmiş olup -17 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer bölgelerde ise -8 MPa ile 10 MPa gerilme değerleri arasında inişli çıkışlı bir dağılım sergilemiştir (Şekil 8.76).



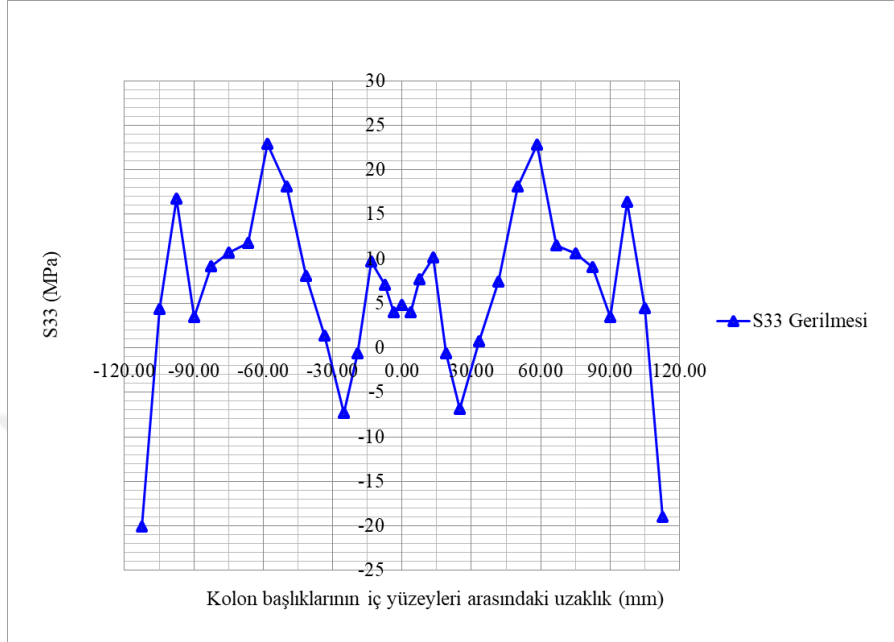
Şekil 8.76 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

S22 gerilmesi (Y eksenı doğrultusunda normal gerilme), levhanın kenar bölgelerinde -350 MPa seviyesine ulaşmış, orta bölgelerde ise bu değır 200 MPa ile 300 MPa arasında, kenar bölgelerdeki gerilmelere zıt yönlü olarak elde edilmiştir (Şekil 8.77).



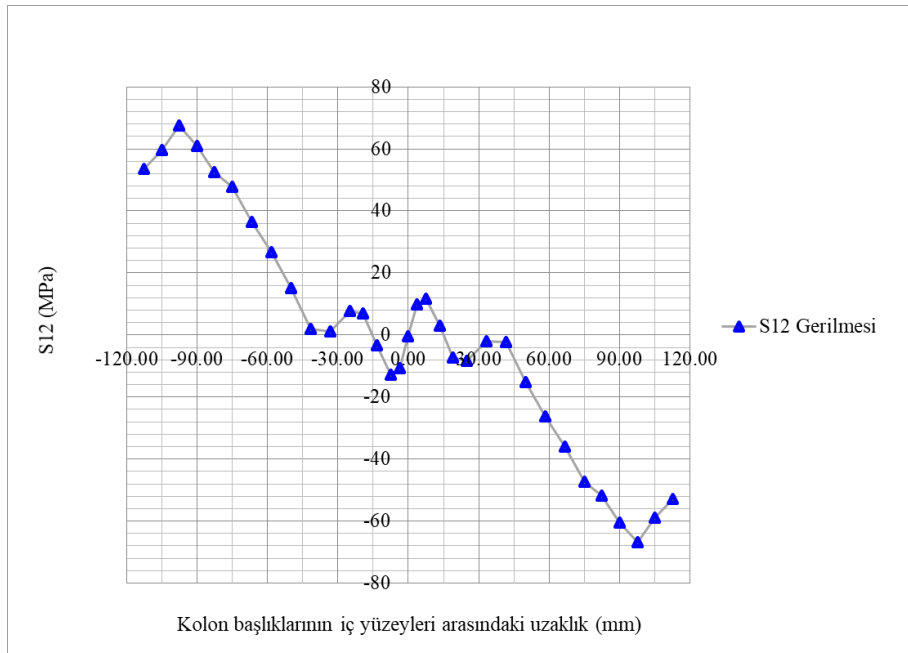
Şekil 8.77 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

S33 gerilmesi (Z eksenı doğrultusunda normal gerılme) kenar bölgelerde -20 MPa olarak elde edılmış olup, orta bölgelerde -8 MPa ile 23 MPa arasında inişli çıkışlı bir dağılım sergilemiştir (şekil 8.78).



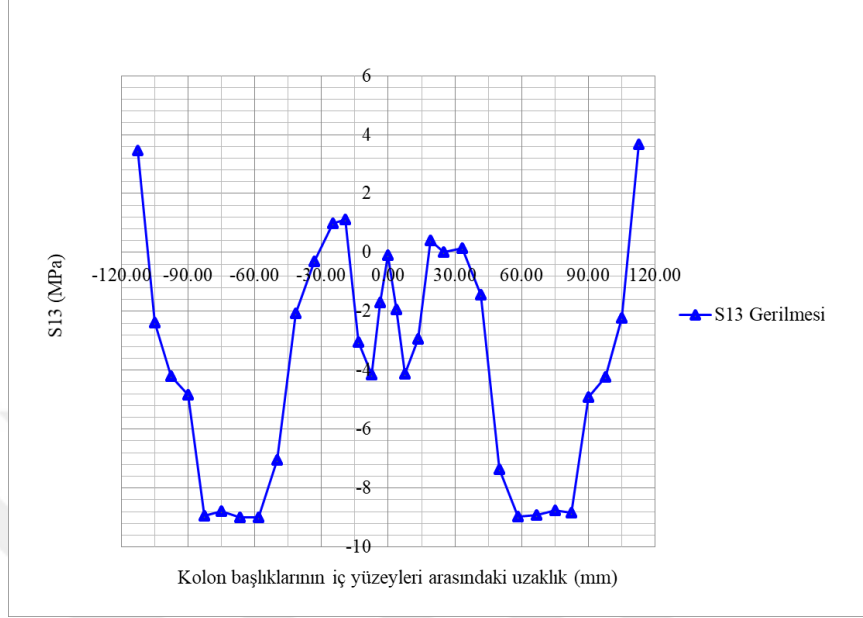
şekil 8.78 : A-A enkesiti S33 normal gerılme grafiğı.

S12 gerılme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerılması), levha kenarlarında 67 MPa seviyelerine ulaşmıştır. T parçanın merkezinde ise yaklaşık olarak 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir (şekil 8.79).



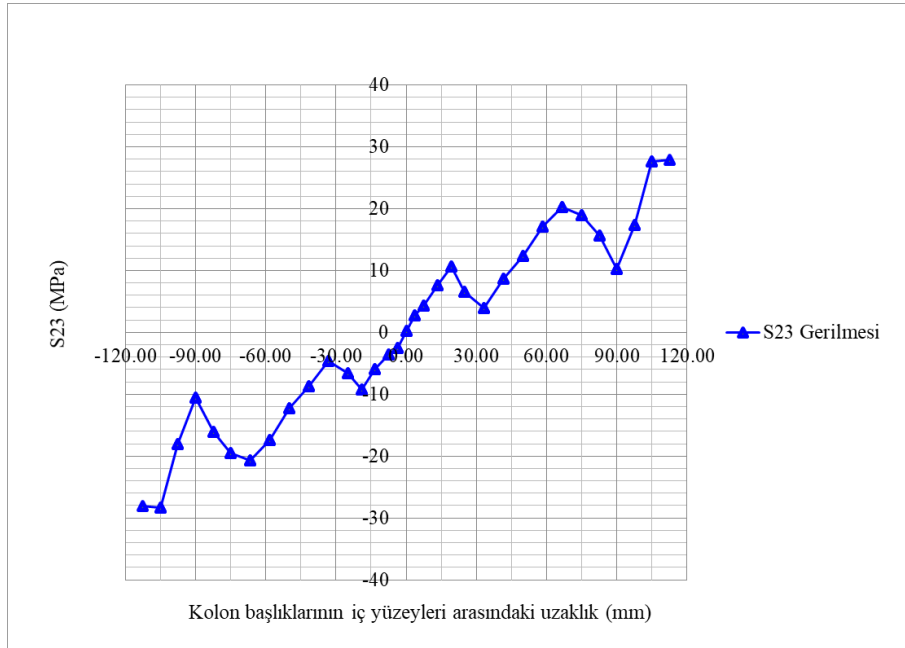
şekil 8.79 : A-A enkesiti S12 kayma gerılması grafiğı.

S13 gerilmesi (X-Z düzleminde kayma gerilmesi) bileşeni kenarlarda 3,8 MPa, merkez ile kenarın ortasında yer alan bölgede ise -9 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 8.80).



Şekil 8.80 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

S23 gerilme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), levha kenarlarında 28 MPa seviyelerine ulaşmıştır. T parçanın merkezinde ise yaklaşık olarak 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir (Şekil 8.81).



Şekil 8.81 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, özellikle T-parçaların başlıklarının kolonla birleştiği bölgelerde gerilme yığılmalarının meydana geldiği ve orta bölgelerinde ise, kenarlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, levha merkezine göre genel bir simetri eğilimi sergilemesi, plastik deformasyonların plastik mafsal bölgesinde simetrik şekilde yayılması ve çatlak oluşumunun kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki deliklerin bulunduğu kiriş enkesitinde oluşup deliklerden kenarlara doğru dengeli biçimde ilerlemesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

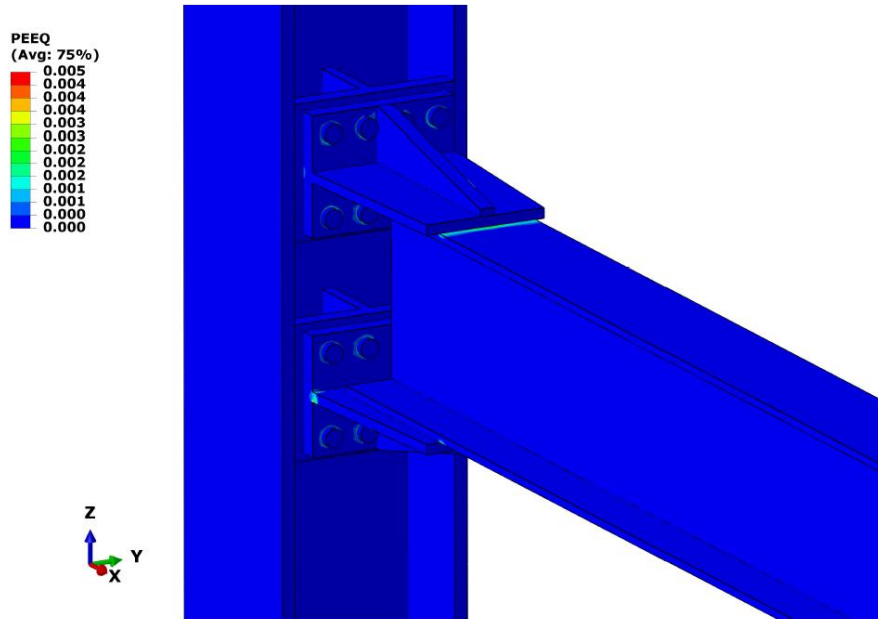
8.4 Kaynaklı T-parçalı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon

Birleşimi

Birleşim modelinin sonlu eleman analizine ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

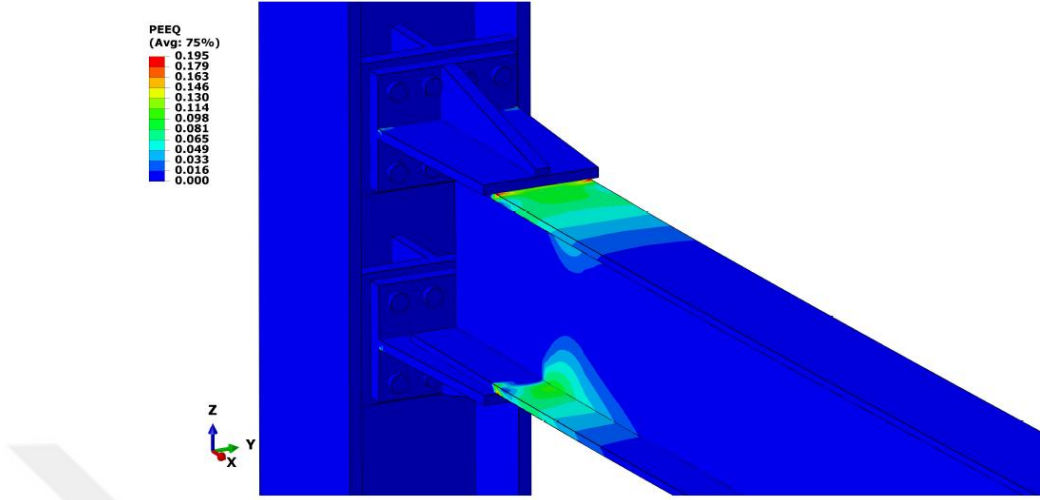
8.4.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı

%2 göreceli kat öteleme açısına ulaşıldığında, kiriş başlığında yer alan T-parçanın ucundaki kiriş enkesitinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 8.82).



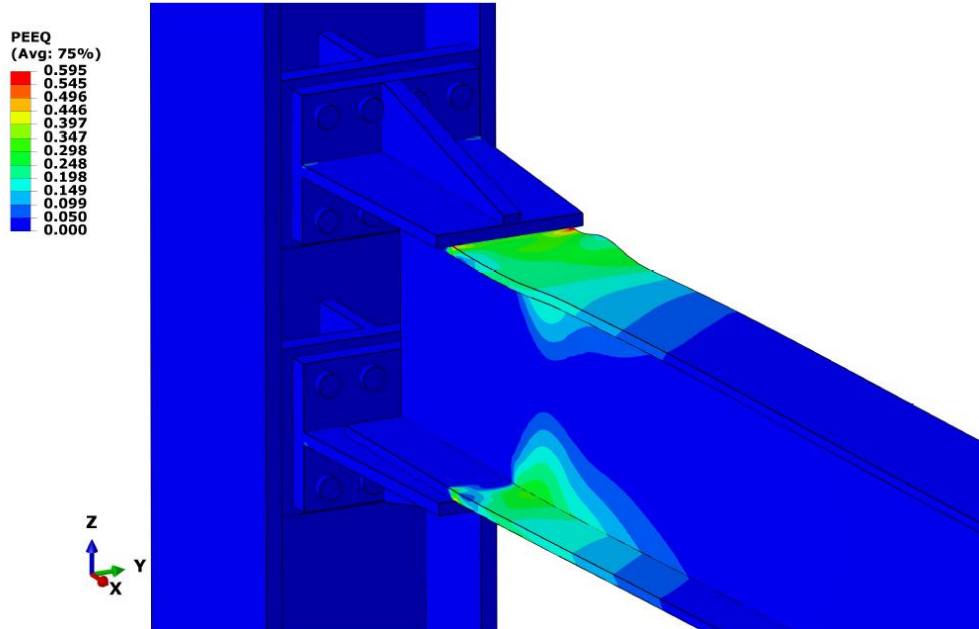
Şekil 8.82 : %2 göreceli kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

%4 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirmeler kiriş başlık ve gövdesine doğru belirgin bir şekilde yayılmıştır (Şekil 8.83).



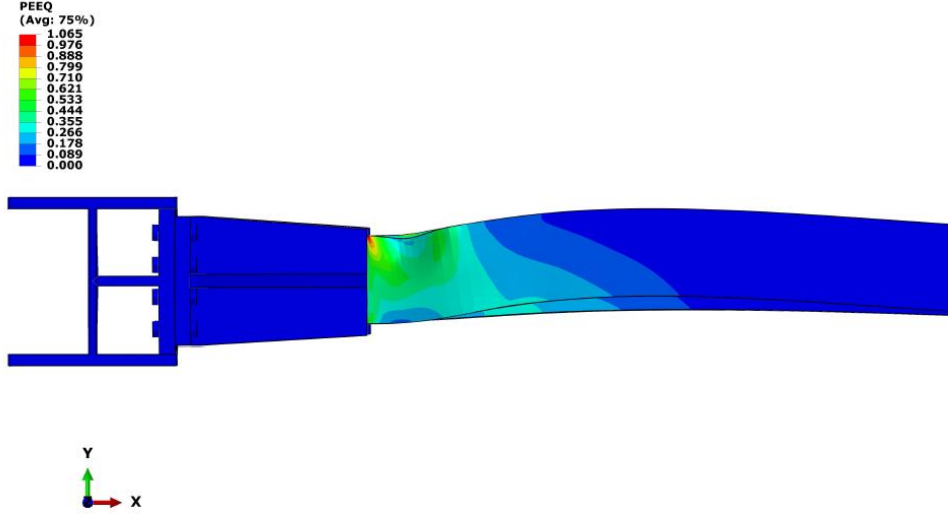
Şekil 8.83 : %4 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

%5 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirmelerin arttığı ve %6 görel kat öteleme açısında kiriş başlığında yerel burkulmanın deformasyonlarının meydana gelmeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.84).



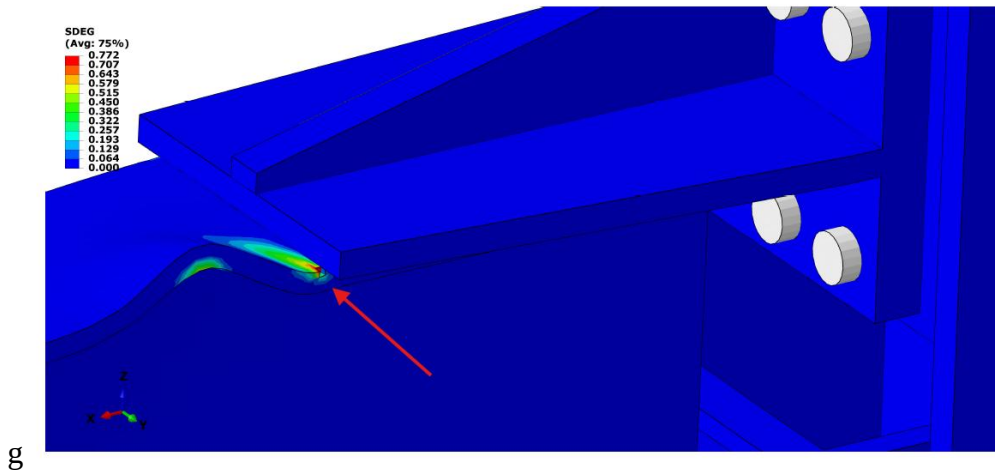
Şekil 8.84 : %6 görel kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve kiriş başlığında yerel burkulma başlangıcı.

Bu birleşimin sonlu eleman analizleri %7 görelî kat öteleme açısına kadar sürdürölmüştür. %7 görelî kat öteleme açısında yerel burkulma deformasyonu artmış ve kirişte yanal burulmalı burkulma davranışı ortaya çıkmıştır (Şekil 8.85).



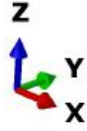
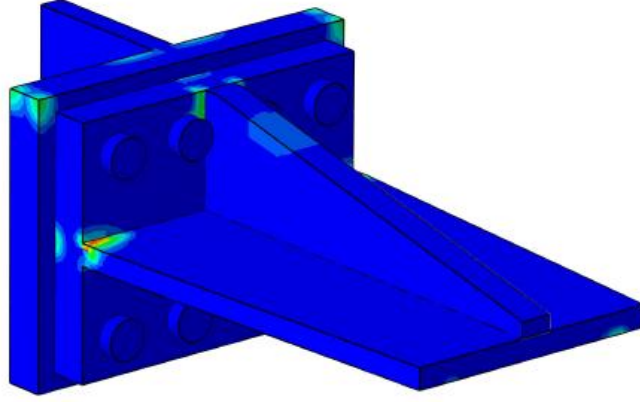
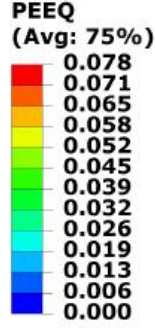
Şekil 8.85 : %7 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve kirişte yanal burulmalı burkulma davranışı.

Plastik deformasyonlarının artması, hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, kiriş başlığında yer alan T-parçanın uç bölgesindeki kiriş enkesitinde, kiriş başlığının kenarında yer alan bazı sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, sonlu eleman analizinde çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 8.86).



Şekil 8.86 : %7 görelî kat öteleme açısında yerel burkulma davranışı ve çatlak oluşumu.

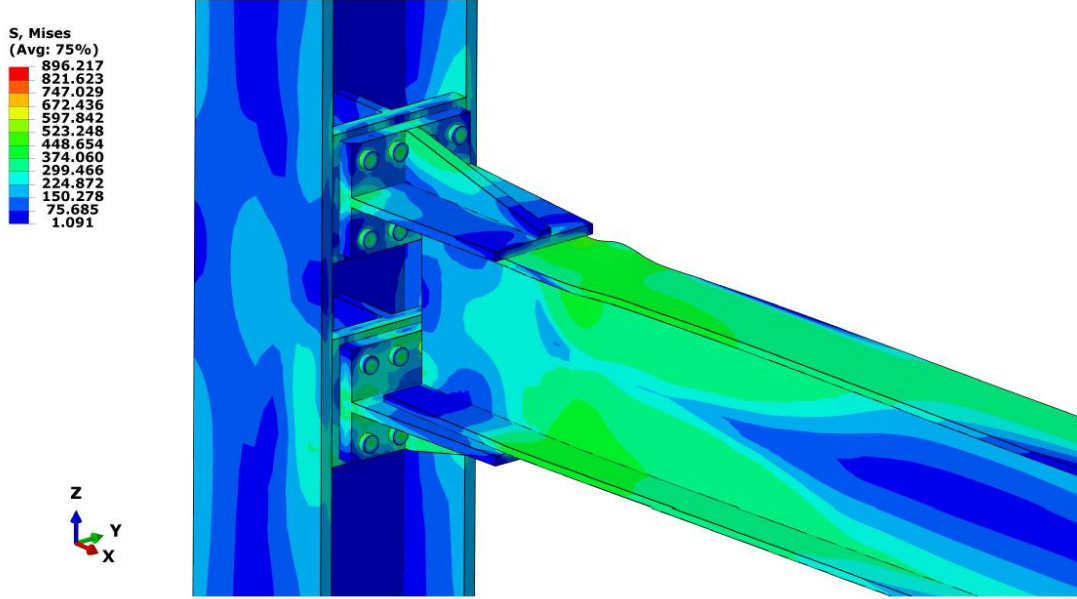
Analiz sonucunda T-parçalarda plastik deformasyonların oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 8.87).



Şekil 8.87 : T-parçalarda plastik deformasyonlar.

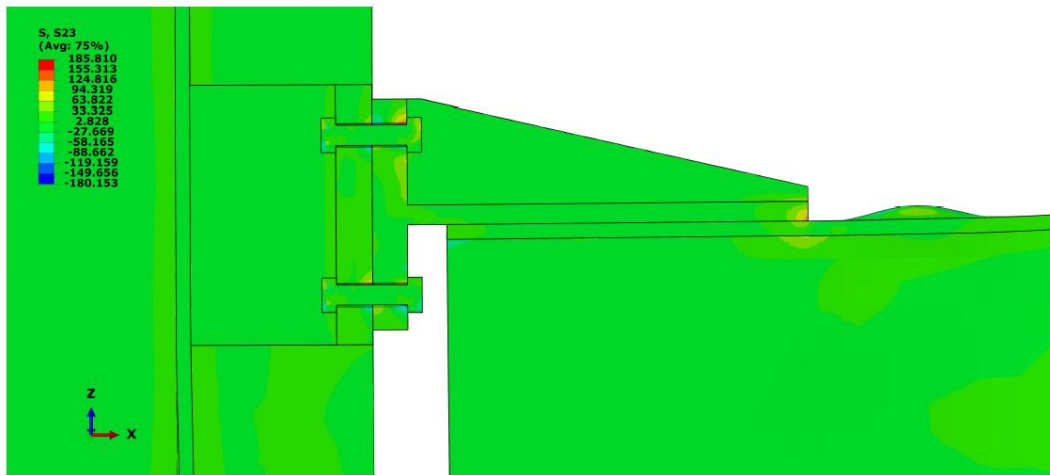
Bu bölgelerde elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değerleri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak mertebe olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsallarda PEEQ değeri 0.60 olarak elde edilmiştir. Kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçalarda elde edilen PEEQ değeri, plastik mafsalda oluşan değer yaklaşık %10,8'ine (0.065) karşılık gelmektedir. Kiriş başlıklarına birleşen T-parçalarda ise bu oran yaklaşık %13 (0.078) seviyesindedir. Bu sonuç, plastik deformasyonların kirişte meydana gelen plastik mafsalda yığıldığını; birleşimin diğer kısımlarında ise sınırlı düzeyde plastik deformasyon oluştuğunu göstermektedir.

%6 göreceli kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.88'de gösterilmiştir.



Şekil 8.88 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

Analiz boyunca, bulonların bulunduğu enkesit incelendiğinde, bulonlar ile bulon delikleri arasındaki temas yüzeylerinde sürtünme kuvvetinin aşılmadığı, dolayısıyla bu bölgede rölatif kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu nedenle, YZ düzleminde neredeyse hiç kayma gerilmesi (S23) oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, genellikle I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimlerde kullanılan kayma levhası olmaksızın yapılan bu birleşim tasarımının, hedeflendiği şekilde yeterli kayma dayanımına sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 8.89).

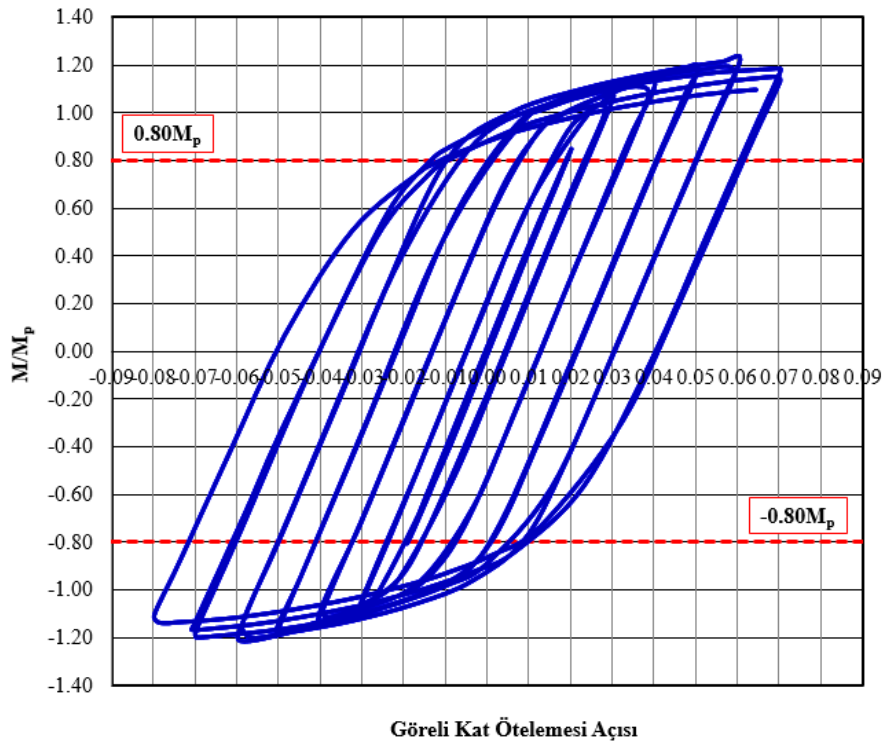


Şekil 8.89 : Analiz sonucunda elde edilen S23 kayma gerilme dağılımı.

8.4.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görel kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %6 görel kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.90). Sonuç olarak, kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)'da yer alan, 0,04 radyan görel kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değerinin, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır.

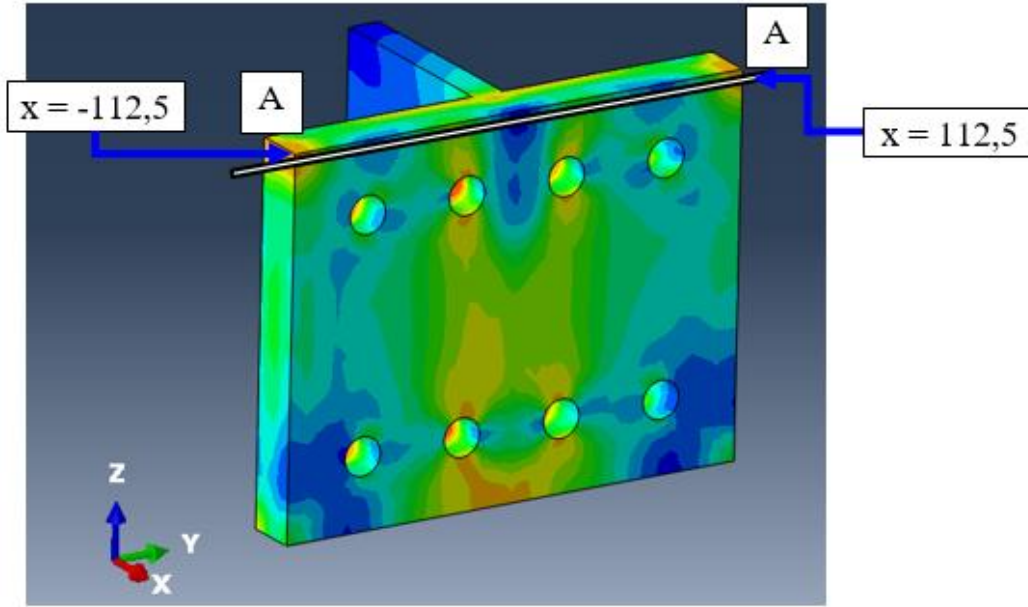
Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, çevrimsel eğrinin formu değerlendirildiğinde, tekrarlı yükler altında oldukça iyi bir performans göstererek (yüksek dayanım ve enerji sönmleme kapasitesi), eğilme momenti kapasitesi %4 görel kat öteleme açısında kirişin plastik eğilme momenti dayanımının 1,15 katına ($1,15M_p$) ulaşmıştır. Çevrimsel eğri incelendiğinde, %6 görel kat öteleme açısında başlayan yerel burkulma davranışının ve %7 görel kat öteleme açısında meydana gelen yanal burulmalı burkulma davranışı ile çatlak oluşumunun birleşimin dayanımında azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.90 : Çevrimsel eğri.

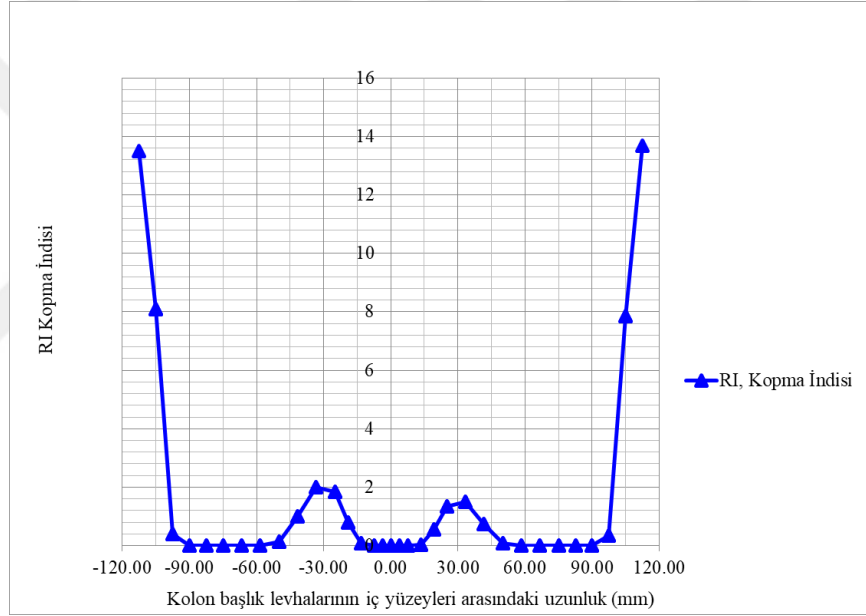
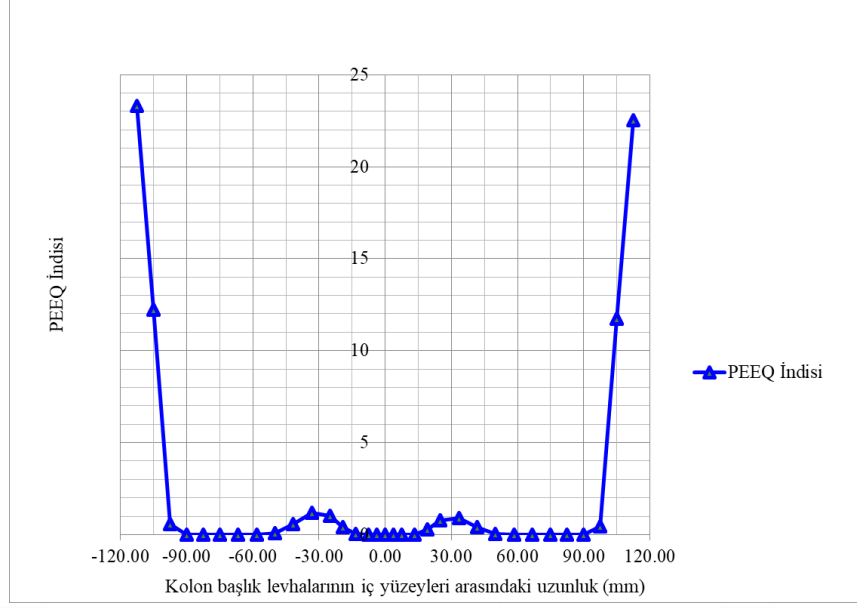
8.4.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi

Analiz sonucunda, kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın başlığında plastik deformasyonların gözlemlendiği bölgede PEEQI ve RI indisleri değerlendirilmiştir. Bu indisler, T-parçanın başlığının üst lifinden geçtiği varsayılan A-A enkesiti boyunca hesaplanmıştır (Şekil 8.91). Hesaplama kullanılan parametreler, bu enkesit üzerindeki elemanlara ait düğüm noktalarından elde edilmiştir.



Şekil 8.91 : A-A enkesiti.

A-A enkesiti üzerinde PEEQI ve RI indisleri %6 göreceli kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.92’de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, T-parçaların başlıklarının kolon başlıkları ile birleştiği bölgeler dışında RI ve PEEQI indislerinin yaklaşık 0 (sıfır) olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. T-parçanın başlığının kolon başlığı ile birleştiği noktalarda ise indislerde ani bir artış meydana gelmiştir. Ancak, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

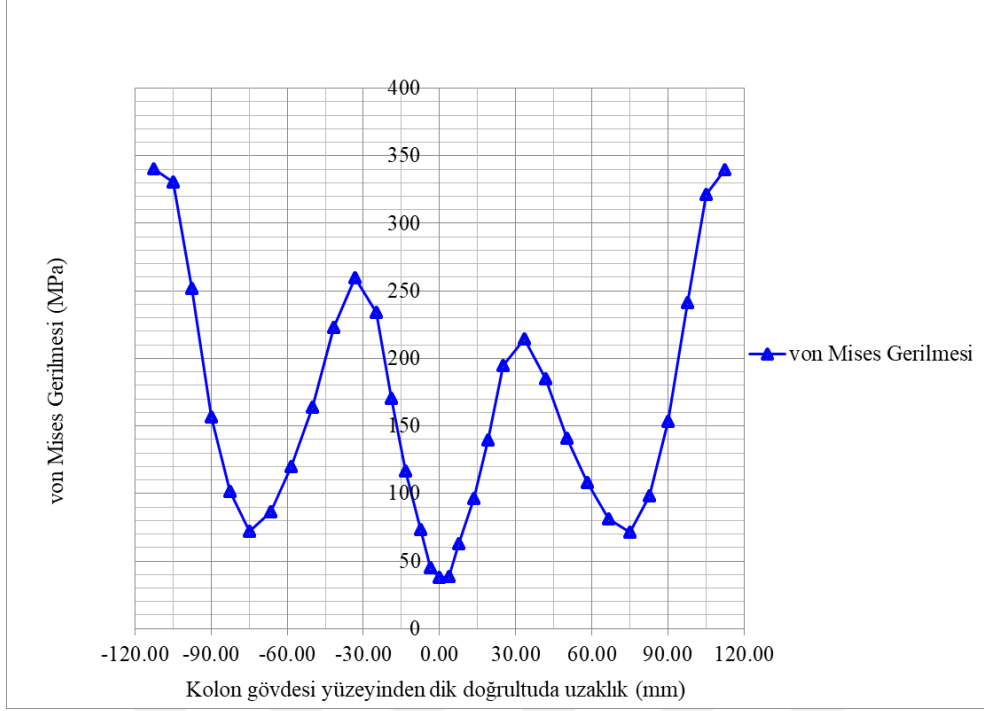


Şekil 8.92 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.

8.4.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirmesi

Bu bölümde daha önce belirlenen A-A enkesiti boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir.

En büyük eşdeğer von Mises gerilmesi, T-parçaların kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup 340,18 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalama gerilme değeri olan 154,00 MPa'nın yaklaşık 2,21 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise birleşim bölgesinin orta kısımlarında oluşmuş ve 37,63 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalamanın yaklaşık %24,4'üne karşılık gelmektedir (Şekil 8.93).



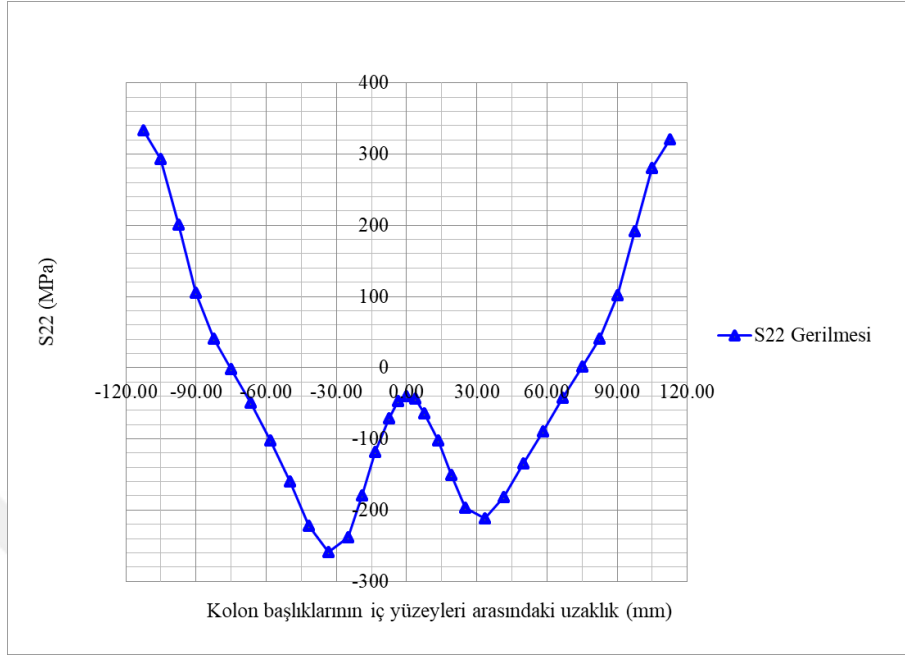
Şekil 8.93 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

En büyük S11 gerilmesi (X eksenı doğrultusunda normal gerilme) T-parçaların kenarlarında meydana gelmiş olup 14,76 MPa olarak ölçülmüştür. Diğer bölgelerde ise -15 MPa ile 10 MPa gerilme değerleri arasında inişli çıkışlı bir dağılım sergilemiştir (Şekil 8.94).



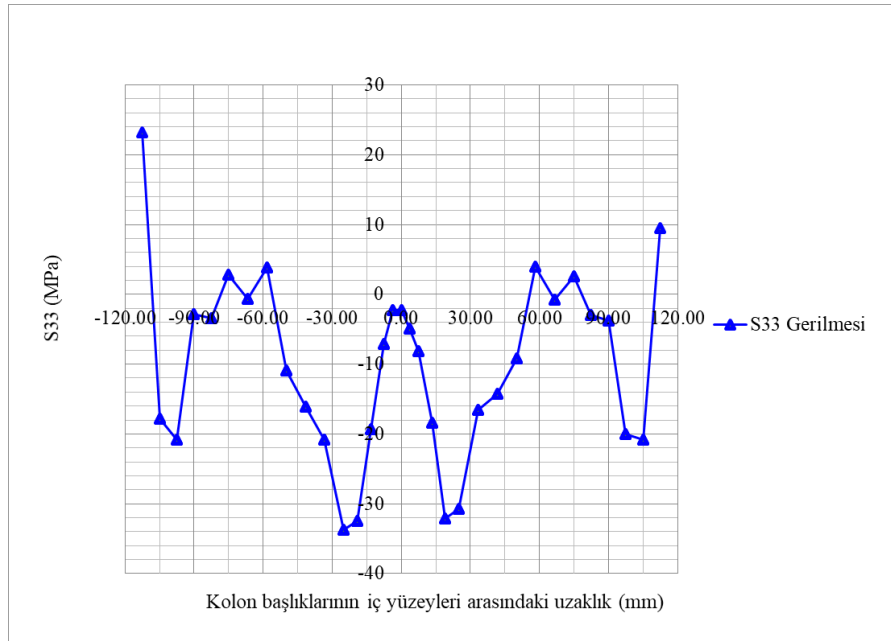
Şekil 8.94 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

S22 gerilmesi (Y eksenı dođrultusunda normal gerilme), levhanın kenar bđlgelerinde 333 MPa seviyesine ulařmıř, en dūřuk deđer ise orta bđlgelerde 259 MPa olarak kenar bđlgelerdeki gerilmelere zıt yđnlđ olarak elde edilmiřtir (řekil 8.95).



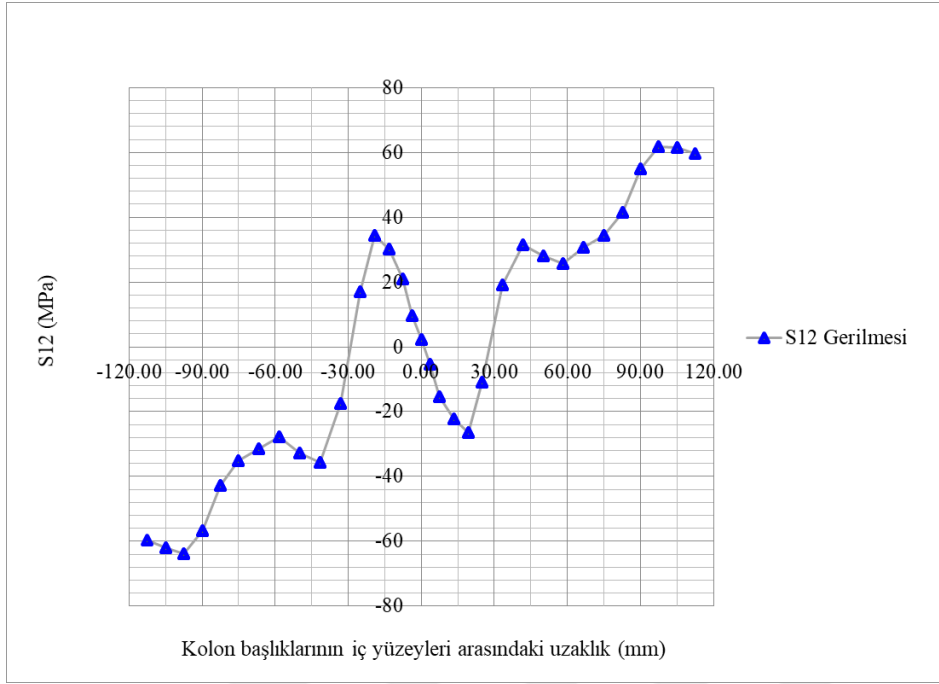
şekil 8.95 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

S33 gerilmesi (Z eksenı doğrultusunda normal gerilme) kenar bđlgelerde -25 MPa olarak elde edilmiş olup, orta bđlgelerde -5 MPa ile 30 MPa arasında artış ve azalışlar iğer bir dağılım sergilemiştir (şekil 8.96).



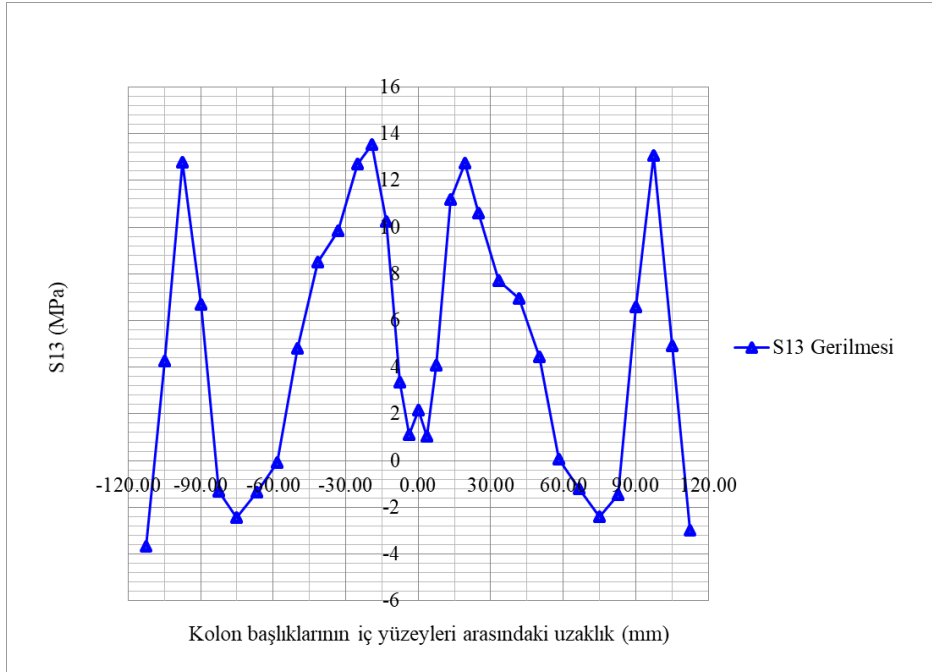
şekil 8.96 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

S12 gerilme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), levha kenarlarında 62 MPa seviyelerine ulaşmıştır (Şekil 8.97).



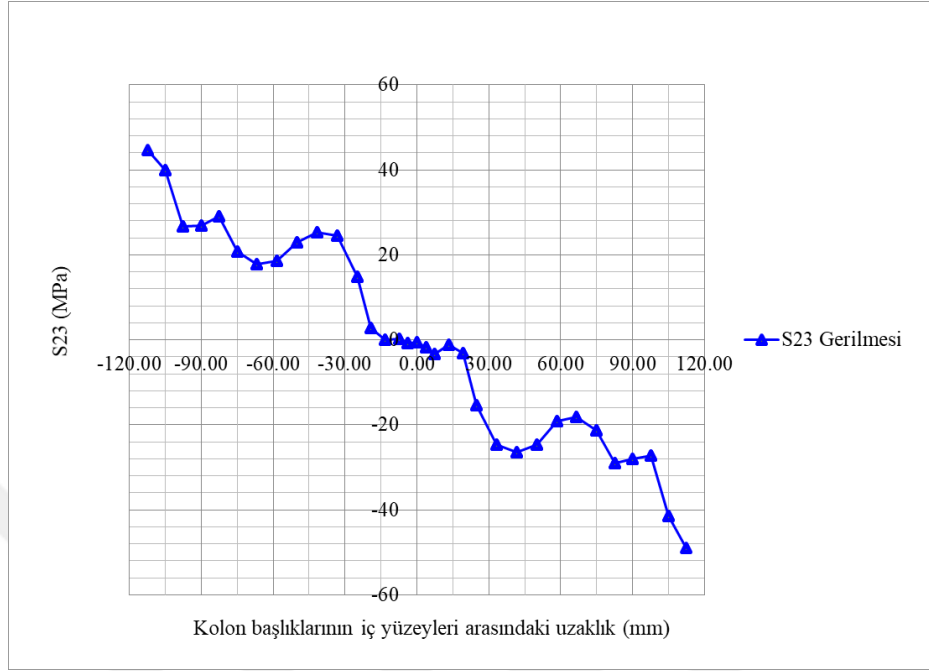
Şekil 8.97 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

S13 gerilmesi (X-Z düzleminde kayma gerilmesi) -3 MPa ile 14 MPa arasında artış ve azalışlar içeren bir dağılım sergilemiştir (Şekil 8.98).



Şekil 8.98 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

S23 gerilme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), levha kenarlarında 48 MPa seviyelerine ulaşmıştır. T parçanın merkezinde ise yaklaşık olarak 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir (Şekil 8.99).



Şekil 8.99 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

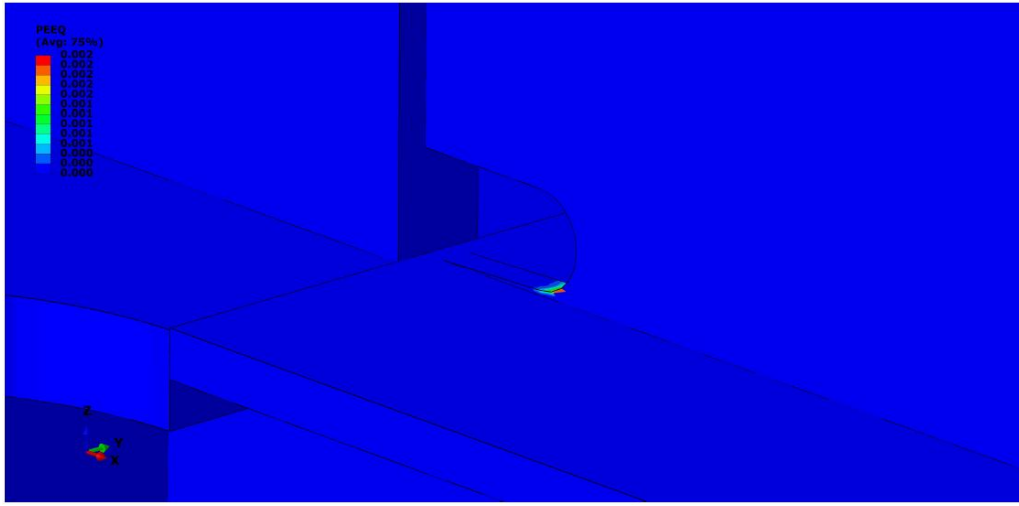
Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, özellikle T-parçaların başlıklarının kolonla birleştiği bölgelerde gerilme yığılmalarının meydana geldiği ve orta bölgelerde ise, kenarlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, levha merkezine göre genel bir simetri eğilimi sergilemesi, %6 göreceli kat öteleme açısında plastik deformasyonların plastik mafsallarda simetrik şekilde yayılması ve çatlak oluşumunun henüz meydana gelmemesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

8.5 Tam Penetrasyonlu Küt Kaynaklı I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi

Birleşim modelinin sonlu eleman analizine ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

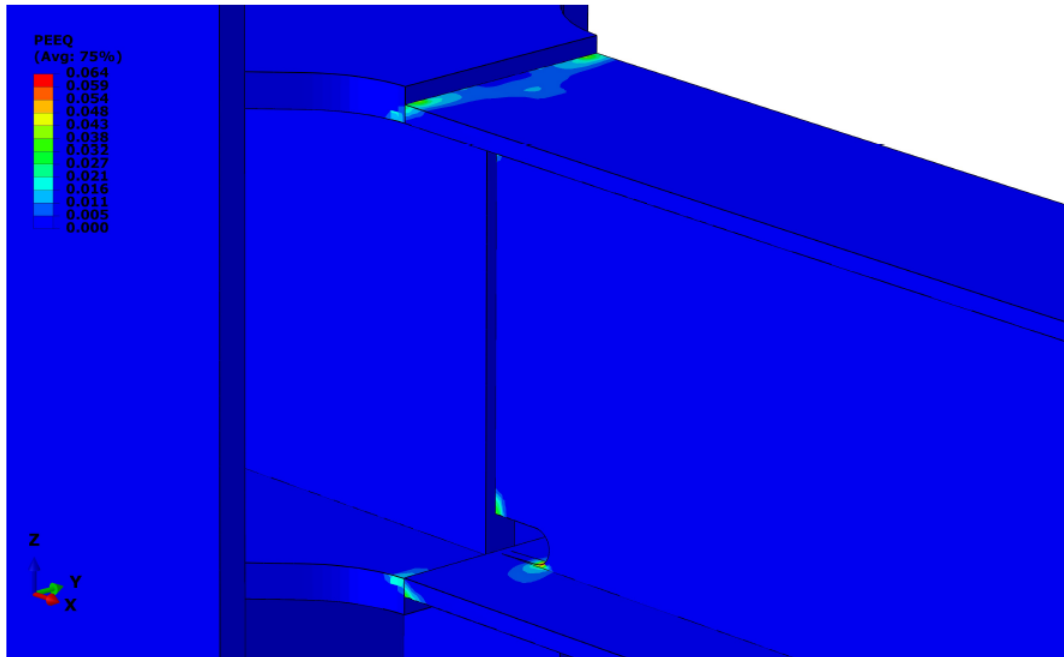
8.5.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı

%1 göreceli kat öteleme açısına ulaşıldığında, kaynak ulaşım deliklerinin bulunduğu bölgeyle sınırlı plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 8.100).



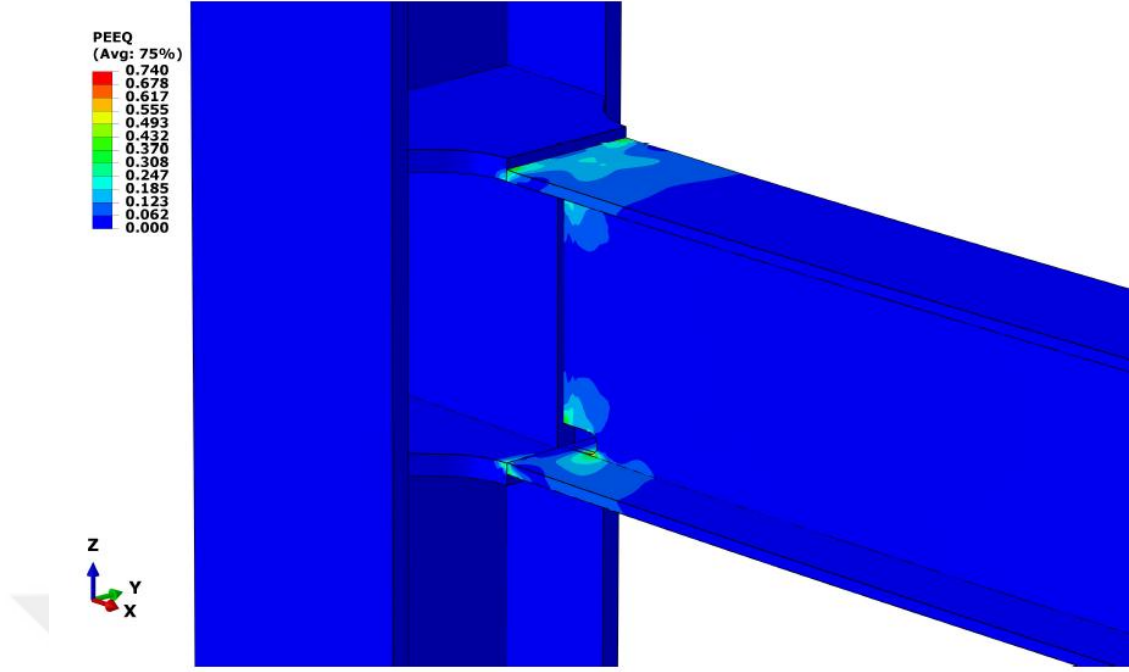
Şekil 8.100 : %1 görel kat öteleme açısında kaynak ulaşım deliklerinin etrafında plastik deformasyon başlangıcı.

%2 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, kiriş ucu enkesitinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmiştir.(Şekil 8.101).



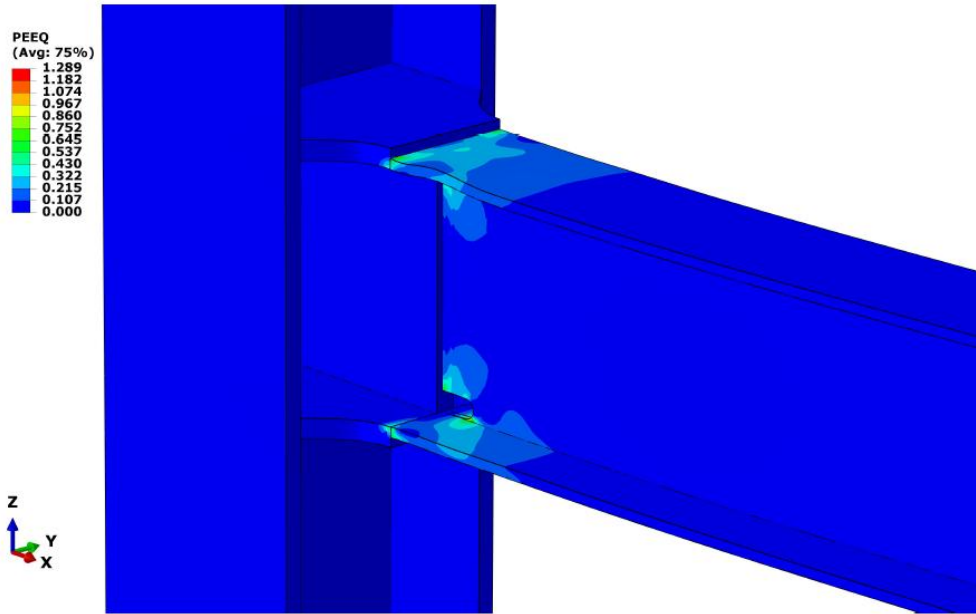
Şekil 8.101 : %2 görel kat öteleme açısında kiriş ucu enkesitinde plastik deformasyonlar.

%4 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik deformasyonlar kaynak ulaşım delikleri etrafında ve kiriş ucu enkesitinde yığılmaya başlamıştır (Şekil 8.102).



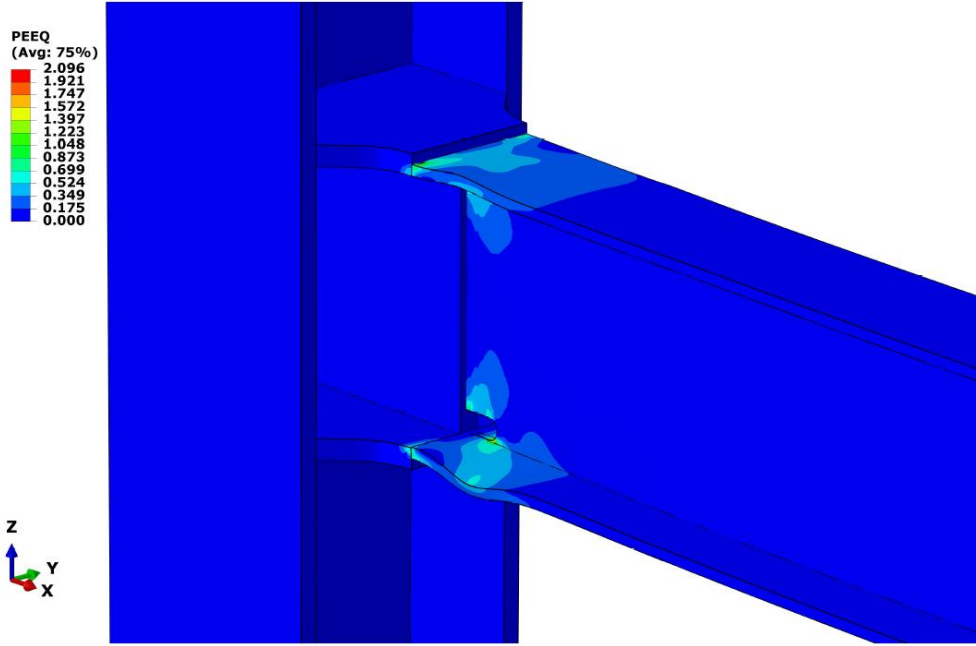
Şekil 8.102 : %4 görelî kat öteleme açısında kiriş ucu enkesitinde plastik deformasyonlar.

%5 görelî kat öteleme açısında, kiriş başlığında yerel burkulma oluşmaya başlamıştır (Şekil 8.103).



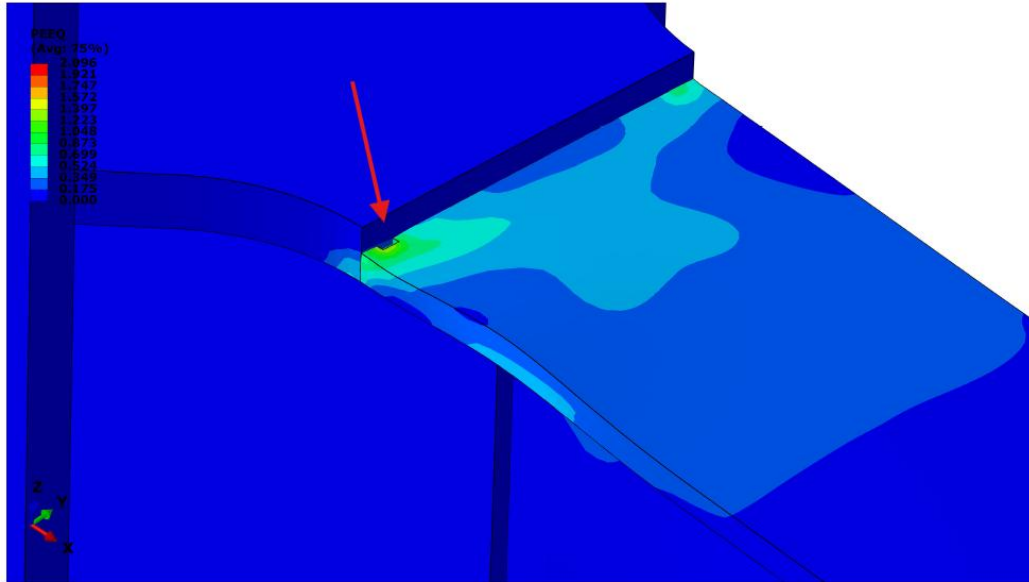
Şekil 8.103 : %5 görelî kat öteleme açısında kiriş başlığında yerel burkulma oluşumu.

%6 görelî kat öteleme açısında, kiriş başlığında yerel burkulma deformasyonlarının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.104).



Şekil 8.104 : %6 görelî kat öteleme açısında yerel burkulma deformasyonu.

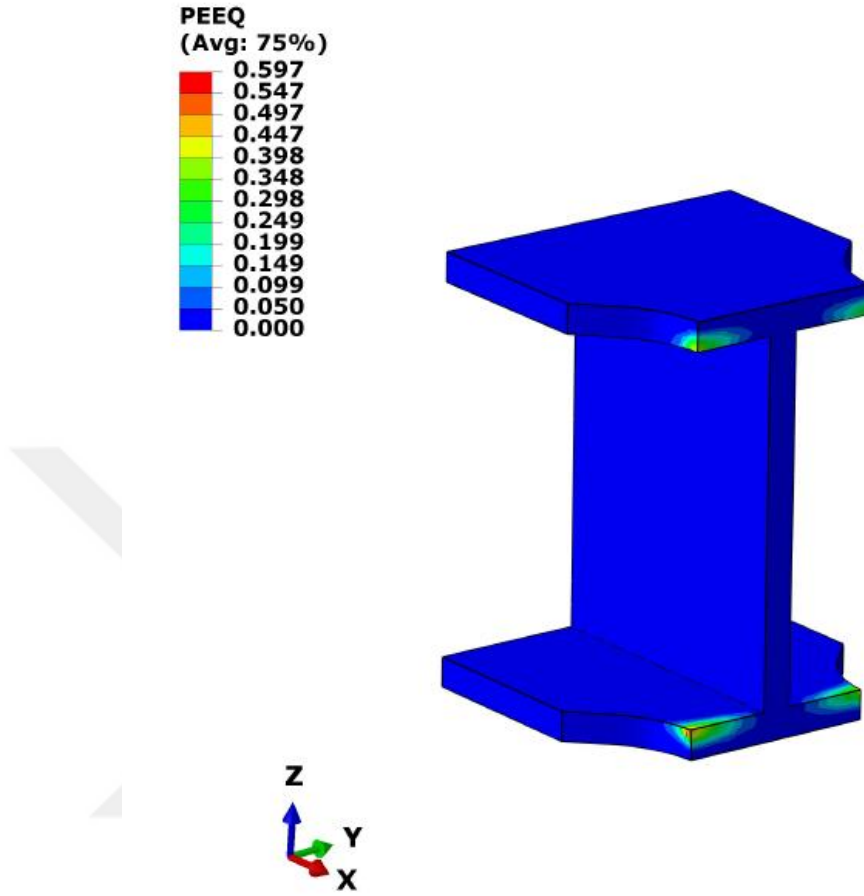
Plastik deformasyonların artması ve hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, kiriş ucunda kiriş başlığının kenarında yer alan bazı sonlu elemanların silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 8.105).



Şekil 8.105 : %6 görelî kat öteleme açısında çatlak oluşumu.

Analiz sonucunda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği bölgede plastik deformasyon oluşmamıştır. Ancak, kiriş

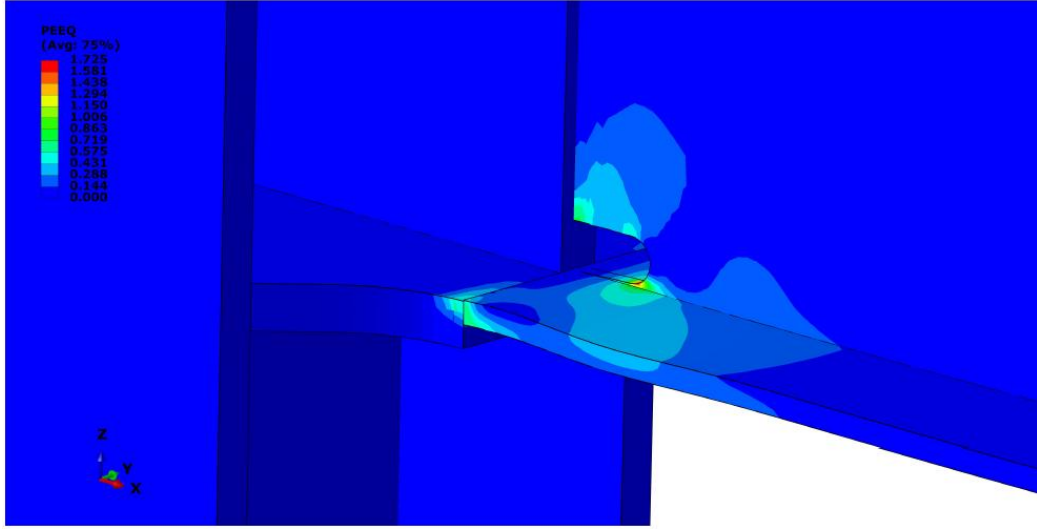
başlıkları ile bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, özellikle levha köşelerinde plastik deformasyon meydana gelmiştir (Şekil 8.106).



Şekil 8.106 : Başlık bağlantı levhalarında plastik deformasyonları.

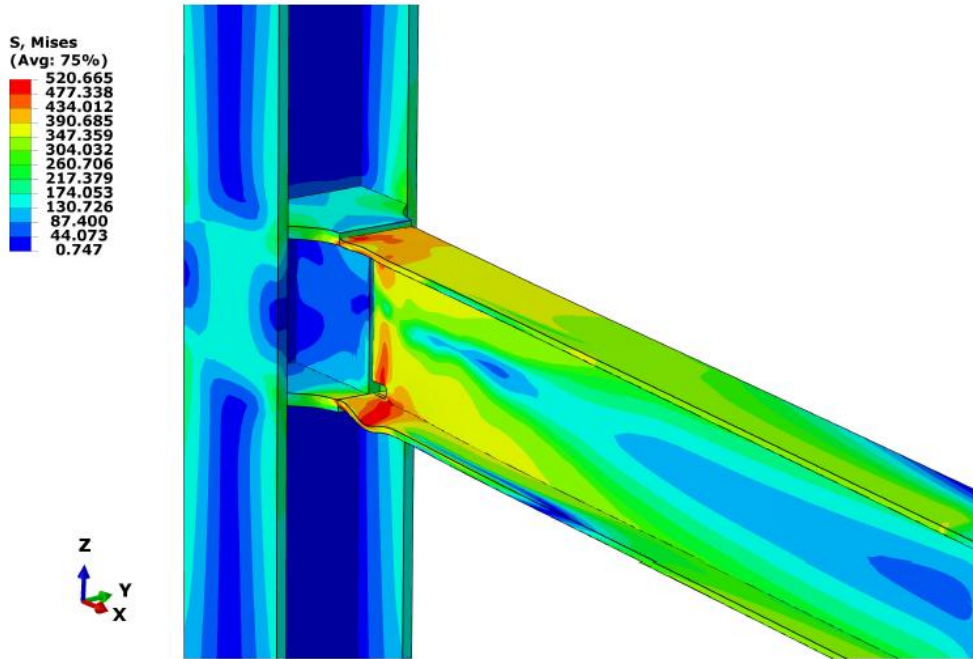
Bu bölgede elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değeri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak mertebe olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsallarda elde edilen PEEQ değeri yaklaşık 1,55 seviyesindedir. Kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının, kolon başlıklarının uç kısmıyla birleştiği bölgede elde edilen PEEQ değeri ise bu değer %38'ine karşılık gelmekte olup yaklaşık 0,60 seviyesindedir. Plastik mafsallarda kiriş ucunda olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu bölgede yüksek plastik deformasyonların elde edilmesinin beklenen bir durum olduğu değerlendirilmiştir.

Analiz sonucunda, kaynak ulaşım deliklerinin bulunduğu bölgede yüksek seviyede plastik deformasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ancak, bu bölgedeki plastik şekil değiştirmelere rağmen herhangi bir çatlak oluşumu tespit edilmemiştir (Şekil 8.107).



Şekil 8.107 : Kaynak ulaşım deliklerinin etrafında plastik deformasyonlar.

%6 görelî kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.108’de gösterilmiştir.

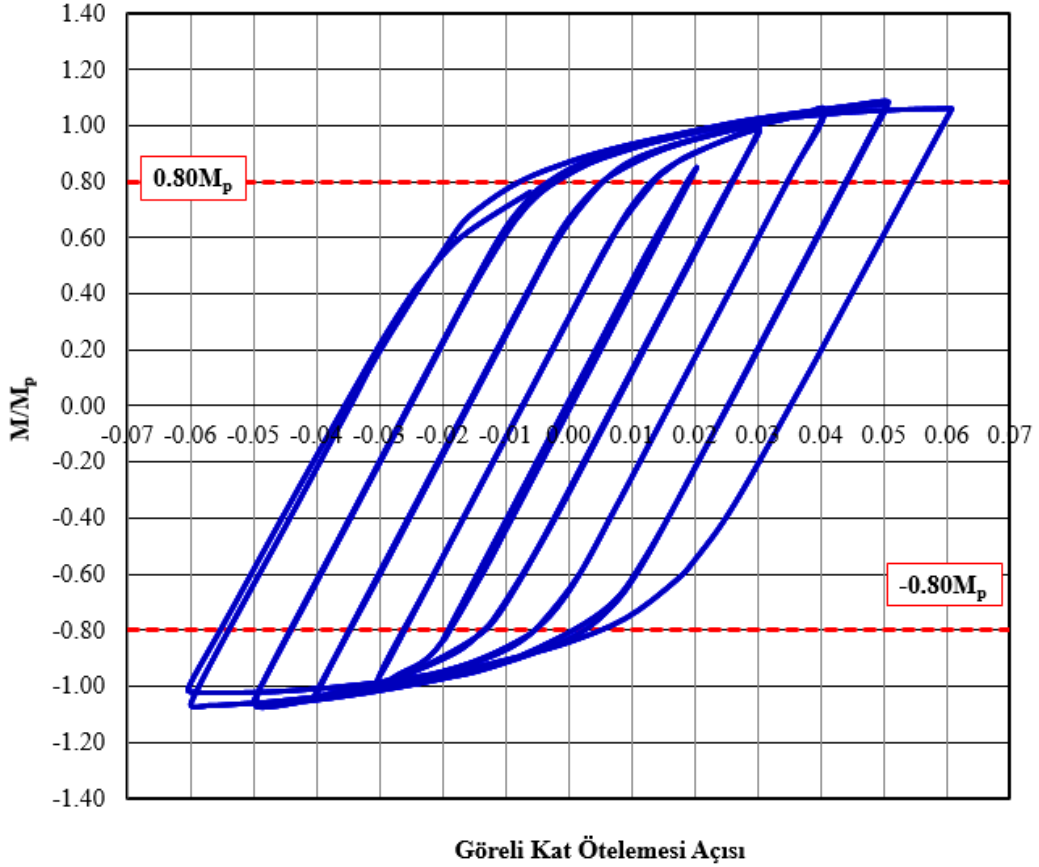


Şekil 8.108 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

8.5.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görelî kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %6 görelî kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.100). Sonuç olarak, tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-

enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)'da yer alan, 0,04 radyan görelî kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değeri, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır (Şekil 8.109).



Şekil 8.109 : Çevrimsel eğri.

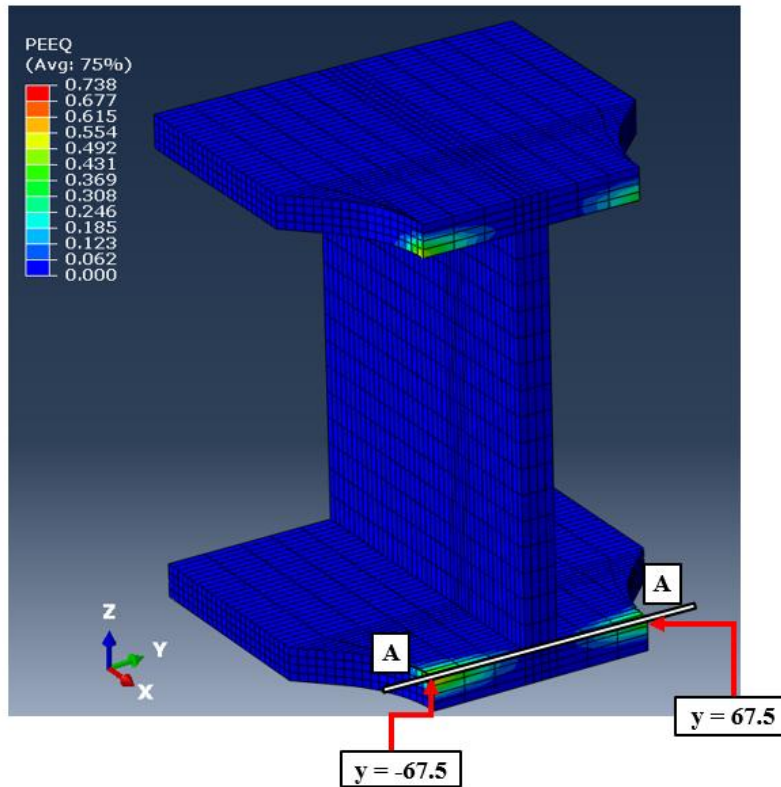
Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, çevrimsel eğrinin formu değerlendirildiğinde, tekrarlı yükler altında oldukça iyi bir performans göstererek (yüksek dayanım ve enerji sönümleme kapasitesi), eğilme momenti kapasitesi %4 görelî kat öteleme açısında azaltılmış kiriş enkesitinde hesaplanan plastik eğilme momenti dayanımının 1,05 katına ($1,05M_p$) ulaşmıştır.

%6 görelî kat öteleme açısında, kiriş başlığında meydana gelen yerel burkulma deformasyonun artması ve çatlak oluşumuna bağlı olarak dayanım kaybının başladığı çevrimsel egride görülmektedir.

8.5.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi

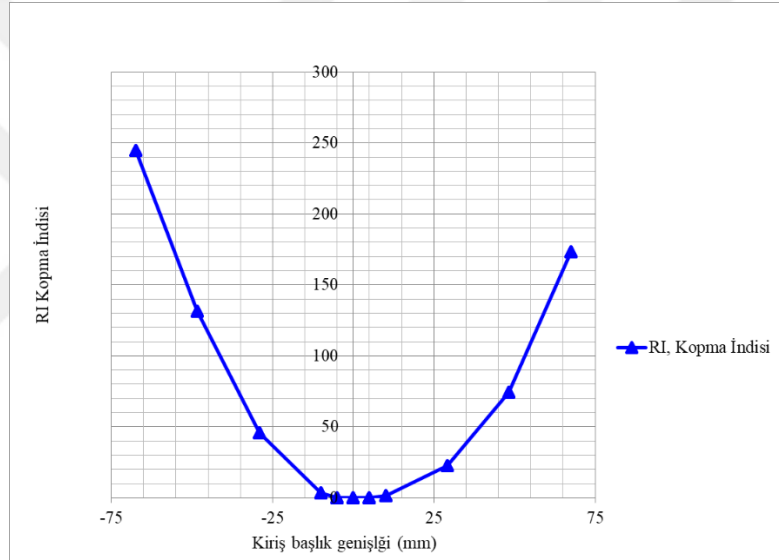
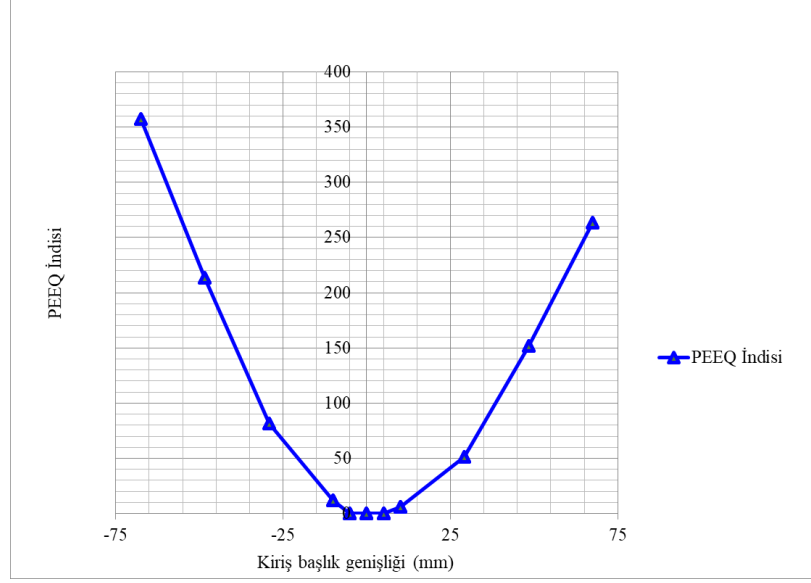
Birleşimlerde potansiyel yerel çatlak oluşum bölgelerinden biri, kaynaklı birleşim bölgeleridir. Analiz sonucunda, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının kolon başlıklarıyla birleştiği kaynak bölgesinde plastik deformasyon oluşmadığından, bu bölgede PEEQI ve RI indisleri değerlendirilmemiştir.

Plastik deformasyonların, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, özellikle levha köşelerinde meydana geldiği gözlemlendiğinden, bu bölge için PEEQ ve RI indislerinin değerlendirilmesi uygun görülmüştür. Bu indisler, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, başlık bağlantı levhasının üst lifinden geçtiği varsayılan A-A enkesiti boyunca hesaplanmıştır. Hesaplamada kullanılan parametreler, söz konusu enkesit üzerindeki elemanlara ait düğüm noktalarından elde edilmiştir (Şekil 8.110).



Şekil 8.110 : A-A enkesiti.

A-A enkesiti üzerinde PEEQI ve RI indisleri %6 görelî kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.111’de gösterilmiştir.

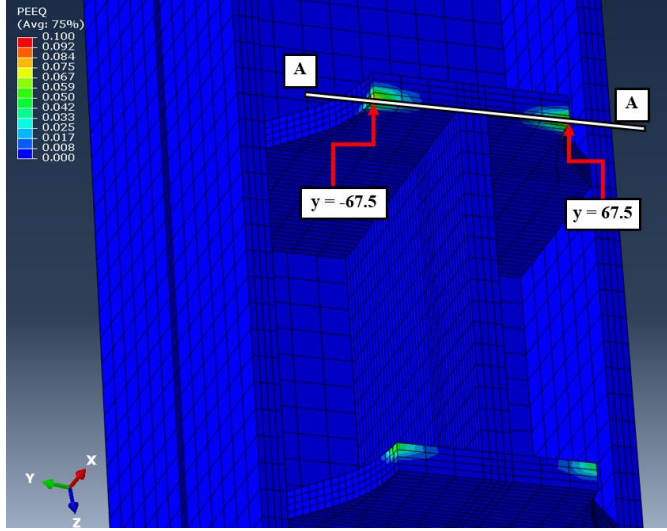


Şekil 8.111 : A-A enkesitinde PEEQI ve RI indisleri.

Grafikler incelendiğinde, kiriş başlıkları ile bu başlıklar hizasındaki bağlantı levhalarının birleşim bölgesinde, RI ve PEEQI indislerinin bağlantı levhasının ortasından kenarına doğru arttığı gözlemlenmiştir. Ancak bir önceki bölümde değerlendirildiği üzere, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

8.5.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirmesi

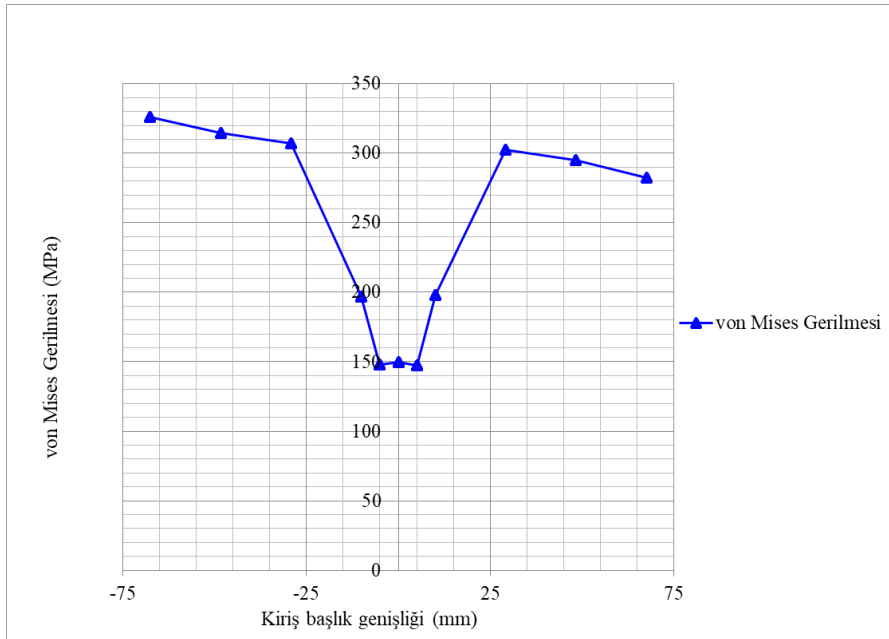
Bu bölümde daha önce belirlenen A-A enkesiti boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir (Şekil 8.112).



Şekil 8.112 : Gerilme dağılımının inceleneceği A-A enkesiti.

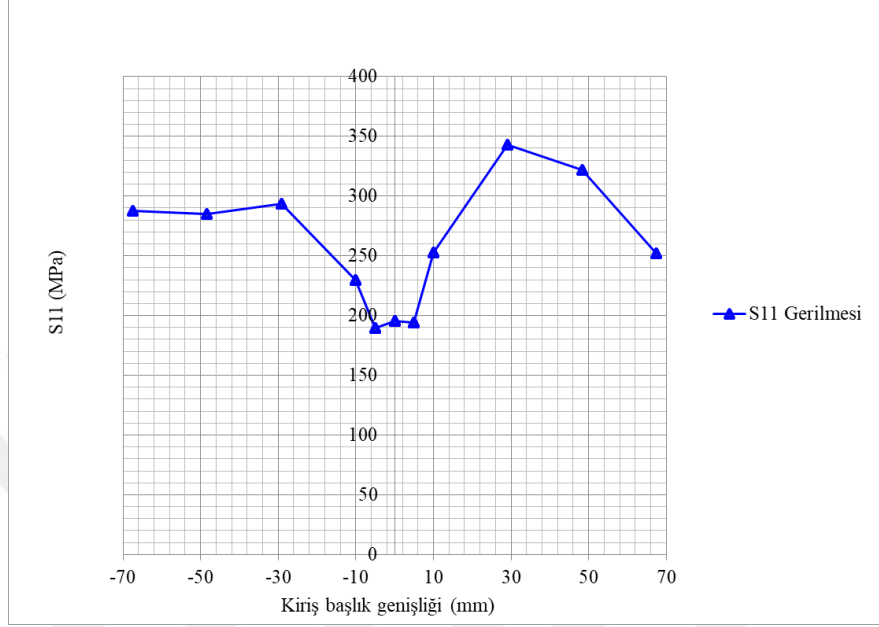
A-A enkesiti boyunca normal ve kayma gerilmeleri ile eşdeğer von Mises gerilmesi dağılımları elde edilmiştir.

En büyük von Mises gerilmesi 326 MPa olarak ölçülmüştür ve bu değer ortalama von Mises gerilmesi olan 221 MPa'ın yaklaşık 1,48 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise 147 MPa olup, ortalamanın yaklaşık %67'sine karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, kenar bölgelerde gerilme yığılmalarının belirginleştiğini göstermektedir. Kenar bölgelerdeki yüksek von Mises gerilmesi, incelenen bağlantı levhasının plastikleşmeye en yakın bölgeleri olarak değerlendirilebilir (Şekil 8.113).



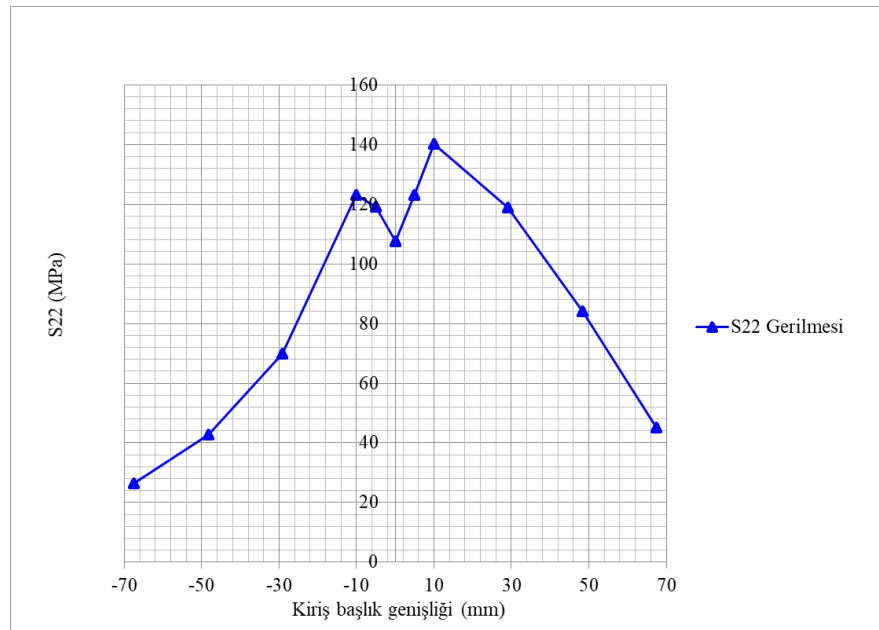
Şekil 8.113 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

343 MPa ile en büyük S11 gerilmesi kenar bölgesi ile enkesitin ortasında meydana gelmiştir. Bu, ortalama değer olan 245 MPa'nı yaklaşık 1,4 katıdır. En düşük S11 gerilmesi ise 190 MPa olup enkesitin orta bölgesinde meydana gelmiş ve bu değer ortalamanın %78'ine denk gelmektedir (Şekil 8.114).



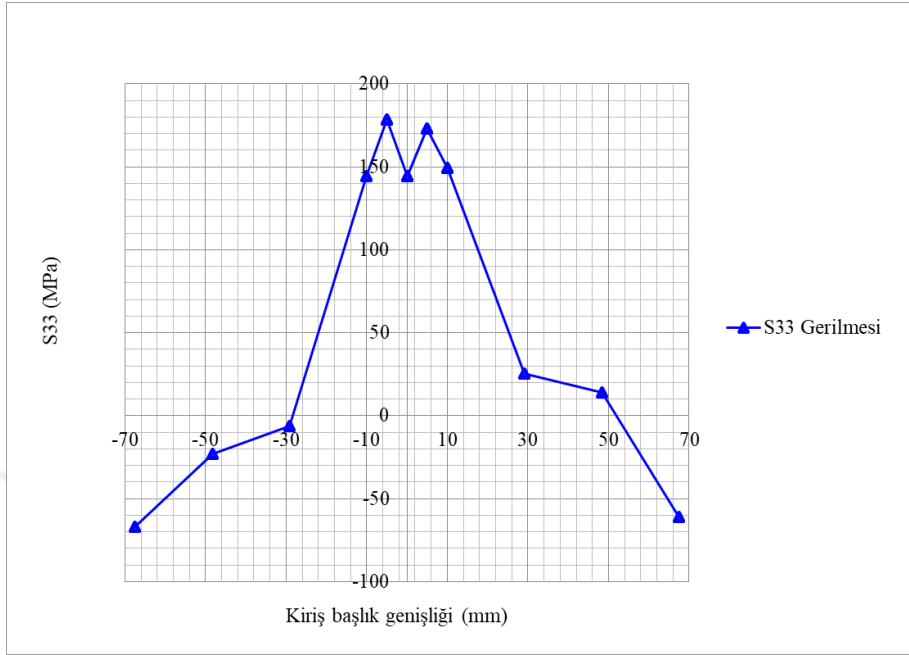
Şekil 8.114 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

En büyük S22 gerilmesi 140 MPa, en küçük ise 26 MPa'dır. En büyük gerilme enkesitin ortasında meydana gelirken en düşük gerilmeler enkesit kenarlarında elde edilmiştir (Şekil 8.115).



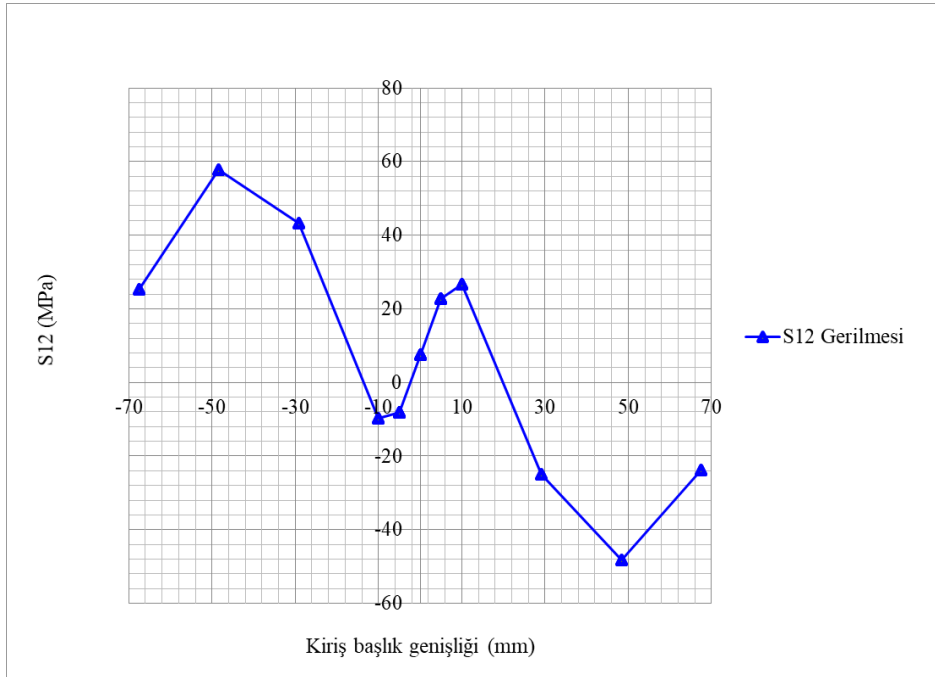
Şekil 8.115 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.

En büyük S33 gerilmesi enkesitin orta bölgesinde 178 MPa olarak elde edilmiş, enkesit kenarında ise zıt doğrultuda 67 MPa'dır (Şekil 8.116).



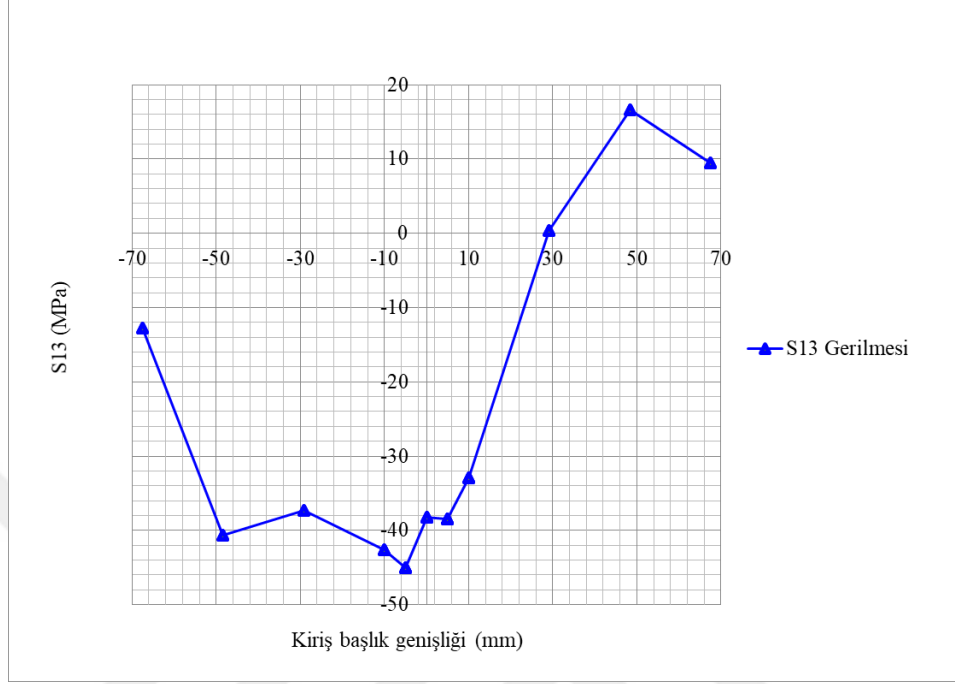
Şekil 8.116 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

En büyük S12 gerilmesi 57,7 MPa, en küçük ise 48,3 MPa'dır. Mutlak değerler kıyaslandığında, en büyük değer en küçüğün yaklaşık 1,2 katıdır (Şekil 8.117).



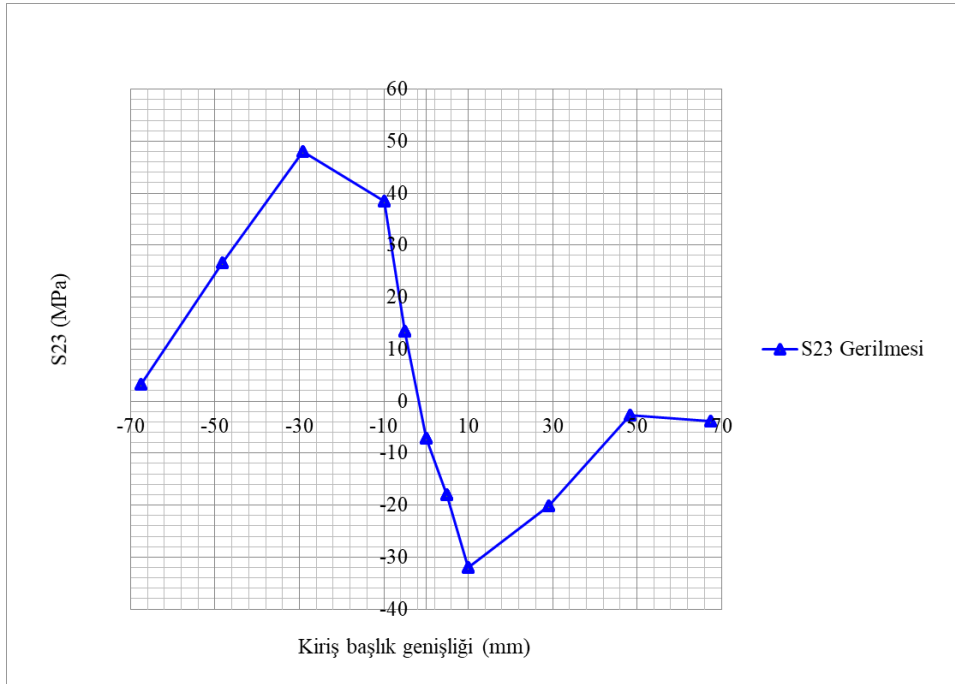
Şekil 8.117 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

S13 gerilmesi 45 MPa ile en büyük değerine enkesitin ortasında ulaşmıştır. Enkesit kenarlarında ise 16,6 MPa olarak elde edilmiş ve bu değer, en büyük değerın yaklaşık %37'sine karşılık gelmektedir (Şekil 8.118).



Şekil 8.118 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

S23 gerilmesi enkesitin ortasında 48 MPa ile en yüksek değere ulaşmış, kenar bölgelerinde ise sıfıra yakın değerler elde edilmiştir (Şekil 8.119).



Şekil 8.119 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

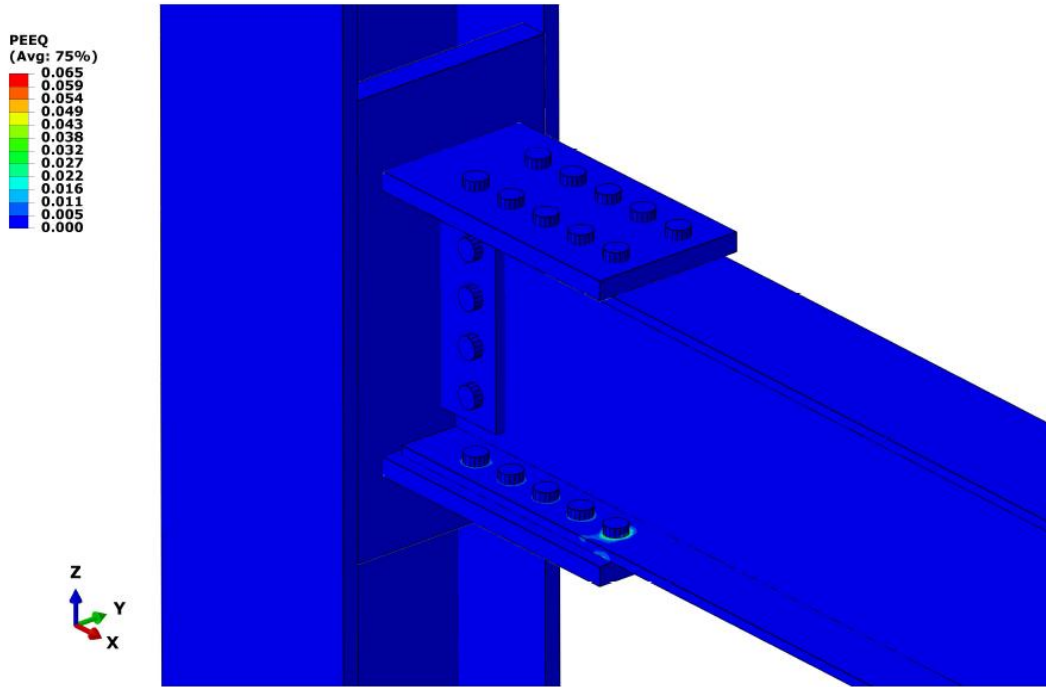
Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, dağılımının tam anlamıyla simetrik olmadığı görülmektedir. Bu durumun, kiriş ucunda akma sonrası gelişen plastik deformasyon düzensizlikleri ve yerel burkulma etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

8.6 Bulonlu Başlık Levhali I-Enkesitli Kiriş – Zayıf Eksen H-Enkesitli Kolon Birleşimi

Birleşim modelinin sonlu eleman analizine ait sonuçlar aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

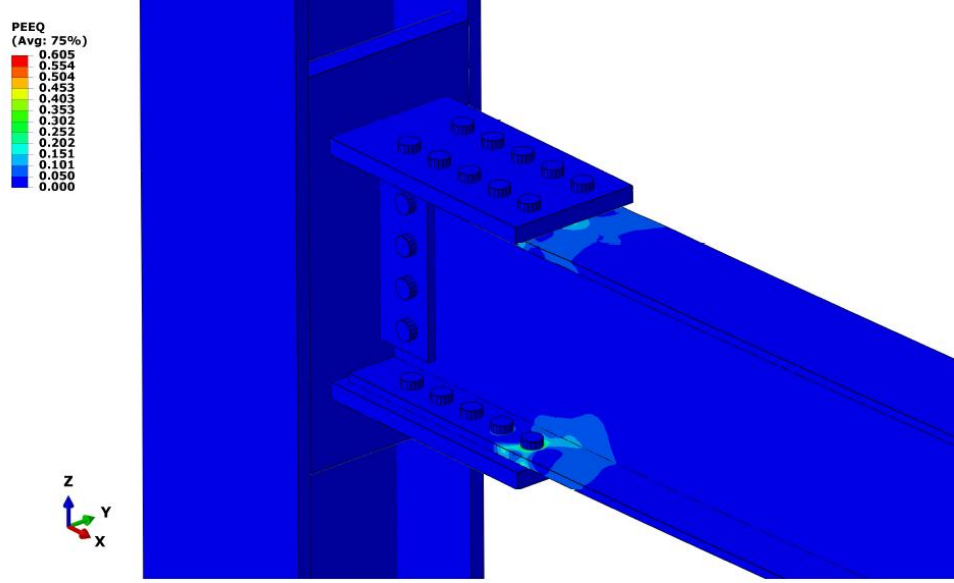
8.6.1 Birleşim modelinin tekrarlı yükler altında davranışı

%1 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamıştır (Şekil 8.120).



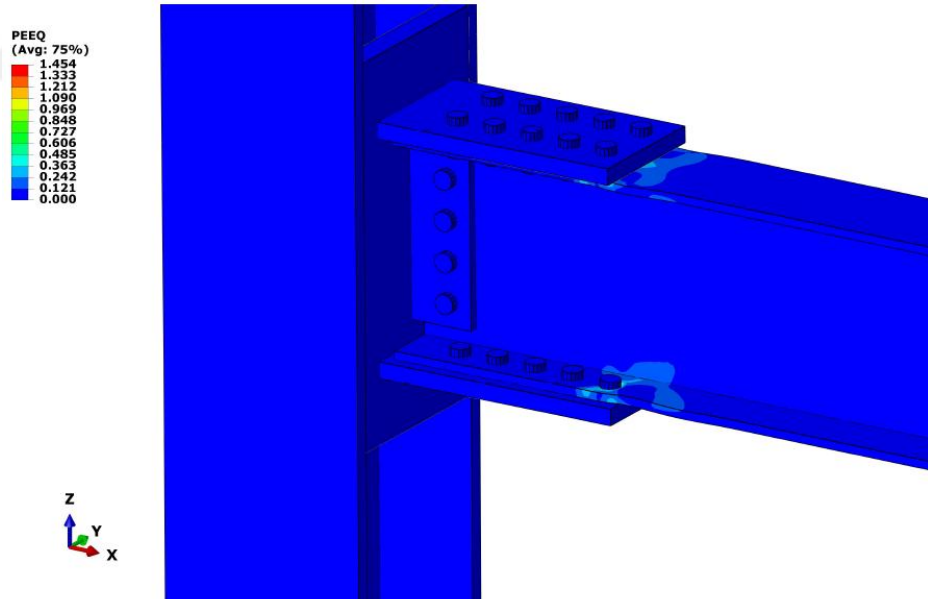
Şekil 8.120 : %2 görel kat öteleme açısında plastik deformasyon başlangıcı.

%4 görel kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değiştirmeler kiriş başlık ve gövdesine doğru genişlemeye devam ederek ve daha belirgin hale gelmeye başlamıştır (Şekil 8.121).



Şekil 8.121 : %4 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonlar.

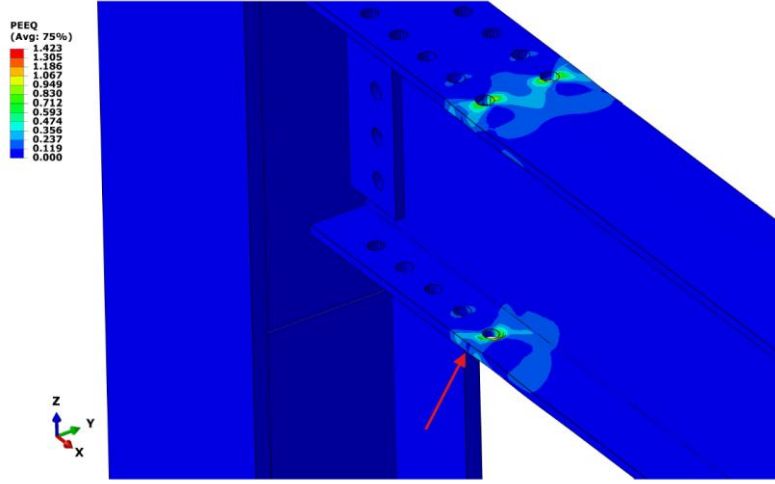
%5 görelî kat öteleme açısına ulaşıldığında, plastik şekil değıştirmeler kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasında artmaya devam ettiğı ve kiriş başlığında yerel burkulmanın başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.122).



Şekil 8.122 : %5 görelî kat öteleme açısında plastik deformasyonlar ve kiriş başlığında yerel burkulma başlangıcı.

%5 görelî kat öteleme açısının son döngüsünde, plastik deformasyonların artması ve hasar modelinde tanımlanan sınır değere ulaşılmasıyla birlikte, kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki deliklerin kenarında yer alan bazı sonlu elemanların

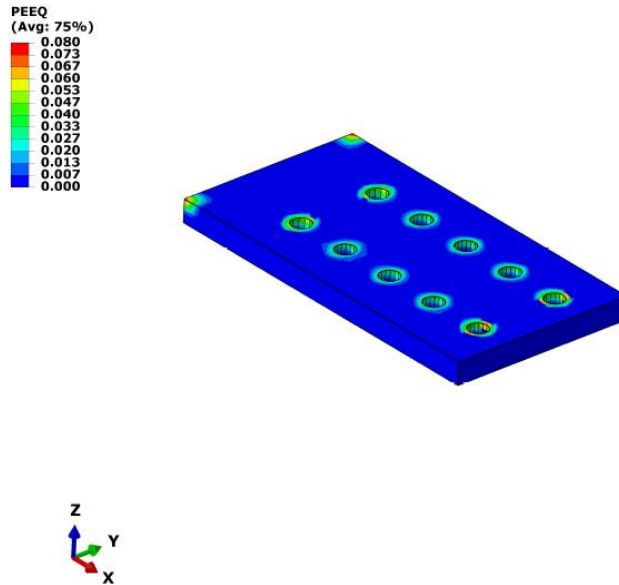
silinmeye başladığı gözlemlenmiştir. Bu durum, çatlak oluşumunun meydana gelmeye başladığını göstermektedir (Şekil 8.123).



Şekil 8.123 : %5 görelî kat öteleme açısında çatlak oluşumu.

Sonlu eleman analizi %5 görelî kat öteleme açısında yakınsama problemleri nedeniyle sonlanmıştır.

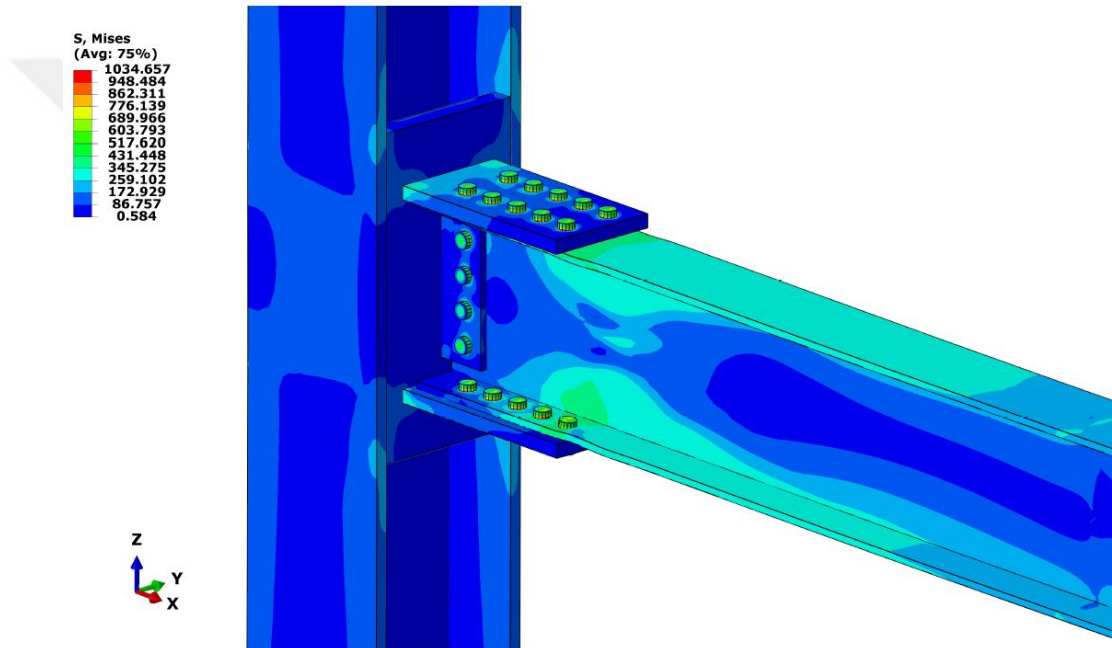
Analiz sonucunda alın levhasının kolon başlıkları ile birleştiği bölgede plastik deformasyon meydana gelmemiştir. Diğer bölgeler incelendiğinde kiriş haricinde yalnızca başlık levhalarında plastik deformasyonların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 8.124).



Şekil 8.124 : %5 görelî kat öteleme açısında başlık levhasında plastik deformasyonlar.

Bu bölgelerde elde edilen plastik şekil değiştirme (PEEQ) değerleri, plastik mafsalda elde edilen değerlerle karşılaştırılarak merteye olarak kıyaslanmıştır. Plastik mafsal bölgesinde PEEQ değeri 1,50 olarak elde edilmiştir. Başlık levhalarında elde edilen PEEQ değeri, plastik mafsalda oluşan değerın yaklaşık %5,3'üne (0,080) karşılık gelmektedir. Bu sonuç, plastik deformasyonların kirişte meydana gelen plastik mafsalda yoğunlaştığını; birleşimin diğer kısımlarında ise sınırlı düzeyde plastik deformasyon oluştuğunu göstermektedir.

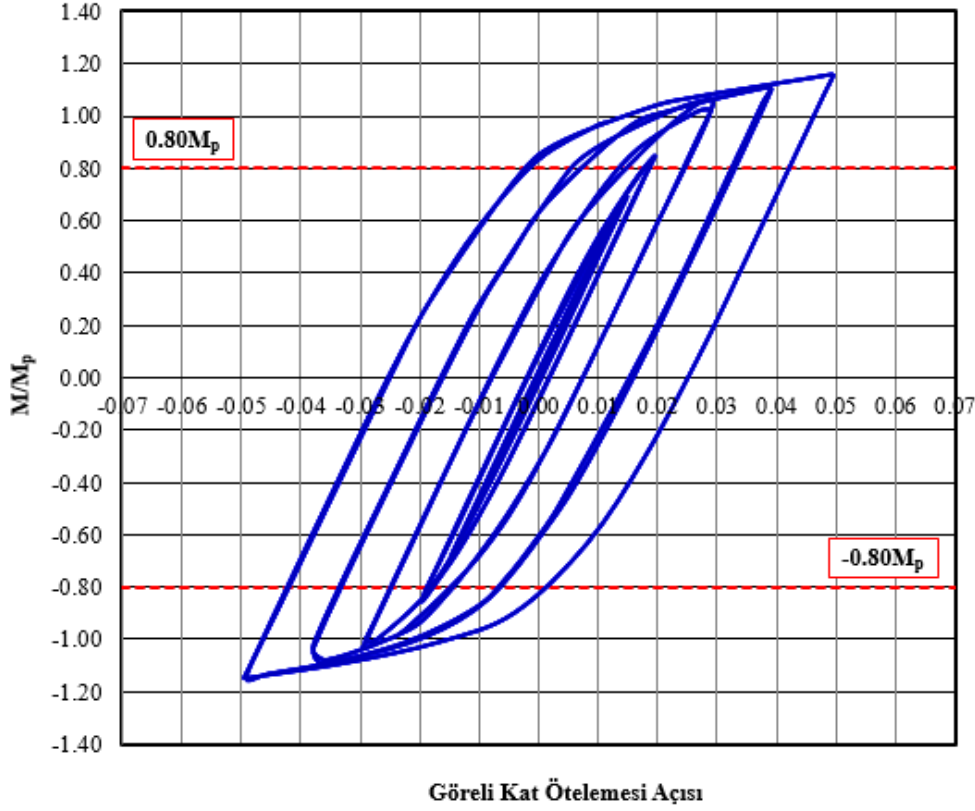
%5 görelı kat öteleme açısında birleşim modelinin von Mises gerilme dağılımı Şekil 8.125'te gösterilmiştir.



Şekil 8.125 : Analiz sonucunda elde edilen von Mises gerilme dağılımı.

8.6.2 Çevrimsel eğrinin değerlendirilmesi

Birleşim modelinin çevrimsel eğrisi incelendiğinde, %4 görelı kat öteleme açısında $0,80M_p$ dayanımının aşıldığı görülmektedir. Analiz %5 görelı kat öteleme açısına kadar sürdürüldüğünde de dayanımın $0,80M_p$ üzerinde olduğu görülmektedir (Şekil 8.126). Sonuç olarak, bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)'da yer alan, 0,04 radyanlık görelı kat öteleme açısında, kolon yüzündeki eğilme momenti değerinin, kirişin plastik eğilme momentinin en az %80'ine ($0,80M_p$) ulaşması koşulunu sağlamaktadır.

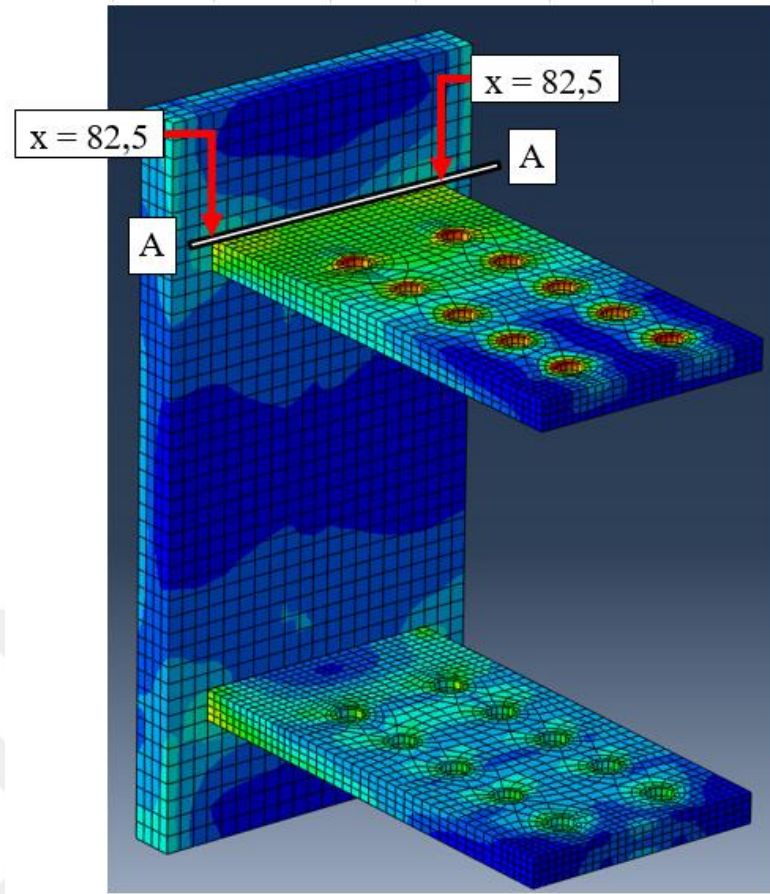


Şekil 8.126 : Çevrimsel eğri.

Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi, çevrimsel eğrinin formu değerlendirildiğinde, tekrarlı yükler altında oldukça iyi bir performans göstererek (yüksek dayanım ve enerji sönümlene kapasitesi), eğilme momenti kapasitesi %4 görel kat öteleme açısında kirişin plastik eğilme momenti dayanımının 1,11 katına ($1,11M_p$) ulaşmıştır. Çevrimsel eğri incelendiğinde, %5 görel kat öteleme açısında başlayan yerel burkulma deformasyonlarının ve çatlak oluşumunun birleşim dayanımında azalmaya neden olmadığı gözlemlenmiştir.

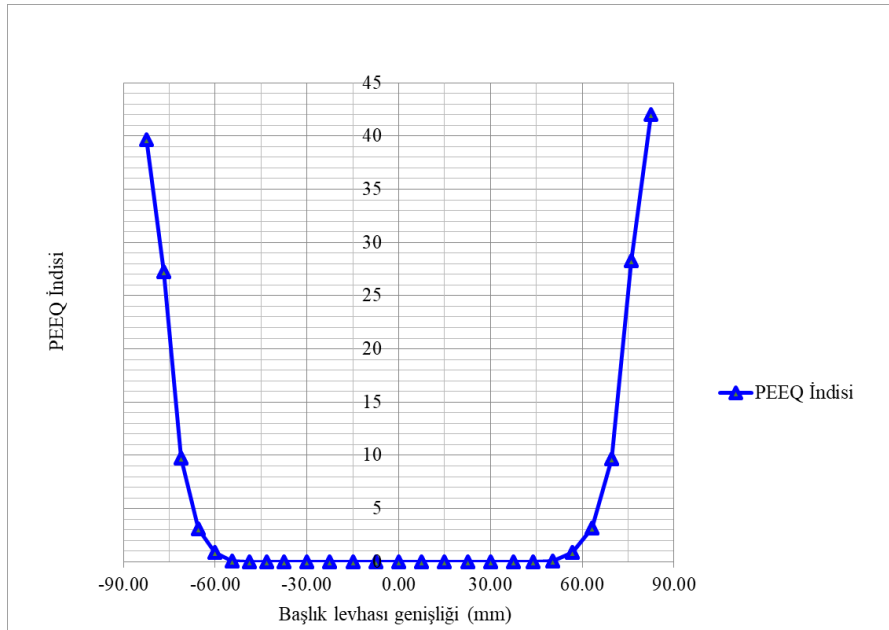
8.6.3 Çatlama ve kırılma durumları için belirleyici indislerin değerlendirilmesi

Analiz sonucunda, başlık levhalarının alın levhasına birleştiği, plastik deformasyonların gözlemlendiği bölgede PEEQI ve RI indisleri değerlendirilmiştir. Bu indisler, başlık levhasının üst lifinden geçtiği varsayılan A-A enkesiti boyunca hesaplanmıştır (Şekil 8.127). Hesaplama kullanılan parametreler, bu enkesit üzerindeki elemanlara ait düğüm noktalarından elde edilmiştir.

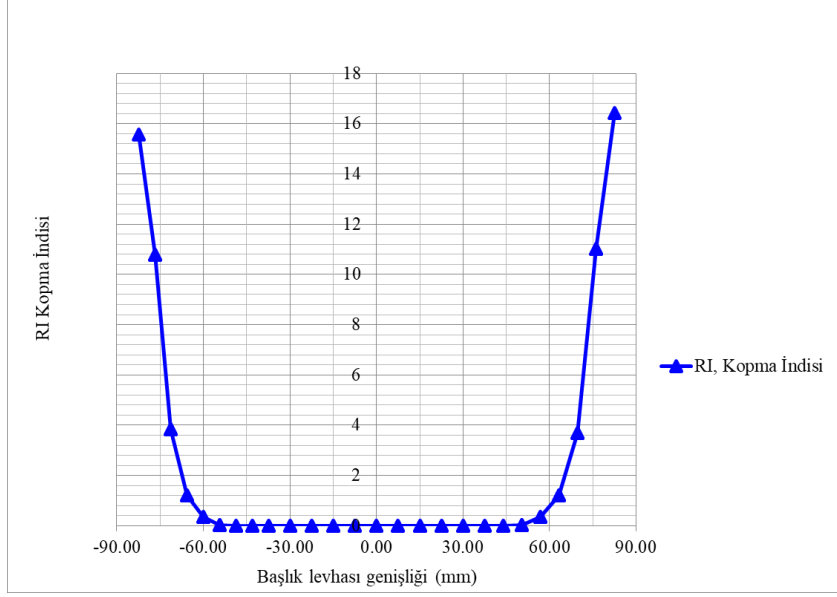


Şekil 8.127 : A-A enkesiti.

A-A enkesiti üzerinde PEEQI ve RI indisleri %5 görelî kat öteleme açısı için elde edilerek sonuçları grafiksel olarak Şekil 8.128’de gösterilmiştir.



Şekil 8.128 : A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.



Şekil 8.129 (devam): A-A enkesiti için PEEQI ve RI indisleri.

Grafikler incelendiğinde, başlık levhalarının alın levhası ile birleştiği bölgelerde, söz konusu levhaların kenarları dışında RI ve PEEQI indislerinin yaklaşık 0 (sıfır) olarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Levhaların kenarlarında indislerde ani bir artış meydana gelmiştir. Ancak bir önceki bölümde değerlendirildiği üzere, bu noktalarda yerel olarak meydana gelen plastik deformasyonların mertebesi, plastik mafsalda oluşan değerlere kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle, çatlak oluşma potansiyelinin de düşük olduğu değerlendirilmektedir.

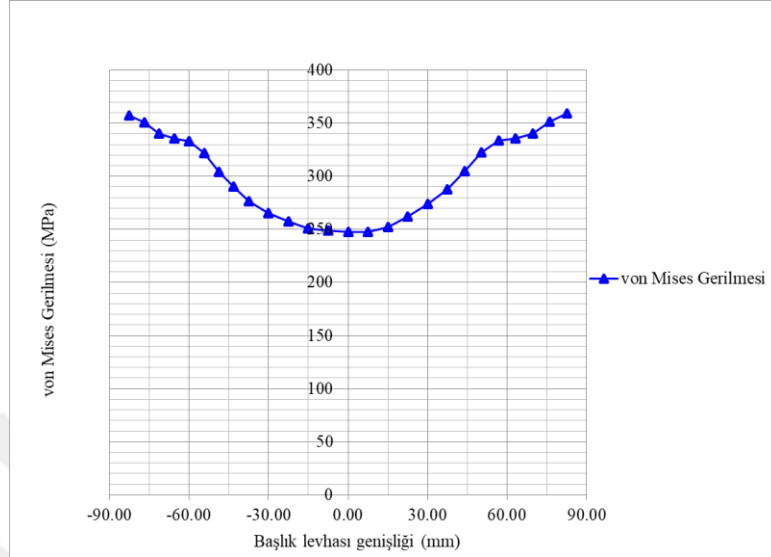
8.6.4 Kritik bölgelerde gerilme dağılımları ve yığılmalarının değerlendirmesi

Bu bölümde daha önce belirlenen A-A enkesiti boyunca elde edilen gerilme dağılımları ve yığılmaları incelenecektir.

En büyük eşdeğer von Mises gerilmesi, T-parçaların kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup 347 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalama gerilme değeri olan 237 MPa değerinin yaklaşık 1,46 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise ilk bulon deliklerinin hizasındaki enkesitte oluşmuş ve 120 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer, ortalamanın yaklaşık %51'ine karşılık gelmektedir. Bu dağılım, birleşimin maruz kaldığı yükleme altında plastik şekil değişiminin T-parçaların başlıklarının kolonla birleştiği bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir (Şekil 8.129).

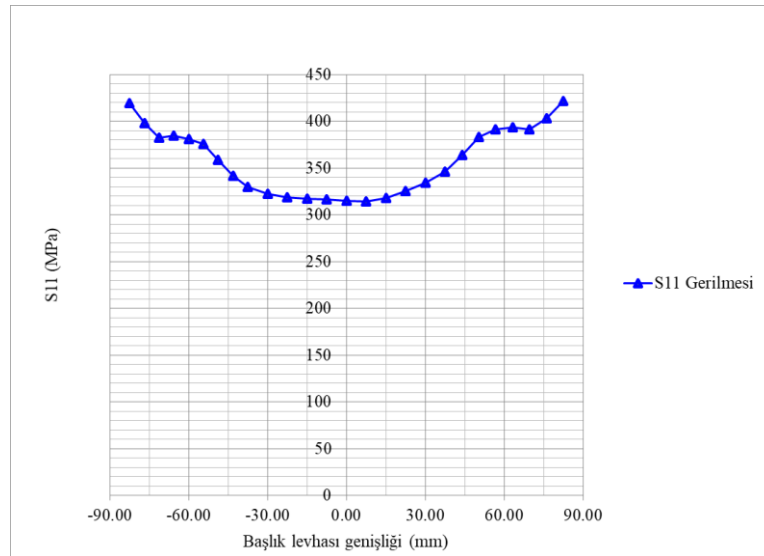
En büyük eşdeğer von Mises gerilmesi, başlık levhalarının kenar bölgelerinde meydana gelmiş olup 353 MPa olarak elde edilmiştir. . Bu değer, ortalama gerilme

değeri olan 290 MPa değerinin yaklaşık 1,22 katıdır. En küçük von Mises gerilmesi ise 248 MPa olarak başlık levhalarının ortasında meydana gelmiştir. Bu değer, ortalamanın yaklaşık %85'i düzeyindedir.



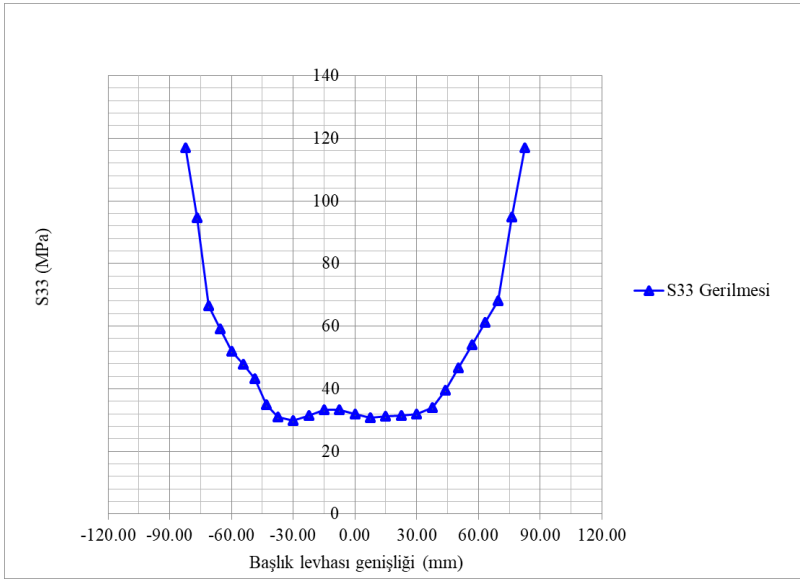
Şekil 8.129 : A-A enkesiti von Mises eşdeğer gerilmesi grafiği.

En büyük S11 (X eksenini doğrultusunda normal gerilme) değeri 422 MPa'dır ve bu değer, ortalama değer olan 357 MPa'nın yaklaşık 1,18 katıdır (Şekil 8.76). En küçük gerilme ise 319 MPa olup, ortalamanın yaklaşık %89'u düzeyindedir. Bu durum, kenarlarda gerilme yığılmalarının oluştuğunu ve bu bölgelerin yapısal açıdan daha kritik bölgeler olduğunu göstermektedir (Şekil 8.130).



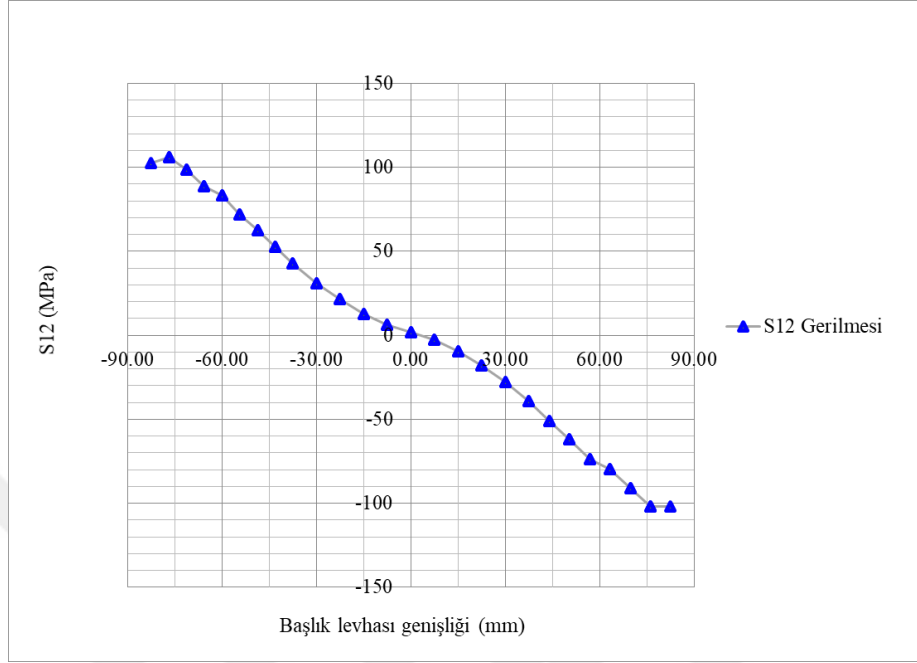
Şekil 8.130 : A-A enkesiti S11 normal gerilme grafiği.

Şekil 8.131 : A-A enkesiti S22 normal gerilme grafiği.



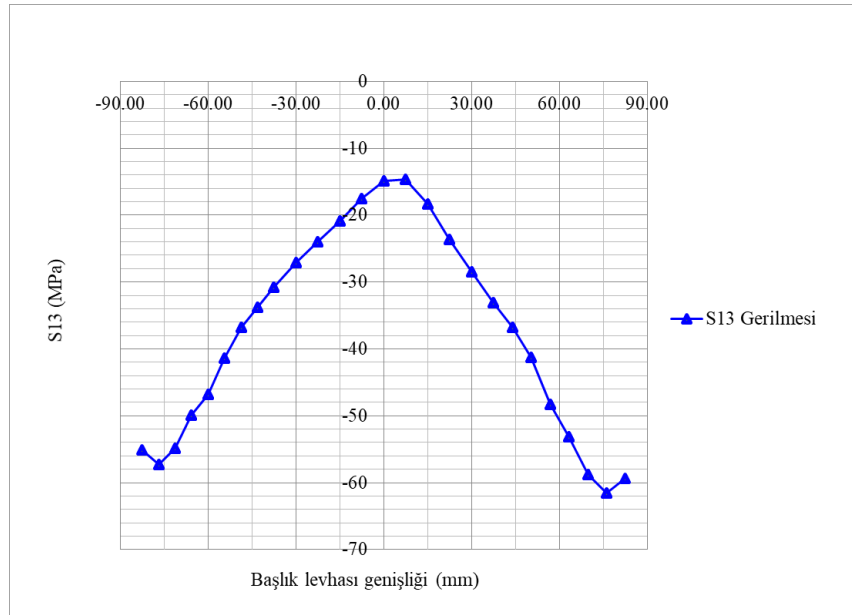
Şekil 8.132 : A-A enkesiti S33 normal gerilme grafiği.

S12 gerilme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), levha kenarlarında 106 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Başlık levhalarının merkezinde ise yaklaşık olarak 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir (Şekil 8.133).



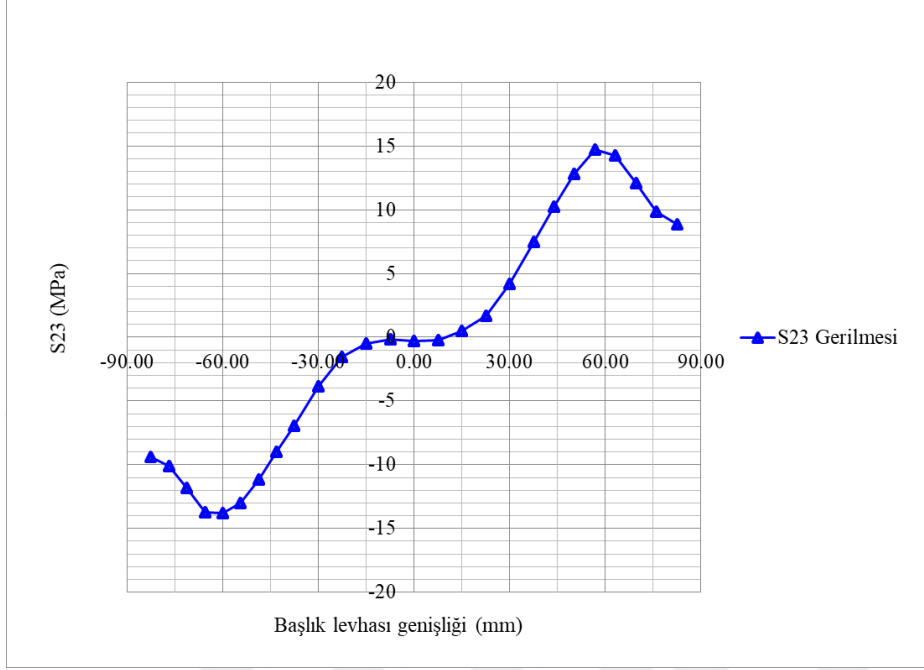
Şekil 8.133 : A-A enkesiti S12 kayma gerilmesi grafiği.

S13 (X-Z düzlemi kayma gerilmesi) bileşeninde en büyük gerilme 62 MPa'dır. Bu değer, ortalama gerilme olan 37 MPa'nın yaklaşık 1,68 katıdır. En küçük gerilme ise 15 MPa olup, ortalamanın yaklaşık %41'i düzeyindedir (Şekil 8.134).



Şekil 8.134 : A-A enkesiti S13 kayma gerilmesi grafiği.

S23 gerilme bileşeni (X-Y düzleminde kayma gerilmesi), levha kenarlarında 15 MPa seviyelerine ulaşmıştır. Başlık levhalarının merkezinde ise yaklaşık olarak 0 (sıfır) olarak elde edilmiştir (Şekil 8.135).



Şekil 8.135 : A-A enkesiti S23 kayma gerilmesi grafiği.

Sonuç olarak, A-A enkesitindeki gerilme dağılımları incelendiğinde, özellikle başlık levhalarının kenarlarında gerilme yığılmalarının meydana geldiği ve orta bölgelerinde ise, kenarlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük gerilmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme dağılımlarının, levha merkezine göre genel bir simetri eğilimi sergilemesi, plastik deformasyonların plastik mafsallarda simetrik şekilde yayılması ve çatlak oluşumunun kolon yüzünden en uzaktaki bulon sırası hizasındaki deliklerin bulunduğu kiriş enkesitinde oluşup deliklerden kenarlara doğru dengeli biçimde ilerlemesi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı moment aktaran kiriş – zayıf eksen kolon birleşimlerinin çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan davranışlarının; moment-dönme ilişkisi, rijitlik değişimi, enerji sönümleme kapasitesi ve göçme durumları incelenerek araştırılmasını ve buna bağlı olarak birleşimlerin tasarım esaslarının oluşturulmasını amaçlamaktadır.

I-enkesitli kirişlerin H-enkesitli kolonların gövdelerine bağlandığı kiriş-zayıf eksen kolon birleşimleri henüz ön yeterliliği gösterilen moment aktaran kiriş-kolon birleşimleri olarak mevcut standart ve yönetmeliklerde yer almamaktadır. Bu durum, söz konusu birleşim türlerinin tasarım ve uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılamamasına neden olmaktadır. Bu eksikliği gidermek amacıyla, çevrimsel yükler altında gerekli performans kriterlerini karşılayabilecek I-enkesitli kiriş-H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşimlerin geliştirilmesi planlanmıştır. Bu kapsamda, yenilikçi birleşim türlerinin tasarım esaslarının oluşturulması, deneysel çalışmalarla desteklenen analitik ve sayısal modellerle bu esasların doğrulanması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen I-enkesitli kiriş– zayıf eksen kolon birleşimlerinin davranışları geniş kapsamlı sonlu eleman modelleri yardımıyla nümerik olarak incelenmiştir.

9.1 Çalışma Kapsamında Elde Edilen Sonuçlar

Bu doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalara ait sonuçlar bu bölümde detaylı bir şekilde sunulmuştur.

- Çalışma kapsamında, bulonlu başlık levhali, tam dayanımlı bulonlu alın levhali, tam penetrasyonlu küt kaynaklı, kaynaklı azaltılmış I-enkesitli, bulonlu T-parçalı ve kaynaklı T-parçalı olmak üzere toplam altı (6) adet moment aktaran I-enkesitli kiriş – H-enkesitli zayıf eksen kolon birleşim tipi geliştirilmiştir. Geliştirilen birleşimlerin tasarım esasları, hesap adımları ve uygulama detayları, AISC 358-22 şartnamesi ve TBDY 2018 yönetmeliğinde ön yeterliliği deneysel olarak gösterilen mevcut birleşim tipleri ile literatürde raporlanan benzer birleşim türlerine ilişkin

deneysel ve nümerik çalışma sonuçları esas alınarak oluşturulmuştur. Birleşimlerin tasarımı yapılırken, süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler kapsamında TBDY 2018 Ek 9B’de belirtilen kiriş-kolon birleşim koşulları esas alınmış; böylece geliştirilen birleşimlerin hem performans hem de yönetmelik uyumluluğu açısından yeterliliği sağlanmıştır. Geliştirilen birleşimlerin sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımında oluşturulmuş ve tekrarlı tersinir yükler altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde, geliştirilen birleşimlerin tamamı AISC 341-22 Bölüm E3-6b(a) ve TBDY 2018 Madde 9.3.4.1(a)’da belirtilen, %4 görelî kat öteleme açısında, kolon yüzeyindeki eğilme momenti dayanımının, kirişin plastik eğilme momenti kapasitesinin %80’inden ($0.80M_p$) daha küçük olmaması şartını sağlamıştır.

- Birleşim modellerinin tekrarlı yükler altında davranışını daha kapsamlı bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, ABAQUS yazılımı ile elde edilen analiz verileri kullanılarak, kolon merkezindeki normalize moment (M/M_p) ile görelî kat ötelemesi açısı (radyan) arasındaki ilişkiyi gösteren çevrimsel yükleme eğrileri oluşturulmuştur. Birleşim modellerinin çevrimsel eğrileri incelendiğinde, tüm birleşim tiplerinin tekrarlı yükler altında %6 görelî kat öteleme açısına kadar önemli düzeyde enerji sönümleme kapasitesine sahip oldukları belirlenmiştir. Bu durum, önerilen birleşim detaylarının, tekrarlı tersinir yükler altında başarılı bir performans sergilediğini göstermiştir.
- Birleşimlerdeki plastik deformasyonların yayılışı incelendiğinde, her bir birleşim tipi için deformasyonların tasarım sırasında öngörülen plastik mafsallarda yığıldığı tespit edilmiştir. Bulonlu başlık levhali birleşimde, plastik mafsallarda, kolon yüzünden en uzakta bulunan bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde oluşmuştur. Tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşimde, rijitlik levhasının ucundaki kiriş enkesitinde; tam penetrasyonlu küt kaynaklı birleşimde, kirişin başlıklarının ve gövdesinin birleştiği kiriş enkesitinde; kaynaklı azaltılmış I-enkesitli birleşimde, azaltılmış enkesit bölgesinde; bulonlu T-parçalı birleşimde, kolon yüzünden en uzakta bulunan bulon sırası hizasındaki kiriş enkesitinde; kaynaklı T-parçalı birleşimde ise, T-parça gövdesinin ucundaki kiriş enkesitinde bu deformasyonların yığıldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, plastik şekil değiştirmelerin bağlantı elemanlarından uzaklaştırılarak, birleşimlerin elastik bölge sınırları içinde

kalmasının sağlandığını ve tüm birleşim tiplerinin tasarım hedeflerine uygun olarak plastik mafsalların kiriş enkesitlerinde oluşumunu sağladığını göstermektedir.

- Bu tez kapsamında yürütülen çalışmalarda, ileri düzey sonlu eleman modelleri ve analiz tekniklerinden yararlanılmıştır. Bu doğrultuda, birleşimlerin tekrarlı yükler altında davranışını gerçeğe en yakın şekilde temsil edebilmek amacıyla, geliştirilen birleşimlerin sonlu eleman modellerine, çatlak ve kırılma oluşumlarının modellenmesine olanak sağlayan sünek hasar modeli (ductile damage) dahil edilmiştir. Geliştirilen birleşimlerin sonlu eleman modellerinde sünek hasar modelinin kullanılmasının uygunluğunu değerlendirmek amacıyla, literatürde çevrimsel yükler altında deneysel olarak incelenen benzer birleşim numuneleri doğrulama modelleri olarak dikkate alınmıştır. Bu doğrulama çalışmalarının sonuçları, sayısal analizlerle elde edilen çatlakların geometrik formları ve oluştuğu bölgeler ile deneylerin sonuçları arasında yüksek düzeyde bir örtüşme sağlandığını göstermiştir. Bu bulgular, sünek hasar modelinin, tez çalışması kapsamında geliştirilen birleşim tipleri için geçerli, güvenilir ve başarılı bir hasar öngörme yaklaşımı sunduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar, bu modelleme yaklaşımının benzer kiriş-kolon birleşimlerinin geniş kapsamlı modelleri için etkin şekilde uygulanabileceğini göstermektedir.
- Geliştirilen birleşimler plastik deformasyonların kiriş enkesitinde oluşmasını sağlayacak şekilde boyutlandırıldığından, sonlu eleman modellerinde sünek hasar modeli sadece kiriş elemanına entegre edilmiştir. Diğer elemanlarda çatlak oluşum potansiyeli, kopma indisi (RI) ve eşdeğer plastik şekil değiştirme indisi (PEEQ) parametreleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, kolon gövdesine ve başlıklarının iç kısmına kaynaklanan bağlantı levhalarında ve diğer birleşim elemanlarında meydana gelen plastik şekil değiştirme değerlerinin, plastik mafsallardaki kıyasla oldukça düşük mertebede olduğu tespit edilmiştir. Bu kıyaslamayla birlikte, plastik mafsallarda 6% göreceli kat öteleme açısına kadar çatlak oluşumu meydana gelmediği de göz önüne alındığında, ilgili bölgelerde çatlak oluşumu riskinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir.
- Bulonlu ve kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin kayma davranışına ilişkin elde edilen bulgular, birleşimlerin yük

aktarım mekanizmasını değerlendirmek açısından önemli veriler sunmuştur. Gerçekleştirilen sonlu eleman analizlerinde, bulonların bulunduğu enkesit analiz süresince detaylı şekilde incelendiğinde, kolon başlıkları arasına kaynaklanan T şeklindeki elemanların başlıkları ile kiriş başlıklarında yer alan T-parça elemanlarının başlıkları arasındaki temas yüzeylerinde sürtünme kuvvetinin aşılmadığı, dolayısıyla bu bölgede rölatif kayma meydana gelmediği bu nedenle bulon gövdeleri ile bulon deliklerinin temas etmediği tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, YZ düzlemindeki kayma gerilmesi bileşeni (S23) değerlerinin neredeyse sıfıra yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, I-enkesitli kirişin H-enkesitli kolonun kuvvetli eksenine dik doğrultuda bağlandığı birleşimlerde kesme kuvvetini aktarmak amacıyla kullanılan kayma levhalarına ihtiyaç duyulmadan, önerilen birleşim tipiyle de güvenli bir şekilde kesme kuvvetinin aktarılabilirdiğini göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, tasarım esaslarında öngörülen kesme kuvvetinin, basınç başlığındaki T-parçalar ve bu bölgedeki bağlantı detayları aracılığıyla etkili biçimde aktarılabilirdiği yönündeki varsayımın uygunluğunu doğrulamaktadır.

- Çalışmanın kapsamını genişletmek amacıyla, I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşim tipleri arasında en etkili çözümün belirlenmesine yönelik ek bir değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Referans olarak seçilen birleşimin genel davranışı incelendikten sonra, kiriş-kolon bağlantı geometrisinin ve azaltılmış kiriş bölgesinin konumunun birleşim performansı üzerindeki etkisi, ilave olarak geliştirilen dört farklı birleşim modeliyle analiz edilmiştir. Buna ek olarak, kolon başlıkları arasına yerleştirilen ve kiriş başlıkları ile gövdesi hizasında yer alan bağlantı levhalarının kalınlığının, plastik şekil değiştirmelerin yayılışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, tüm I-enkesitli azaltılmış kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin, AISC 341-22 şartnamesinde sünellik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeve birleşimleri için belirtilen performans kriterlerini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca, bağlantı levhalarının kolon başlığı ucundan dışarıya doğru eğrisel olarak azalan bir formda uzatılmasının, bu levhaların bir miktar şekil değiştirerek uzama deformasyonuna izin vermesi nedeniyle, kiriş başlıklarının kenarlarında oluşan gerilme yığılmalarını azalttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, bağlantı levhası kalınlıklarının kiriş başlığı ve gövdesiyle uyumlu hale getirilmesi, bu bölgede ani

rijitlik geçişlerini ortadan kaldırmakta, dolayısıyla gerilme yığılmalarını engellemekte ve çatlak oluşma riskini önemli ölçüde azaltmaktadır.

9.2 Gelecekte Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler

- Geliştirilen birleşim tiplerinin davranışları ileri düzey sonlu eleman modelleri kullanılmak suretiyle nümerik olarak incelenmiştir. Bu birleşimlerin fiziksel prototiplerinin üretilerek laboratuvar ortamında çevrimsel yükler altında test edilmesi hem modelleme esaslarının hem de elde edilen nümerik sonuçların deneysel olarak doğrulanmasını sağlayacaktır. Bu kapsamda, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (İTÜ BAP) Koordinatörlüğü tarafından desteklenen Genel Araştırma Projesi türündeki “Moment aktaran I-enkesitli kiriş - zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimlerinin tekrarlı yükler altında doğrusal olmayan davranışı” başlıklı GAP projesi (Proje ID: 46569), söz konusu fiziksel deneylerin gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır.
- Bu tez kapsamında geliştirilen moment aktaran I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimleri için, her bir birleşim tipine özgü tasarım esasları, uygulama detayları ve hesap adımları ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Bu birleşimlerin bu denli kapsamlı biçimde ele alınması sayesinde, tez çalışması aynı zamanda bir tasarım kılavuzu niteliği taşımaktadır. Bu yönüyle çalışma, mühendislik uygulamalarında doğrudan kullanılabilecek pratik bilgiler sunmakta ve yeni birleşim tiplerinin güvenli biçimde tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, geliştirilen birleşimlerin standartlara entegrasyonu açısından, analitik olarak elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla desteklenmesi büyük önem arz etmektedir. Gerçekleştirilecek fiziksel testler, birleşimlerin çevrimsel yükler altındaki performansının uygulamada da karşılık bulduğunu gösterecek; birleşimlerin süneklik düzeyi, enerji sönmüleme kapasitesi ve göçme davranışı gibi kritik parametrelerin deneysel doğrulaması sağlanarak, bu birleşimlerin ön yeterliliklerinin resmi olarak tanımlanmasının önü açılacaktır. Bu doğrultuda, birleşimlerin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’ne dahil edilebilmesi amacıyla, analitik ve deneysel sonuçlarla desteklenen öneri raporları hazırlanabilecektir. Ayrıca, tezde sunulan kapsamlı içerik temel alınarak, daha geniş kapsamlı bir resmi tasarım kılavuzu da geliştirilebilir. Bu yaklaşım hem akademik bilgi üretimi hem de mühendislik pratiği açısından önemli bir katkı sağlayacak; geliştirilen

birleşim detaylarının yapı mühendisleri tarafından güvenle tasarlanıp uygulanmasını ve yaygınlaştırılmasını mümkün kılacaktır.

- Bu tezde ele alınan birleşim tipleri tekil birleşim düzeyinde değerlendirilmiştir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen birleşimlerin çok katlı bir moment aktaran çelik çerçeve sistemin parçası olarak modellenmesi ve sistem düzeyinde deprem yükleri altında performans olarak olumlu katkısı değerlendirilebilir.



KAYNAKLAR

- AISC** (2016). *Specification for structural steel buildings* (ANSI/AISC 360-16). American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill.
- AISC** (2022a). *Seismic provisions for structural steel buildings* (ANSI/AISC 341-22). American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill.
- AISC** (2022b). *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications* (ANSI/AISC 358-22). American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill.
- AISC** (2022c). *Specification for structural steel buildings* (ANSI/AISC 360-22). American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill.
- Akgönen, A. İ., Yorgun, C., & Vatansever, C.** (2015). Cyclic behavior of extended end-plate connections with European steel shapes. *Steel and Composite Structures*, 19(5), 1185–1201. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.5.1185>.
- Baei, M., Ghassemieh M., & Goudarzi, A.** (2012). Numerical modelling of end-plate moment connection subjected to bending and axial forces. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 4:3, 463 – 472.
- Çelik Yapıların Tasarımı, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik.** (2018). T. C. Resmi Gazete, 30333 (Mükerrer), 15 Şubat 2018.
- Dassault Systèmes.** (2016). *ABAQUS Analysis User's Guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Dassault Systèmes.** (2016). *Getting Started with ABAQUS/CAE*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Dassault Systèmes.** (2024). *ABAQUS (Version 2024) [Bilgisayar yazılımı]*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Dissanayake, L. N., Walport, F., Yun, X., & Gardner, L.** (2025). Unified stress-strain models for normal and high strength steels. *Construction and Building Materials*, 459, 139616. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139616
- Driscoll, G. C. and Beedle, L. S.** (1982). Suggestions for avoiding beam-to-column web connection failure. *AISC Engineering Journal*, 19(1) 16-19.
- Driscoll, G. C., Pourbohloul, A. & Wang, X.** (1983). Fracture of moment connection tests on simulated beam-to-column web moment connection details (Report No: 469.7). Lehigh University, Bethlehem, USA.
- FEMA** (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (FEMA 350)*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

- Han, S. W., Kim, N. H., & Cho S. W.** (2016). Prediction of cyclic behavior of WUF-W connections with various weld access hole configurations using nonlinear FEA, *International Journal of Steel Structures*, 16(4), 1197-120.
- Hantouche, E. G., Kukreti, A. R., Rassati, G. A., & Swanson, J. A.** (2013). Modified stiffness model for thick flange in built-up T-stub connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 81, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.007>.
- Hantouche, E. G., Kukreti, A. R., Rassati, G. A., & Swanson, J. A.** (2015). Prying models for strength in thick-flange built-up T-stubs with complete joint penetration and fillet welds. *Journal of Structural Engineering*, 141(2), 04014111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001051](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001051).
- Hill, H.N.** (1944). *Determination of stress-strain relations from 'offset' yield strength values* (Technical Note No. 927). Washington, DC: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Iannone, F., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G.** (2011). Experimental analysis of bolted steel beam-to-column connections: component identification. *Journal of Earthquake Engineering*, 15:2, 214 – 244. doi: 10.1080/13632461003695353.
- Jones, S. L., Fry, G. T., & Engelhardt, M. D.** (2002). Experimental evaluation of cyclically loaded reduced beam section moment connections. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 441–451. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(441\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(441)).
- Kaufmann, E. J., Metrovich, B., Pense, A.W.** (2001). *Characterization of Cyclic Inelastic Strain Behavior On Properties of A572 Gr. 50 and A913 Gr. 50 Rolled Sections* (ATLSS Report No. 01-13). Bethlehem, USA: Lehigh University.
- Krolo, P.** (2017). *Influence of bolted joints behaviour on seismic response of steel frames* (Doctoral dissertation). Retrieved from <https://repository.gradri.uniri.hr/islandora/object/gradri:643>.
- Krolo, P., Grandić, D., & Smolčić, Ž.** (2016). Experimental and numerical study of mild steel behaviour under cyclic loading with variable strain ranges. *Advances in Materials Science and Engineering*, 7863010. doi:10.1155/2016/7863010.
- Kumar, P.C., A., Sahoo, D. R., Kumar, N.** (2015). Limiting values of slenderness ratio for circular braces of concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 223–235.
- Larson, P. C.** (1996). *The design and behavior of bolted beam-to-column frame connections under cyclical loading* (Master's thesis). University of Texas at Austin, Austin, TX.
- Lee, C., Jung, J. and Kim, S.** (2019). Cyclic seismic performance of weak-axis RBS welded steel moment connections. *International Journal of Steel Structures*, 19(5), 1592–1604. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00233-3>.

- Lee, D., Cotton, S. C., Hajjar, J. F., Dexter, R. J., & Ye, Y.** (2005a). Cyclic behavior of steel moment-resisting connections reinforced by alternative column stiffener details. i: connection performance and continuity plate detailing. *Engineering Journal*, 42(4), 189–214. <https://ej.aisc.org/index.php/engj/article/view/863>.
- Lee, D., Cotton, S. C., Hajjar, J. F., Dexter, R. J., & Ye, Y.** (2005b). Cyclic behavior of steel moment-resisting connections reinforced by alternative column stiffener details. ii: panel zone behavior and doubler plate detailing. *Engineering Journal*, 42(4), 215–238. <https://ej.aisc.org/index.php/engj/article/view/864>.
- Murray, T. M., & Shoemaker, W. L.** (2002). Flush and Extended Multiple Row Moment End Plate Connections. *Design Guide 16*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Oh, K., Lee, K., Chen, L., Hong, S. and Yang, Y.** (2015) Seismic performance evaluation of weak axis column tree moment connections with reduced beam section. *Journal of Constructional Steel Research*, 105, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.10.005>.
- Ramberg, W. & Osgood, W.R.** (1943). *Description of stress-strain curves by three parameters* (Technical Note No. 902). Washington, DC: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Ricles, J. M., & Zhang, X.** (2006). Seismic performance of reduced beam section moment connections to deep columns. In *Structures Congress 2006*. American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40889\(201\)47](https://doi.org/10.1061/40889(201)47).
- Ricles, J. M., Mao, C., Lu, L. W., & Fisher, J. W.** (2002). Inelastic cyclic testing of welded unreinforced flange–welded web moment connections. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 429–440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(429\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(429)).
- Sato, A., Newell, J. D., & Uang, C.-M.** (2007). *Cyclic behavior and seismic design of bolted flange plate steel moment connections*. Report No. TR-2007/01, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Sato, A., Newell, J., & Uang, C. M.** (2008). Cyclic behavior and seismic design of bolted flange plate steel moment connections. *Engineering Journal, AISC*, 45(4), 221–232. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:4\(221\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(221)).
- Schneider, S. P., & Teeraparbwong, I.** (1999). *SAC Task 7.09: Bolted Flange Plate Connections*. Report submitted to the SAC Joint Venture by the University of Illinois, Urbana, Ill.
- Schneider, S. P., & Teeraparbwong, I.** (2002). Inelastic Behavior of Bolted Flange Plate Connections. *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 492–500. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(492)).
- Shen, J., Kitjasateanphun, T., & Srivanich, W.** (2000). Seismic performance of steel moment frames with reduced beam sections. *Engineering*

Structures, 22(8), 968–983. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00048-6).

- Shim, H., Lee E.T., Kim, S. and Kim, S.** (2014). Development and performance evaluation of weak-axis column bending connections for advanced constructability. *International Journal of Steel Structures*, 14(2), 369–380, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13296-014-2016-y>.
- Sophianopoulos, D. S., & Deri, A. E.** (2011). Parameters affecting response and design of steel moment frame reduced beam section connections: an overview. *International Journal of Steel Structures*, 11(2), 133–144. <https://doi.org/10.1007/s13296-011-2003-5>.
- Sumner, E. A.** (2003). Unified design method for extended end-plate moment connections subject to cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 129(9), 1220–1228. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:9\(1220\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:9(1220)).
- Sumner, E. A., & Murray, T. M.** (2001). Behavior of extended end-plate moment connections subjected to gravity, wind, and low seismic loads. *Engineering Journal*, 38(1), 29–38. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:1\(3\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:1(3)).
- Sumner, E. A., Mays, T. W., & Murray, T. M.** (2000a). *Cyclic Testing of Bolted Moment End-Plate Connections* (Research Report No. CE/VPI-ST-00/03, SAC Report No. SAC/BD00/21).
- Sumner, E. A., Mays, T. W., & Murray, T. M.** (2000b). End-Plate moment connections: test results and finite element method validation. In *Connections in Steel Structures IV: Proceedings of the Fourth International Workshop* (pp. 82–93). AISC, Chicago, IL.
- Swanson, J. A.** (2002). Ultimate strength prying models for bolted T-stub connections. *Engineering Journal*, 39(3), 136–147.
- Swanson, J. A., & Leon, R. T.** (2000). Bolted steel connections: Tests on T-stub components. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 50–56. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:1\(50\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:1(50)).
- Swanson, J., Leon, R. D., & Smallridge, J.** (2000). *Tests on Bolted Connections* (Report SAC/BD-00/04). SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.
- Swanson, J.A.** (1999). *Characterization of the strength, stiffness, and ductility behavior of T-stub connections* (Ph.D. Thesis). Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
- Swanson, J.A.** (2002). Ultimate strength prying models for bolted t-stub connections. *Engineering Journal, AISC*, 39(3), 136–147.
- Swanson, J.A.** (2016). Strength of beams in beam-to-column connections with holes in the tension flange. *Engineering Journal, AISC*, 53(3), 159–172.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği.** (2018). T. C. Resmi Gazete, 30364 (Mükerrer), 18 Mart 2018.
- Yılmaz, O., & Bekiroğlu, S.** (2016). DBYBHY-2007’ye Göre Moment Aktaran Bulonlu Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. 8. *Ulusal*

Deprem Mühendisliği Konferansı, (383–394). İstanbul, Türkiye, 11–15 Mayıs 2015.

Zhang, X., & Ricles, J. M. (2006). Seismic behavior of reduced beam section moment connections to deep columns under low-cycle fatigue loading. *Journal of Structural Engineering*, 132(3), 358–368. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:3\(358\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:3(358)).





EKLER

EK A: Bulonlu başlık levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırması

EK B: Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırılması

EK C: Kaynaklı zayıflatılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırılması

EK D: Bulonlu T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırılması

EK E: Kaynaklı T-parçalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırılması

EK F: Kaynaklı alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşiminin boyutlandırılması



EK A

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı (C_{pr}) TBDY 2018 Ek 9B.1.4'e göre 1,20 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

IPE270 profilinin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti $W_{pb} = 484 \times 10^3 \text{ mm}^3$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} = 1,20 \times 1,30 \times 275 \times 484 \times 10^3 \times 10^{-6} = 207,6 \text{ kNm}$$

Birleşimde, kiriş başlığının çekme kuvveti etkisinde kırılma sınır durumuna ulaşmasını önleyecek bulon deliği çapı hesaplanmıştır.

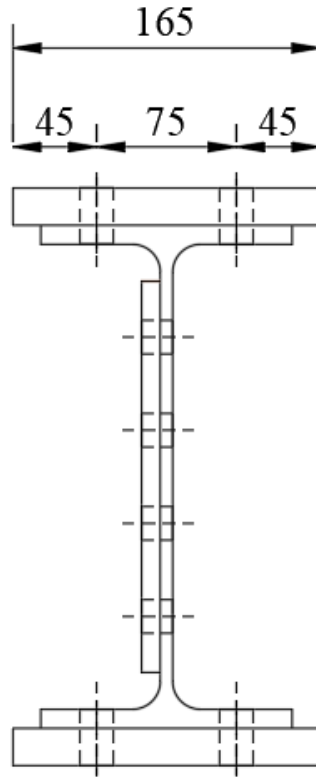
$$d_h \leq \frac{W_x}{2t_f(d - t_f)} \left(1 - \frac{R_y F_y}{R_t F_u} \right) - 2 \text{ mm}$$

$$d_h \leq \frac{484 \times 10^3}{2 \times 10,2 \times (270 - 10,2)} \left(1 - \frac{1,30 \times 275}{1,10 \times 430} \right) - 2$$

$$d_h \leq 20,3 \text{ mm}$$

En büyük bulon çapı deliği 20,3 mm şeklinde elde edildiğinden, bulon çapı $d_b = 16 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Standart bulon deliği çapı (d_h) bulon çapından 2 mm daha büyük olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Başlık levhasının kalınlığı $t_p = 20 \text{ mm}$ olarak öngörülmüştür. Kiriş enkesitinin enine doğrultusunda iki bulon arasındaki uzaklık 75 mm olarak belirlenmiştir. Bulonların merkezi ile kiriş başlıklarının kenarları arasındaki uzaklık bulon çapının 1,5 katından büyük olacak şekilde 30 mm olarak; başlık levhasının genişliği ise 165 mm olarak belirlenmiştir (Şekil A.1).



Şekil A.1 : Kiriş enine doğrultuda bulon yerleşimi.

Belirlenen boyutlar göz önünde bulundurularak, birleşimin kayma etkisindeki dayanımı r_n , bulonun kesme kuvveti dayanımı ve bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bulon sınıfı 10.9 olarak kabul edilmiştir.

$$r_n = \min \begin{bmatrix} 1,0F_{nv}A_b \\ 2,4F_{ub}d_b t_f \\ 2,4F_{up}d_b t_p \end{bmatrix}$$

$$r_n = \min \begin{bmatrix} 1,0 \times (0,563 \times 1000) \times 201 \times 10^{-3} \\ 2,4 \times 430 \times 16 \times 10,2 \times 10^{-3} \\ 2,4 \times 510 \times 16 \times 20 \times 10^{-3} \end{bmatrix} = 113,2 \text{ kN}$$

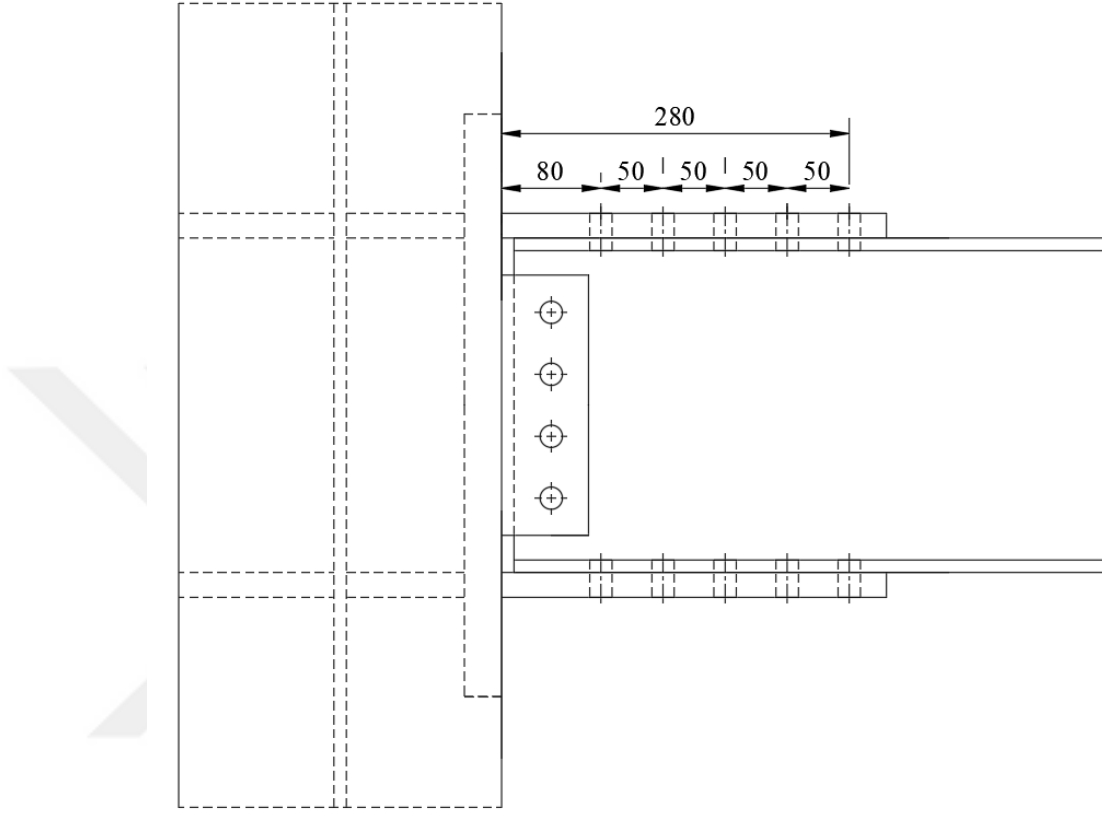
Birleşimin kayma etkisindeki dayanımının hesaplanması ile gerekli bulon sayısı öngörülmüştür.

$$n_b \geq \frac{1,25M_{pr}}{\phi_n r_n (d + t_p)} = \frac{1,25 \times 207,6 \times 10^6}{0,90 \times 113,2 \times 10^3 \times (270 + 20)} = 8,8$$

Elde edilen sonuca göre en az 9 adet bulonun kullanılması gerekmektedir. Birleşimde, kiriş enkesiti doğrultusunda iki sıra bulon yerleştirileceğinden bulon sayısının çift sayı olarak belirlenmesi gerekir. Bu nedenle bulon sayısı 10 adet olarak belirlenmiştir. Plastik mafsallın kolon başlıklarının arasına kaynaklanan alın levhası yüzünden

uzaklığı (l_h), birleşimde 10 adet bulonun 5 sıra halinde yerleştirileceği dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil A.2).

$$l_h = s_e + s_i \left(\frac{n_b}{2} - 1 \right) = 80 + 50 \times \left(\frac{10}{2} - 1 \right) = 280 \text{ mm}$$



Şekil A.2 : Plastik mafsallın yeri.

Plastik mafsallın yeri dikkate alınarak plastik mafsaldaki gerekli kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \frac{b_c}{2} = 6,260 - 2 \times 0,280 - 2 \times \frac{0,260}{2} = 5,44 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 207,6 + 0 + \frac{7,50 \times 5,44^2}{2}}{5,44} = 96,72 \text{ kN}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak kolon başlıkları arasına kaynaklanan alın levhasının yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_{uc}l_h = 207,6 + 96,72 \times 280 \times 10^{-3} = 234,7 \text{ kNm}$$

Başlık levhalarına etkiyen kuvvetler, alın levhasının yüzündeki gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_{uc} = M_f$), kiriş profilinin yüksekliği (d) ve başlık levhasının kalınlığı (t_p) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{pr} = \frac{M_f}{(d + t_p)} = \frac{234,7 \times 10^3}{270 + 20} = 809,2 \text{ kN}$$

Bu adımda, önceki adımlarda 10 adet olarak öngörülen bulon sayısının uygunluğu başlık levhalarına etkiyen kuvvet kullanılarak kontrol edilmiş ve bulon sayısının yeterli olduğu ortaya konmuştur.

$$n_b = 10 \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n r_n} = \frac{809,2}{0,90 \times 90,45} = 9,94$$

Önceki adımlarda 20 mm olarak öngörülen başlık levhası kalınlığı kontrol edilmiştir.

$$t_p = 20 \text{ mm} \geq \frac{F_{pr}}{\phi_d F_y b_{fp}} = \frac{809,2 \times 10^3}{1,00 \times 275 \times 165} = 17,8 \text{ mm}$$

Elde edilen sonuç ile 20 mm olarak belirlenen başlık levhası kalınlığının uygun olduğu gösterilmiştir.

Başlık levhası kalınlığının uygunluğunun kontrol edilmesinin ardından, başlık levhasının çekme kuvveti etkisinde kırılma/kopma sınır durumu AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4' e göre kontrol edilmiştir.

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 16 + 2 = 18 \text{ mm}$$

$$d_e = 18 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$b_{fp} = 165 \text{ mm}$$

$$A_g = b_{fp} t_p = 165 \times 20 = 3300 \text{ mm}^2$$

$$A_n = A_g - 2d_e t_p = 3300 - 2 \times 20 \times 20 = 2500 \text{ mm}^2$$

$$U = 1,00$$

$$A_e = U A_n = 1,00 \times 2500 = 2500 \text{ mm}^2$$

$$F_{up} = 510 \text{ MPa}$$

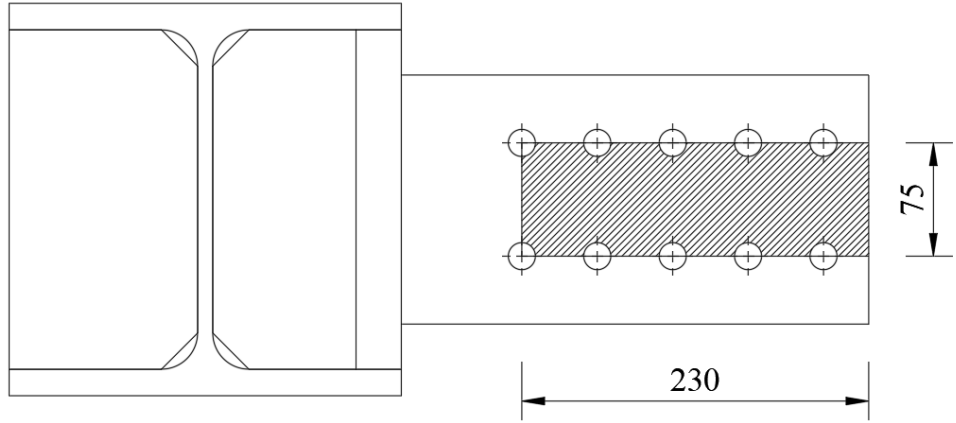
$$R_n = A_e F_{up} = 2500 \times 510 \times 10^{-3} = 1275 \text{ kN}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$F_{pr} = 809,2 \text{ kN} < \phi_n R_n = 0,90 \times 1275 \text{ kN} = 1147 \text{ kN}$$

Başlık levhasının çekme kuvveti etkisinde kırılma sınır durumuna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Başlık levhasının blok kırılma dayanımı AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2’te tanımlanan şekilde hesaplanmıştır. Blok kırılma dayanımı başlık levhasında ve kiriş başlığında hesaplanacaktır. Başlık levhasında 2 adet kırılma modu, kiriş başlığında ise 1 adet kırılma modu incelenecektir. Başlık levhasında birinci blok kırılma modu Şekil A.3’te gösterilmiştir.



Şekil A.3 : Başlık levhasında 1.blok kırılma modu.

Bu blok kırılma modunda kayma gerilmesi etkisinde iki düzlem (n_{vp}); çekme gerilmesi etkisinde ise bir düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4,5$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesiti alanından (A_{gt}), $n_{tde} = 1$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 230 \text{ mm}$ olarak; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği ise $b_t = 75 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür.

Çekme gerilmesi etkisinde üniform gerilme dağılımı olduğu göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 1,00$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 2$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$b_s = 230 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{vp} t_p b_s = 2 \times 20 \times 230 = 9200 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp} n_{vde} t_p d_e = 9200 - 3600 = 5600 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 1$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$b_t = 75 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp} t_p b_t = 1 \times 20 \times 75 = 1500 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp} n_{tde} t_p d_e = 1,500 - 400 = 1,100 \text{ mm}^2$$

S355 yapı çeliği için karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 355 \text{ MPa}$ ve karakteristik çekme dayanımı $F_{up} = 510 \text{ MPa}$ şeklinde dikkate alınmış ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(0,60 F_{yp} A_{gv} \right) + U_{bs} F_{up} A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 \times 355 \times 9200 \times 10^{-3}}{0,60 \times 510 \times 5600 \times 10^{-3}} \right) + 1,00 \times 510 \times 1100 \times 10^{-3}$$

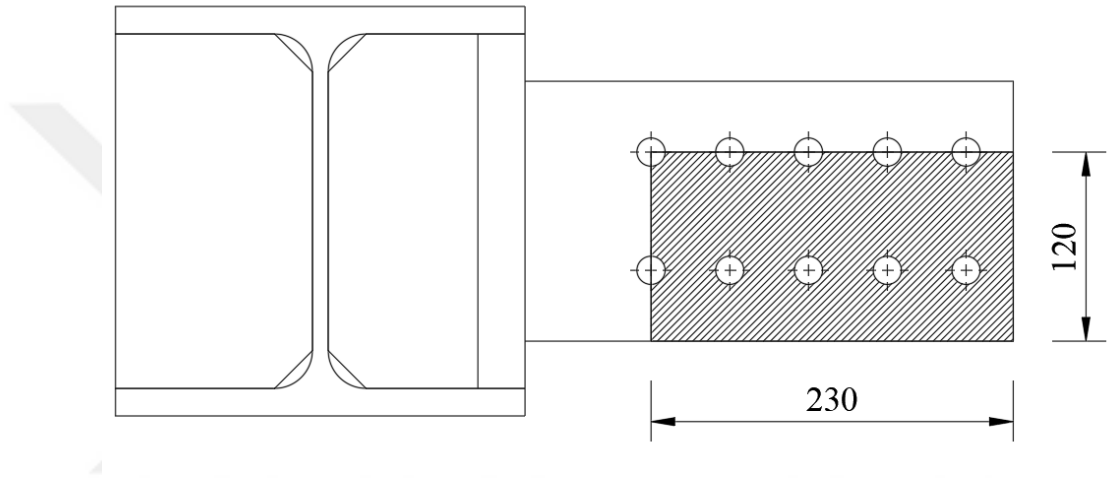
$$R_{nbs} = 2,275 \text{ kN}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$F_{pr} = 809,2 \text{ kN} < \phi_n R_n = 0,90 \times 2275 \text{ kN} = 2048 \text{ kN}$$

Başlık levhası, belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahiptir.

Başlık levhasında ikinci blok kırılma modu Şekil A.4'te gösterilmiştir.



Şekil A.4 : Başlık levhasında 2.blok kırılma modu.

Bu blok kırılma modunda kayma gerilmesi etkisinde bir düzlem (n_{vp}); çekme gerilmesi etkisinde de bir düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4,5$ adet etkili delik çapının elemanın kalınlığı ile çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gt}), $n_{tde} = 1,5$ adet etkili delik çapının elemanın kalınlığı ile çarpılması sonucu elde edilen değer çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 280 \text{ mm}$ olarak; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği $b_t = 120 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Çekme üniform olmayan gerilme dağılımı göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 0,50$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 1$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$b_s = 230 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{vp} t_p b_s = 1 \times 20 \times 230 = 4600 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp} n_{vde} t_p d_e = 4600 - 1800 = 2800 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 1$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$b_t = 120 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp} t_p b_t = 1 \times 20 \times 120 = 2400 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1,5$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp} n_{tde} t_p d_e = 2400 - 600 = 1800 \text{ mm}^2$$

S355 yapı çeliği için karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 355 \text{ MPa}$ ve karakteristik çekme dayanımı $F_{up} = 510 \text{ MPa}$ şeklinde dikkate alınmış ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 F_{yp} A_{gv}}{0,60 F_{up} A_{nv}} \right) + U_{bs} F_{up} A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 \times 355 \times 4600 \times 10^{-3}}{0,60 \times 510 \times 2800 \times 10^{-3}} \right) + 0,50 \times 510 \times 1800 \times 10^{-3}$$

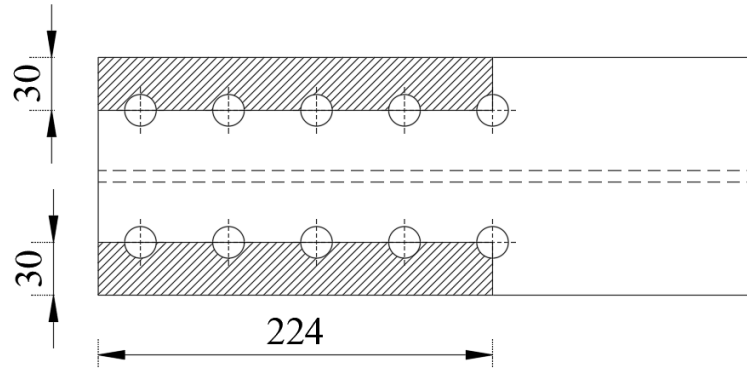
$$R_{nbs} = 1316 \text{ kN}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$F_{pr} = 809,2 \text{ kN} < \phi_n R_n = 0,90 \times 1316 \text{ kN} = 1184 \text{ kN}$$

Başlık levhası, belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahiptir.

Kiriş başlığında incelenen blok kırılma modu Şekil A.5'te gösterilmiştir.



Şekil A.5 : Kiriş başlığındaki blok kırılma modu.

Bu blok kırılma modunda kayma gerilmesi etkisinde iki düzlem (n_{vp}); çekme gerilmesi etkisinde de iki düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4,5$ adet etkili delik çapının elemanın kalınlığı ile çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gt}), $n_{tde} = 1$ adet etkili delik çapının elemanın kalınlığı ile çarpılması sonucu elde edilen değerin çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 270 \text{ mm}$ olarak; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği $b_t = 30 \times 2 = 60 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisinde üniform gerilme dağılımı olduğu göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 1,00$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$n_{vp} = 2$$

$$t_{bf} = 10,2 \text{ mm}$$

$$b_s = 270 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{vp} t_{bf} b_s = 2 \times 10,2 \times 270 = 5508 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp}n_{vde}t_{bf}d_e = 5508 - 1836 = 3672 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemlerde dikkate alınacak kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$n_{tp} = 0,50 \times 2 = 1,00$$

$$t_{bf} = 10,2 \text{ mm}$$

$$b_t = 60 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp}t_{bf}b_t = 1,00 \times 10,2 \times 60 = 612 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp}n_{tde}t_{bf}d_e = 612 - 204 = 408 \text{ mm}^2$$

S275 yapı çeliği için karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 275 \text{ MPa}$ ve karakteristik çekme dayanımı $F_{up} = 430 \text{ MPa}$ şeklinde dikkate alınmış ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(0,60F_{yp}A_{gv}, 0,60F_{up}A_{nv} \right) + U_{bs}F_{up}A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(0,60 \times 275 \times 5508 \times 10^{-3}, 0,60 \times 430 \times 3672 \times 10^{-3} \right) + 1,00 \times 430 \times 408 \times 10^{-3}$$

$$R_{nbs} = 1084 \text{ kN}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$F_{pr} = 809,2 \text{ kN} < \phi_n R_n = 0,90 \times 1084 = 975,6 \text{ kN}$$

Kiriş başlığı, belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahiptir.

Başlık levhasının basınç kuvveti etkisindeki dayanımı AISC 360-22 Bölüm J4.4 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 8.2'de belirtildiği gibi hesaplanmıştır. AISC 358-22'de önerildiği etkili burkulma boyu $KL = 0,65s_e$ şeklinde kabul edilmiştir.

$$s_e = 0,08 \text{ m}$$

$$L_c = KL = 0,65 \times 0,08 = 0,052 \text{ m}$$

$$b_{fp} = 165 \text{ mm}$$

$$t_p = 20 \text{ mm}$$

$$A_p = b_{fp} t_p = 165 \times 20 = 3300 \text{ mm}^2$$

$$I_p = \frac{t_p^3 b_{fp}}{12} = \frac{20^3 \times 165}{12} = 110000 \text{ mm}^4$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{I_p}{A_p}\right)} = 5.77 \text{ mm}$$

$$\frac{L_c}{r} = \frac{0,052 \times 10^3}{5,77} = 9,00 < 25$$

$$P_n = F_{yp} A_p = 355 \times 3300 \times 10^{-3} = 1171 \text{ kN}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$P_d = \phi_n P_n = 0,90 \times 1171 = 1054 \text{ kN}$$

$$F_{pr} = 809,2 \text{ kN} < P_d = 1054 \text{ kN}$$

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (A.1).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (\text{A.1})$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1,00$ olarak alınmıştır.

$$A_w = d t_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,72 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimde kesme kuvvetinin bir kayma levhası kullanılarak 4 adet M16 10.9 sınıfı bulon ile aktarılacağı öngörülmüş ve kayma levhasının kalınlığı $t_{wp} = 10 \text{ mm}$ olarak kabul edilmiştir. Ardından bulonların kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$A_b = 201,1 \text{ mm}^2$$

$$n_b = 4$$

$$F_{nv} = 450 \text{ MPa}$$

$$\phi_n = 0,90$$

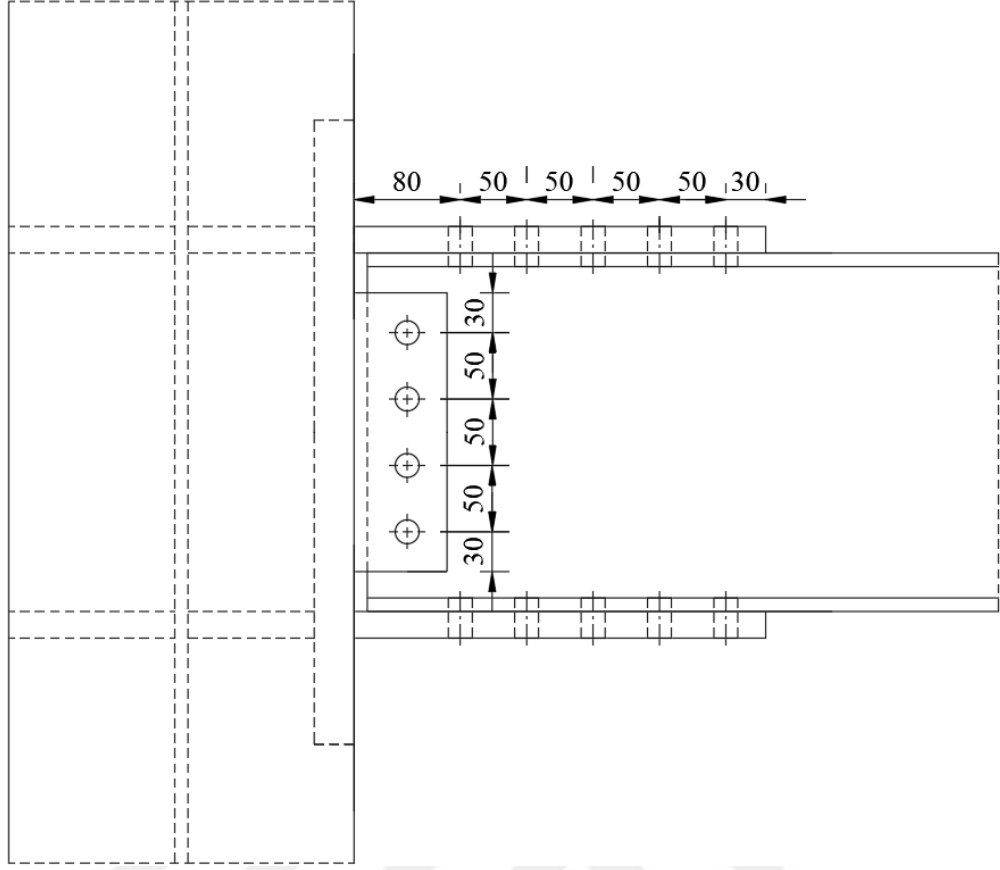
$$V_{uc} \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b = 0,90 \times 4 \times 450 \times 201,1 \times 10^{-3} = 325,8 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,72 \text{ kN} \leq 325,8 \text{ kN}$$

Bulonların kesme kuvveti dayanımı yeterlidir.

Bir sonraki hesap adımında bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

İlk olarak, kuvvet doğrultusunda, bulon deliklerinin kenarından levha kenarına uzaklık (l_{ce}); bir delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki uzaklık (l_{ci}) belirlenmiştir. Bu uzaklıkların belirlenmesi için bulon deliği merkezinden levhanın kenarına olan uzaklık (L_e) ve iki bulon deliğinin merkezi arasındaki uzaklık (L_i) kullanılmıştır (Şekil A.6).



Şekil A.6 : Birleşimde bulonlar arasındaki ve bulonlar ile levha kenarları arasındaki uzaklıklar.

Birleşimde kuvvet doğrultusunda 1 adet kenar bulon deliği (n_e) ve 3 adet iç bulon deliği (n_i) bulunmaktadır.

Kenar bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_e = 1$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_e = 30 \text{ mm}$$

$$l_{ce} = L_e - \frac{d_h}{2} = 30 - \frac{18}{2} = 21 \text{ mm}$$

$$t_{wb} = 6,6 \text{ mm}$$

$$t_{wp} = 10 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \min(t_{wp}, t_{wb}) = \min(10, 6,6) = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,e1} = n_e 1,2 l_{ce} t_{min} F_u = 1 \times 1,2 \times 21 \times 6,6 \times 510 \times 10^{-3} = 84,8 \text{ kN}$$

$$r_{n,e2} = n_e 2,4 d_b t_{min} F_u = 1 \times 2,4 \times 16 \times 6,6 \times 510 \times 10^{-3} = 129,2 \text{ kN}$$

$$r_{n,e1} = 84,8 \text{ kN} \leq r_{n,e2} = 129,2 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

İç bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_i = 3$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_i = 50 \text{ mm}$$

$$l_{ci} = L_i - d_h = 50 - 18 = 32 \text{ mm}$$

$$t_{wb} = 6,6 \text{ mm}$$

$$t_{wp} = 10 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \min(t_{wp}, t_{wb}) = \min(10, 6,6) = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,i1} = n_i 1,2 l_{ci} t_{min} F_u = 3 \times 1,2 \times 32 \times 6,6 \times 510 \times 10^{-3} = 387,8 \text{ kN}$$

$$r_{n,i2} = n_i 2,4 d_b t_{min} F_u = 3 \times 2,4 \times 16 \times 6,6 \times 510 \times 10^{-3} = 387,8 \text{ kN}$$

$$r_{n,i1} = 387,8 \text{ kN} \leq r_{n,i2} = 387,8 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

Birleşimin tasarım ezilme kuvveti dayanımı $\phi_n R_n$, kenar ve iç bulon deliklerinin dayanımlarının toplamı şeklinde hesaplanır.

$$\phi_n = 0.90$$

$$\phi_n R_n = \phi_n r_{n,e1} + \phi_n r_{n,i1} = 0.90 \times 84,8 + 0.90 \times 387,8 = 425,3 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_p = 96,72 \text{ kN} \leq \phi_n R_n = 425,3 \text{ kN}$$

Bulon delikleri yeterli ezilme kuvveti dayanımına sahiptir.

Kayma levhasının tasarım kesme kuvveti dayanımı akma ve kırılma sınır durumları göz önünde bulundurularak ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$h_s = 210 \text{ mm}$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$t_{wp} = 10 \text{ mm}$$

$$n_b = 4$$

$$A_{gv} = h_s t_{wp} = 210 \times 10 = 2100 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_b d_e t_{wp} = 2100 - 4 \times 20 \times 10 = 1300 \text{ mm}^2$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$F_y = 355 \text{ MPa}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$\phi_d R_{ny} = \phi_d 0,60 F_y A_{gv} = 1,00 \times 0,60 \times 355 \times 2100 \times 10^{-3} = 447,3 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_p = 96,72 \text{ kN} \leq \phi_d R_{ny} = 447,3 \text{ kN}$$

$$\phi_n R_{nu} = \phi_n 0,60 F_u A_{nv} = 0,90 \times 0,60 \times 510 \times 1300 \times 10^{-3} = 358 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_p = 96,72 \text{ kN} \leq \phi_n R_{nu} = 358 \text{ kN}$$

Kayma levhasının yeterli kesme kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir.

Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından son adım olarak kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilir. Plastik mafsallık ile kolon merkezi arasındaki mesafe denklem A.2 ile hesaplanır (Şekil A.7).

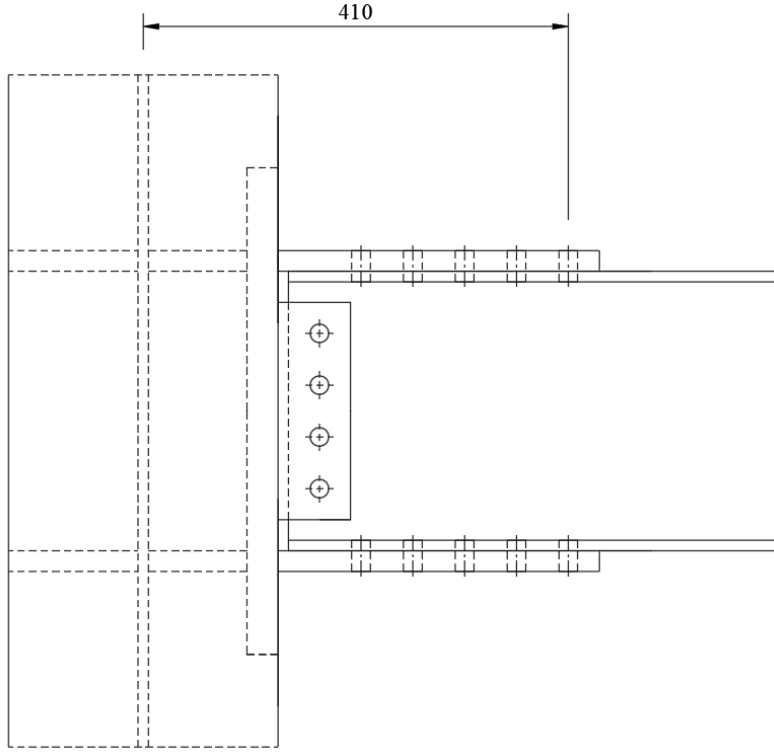
$$s_{h,bb} = \frac{d_c}{2} + l_h \quad (\text{A.2})$$

l_h : Plastik mafsallık kolon başlıklarının arasına kaynaklanan alın levhası yüzünden uzaklığı, mm.

d_c : Kolon enkesit yüksekliği, mm.

$$l_h = 280 \text{ mm}$$

$$s_{h,bb} = \frac{260}{2} + 280 = 410 \text{ mm}$$



Şekil A.7 : Plastik mafsalsın kolon merkezinden uzaklığı.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri (M_{uv}) bulonlu alın levhali birleşimde denklem A.3 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_{uc} \times s_{h,bb} \quad (\text{A.3})$$

V_{uc} : plastik mafsalsın konumundaki gerekli kesme kuvveti dayanımı, kN.

$s_{h,bb}$: Plastik mafsalsın ile kolon merkezi arasındaki uzaklık, mm.

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalsın beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır.

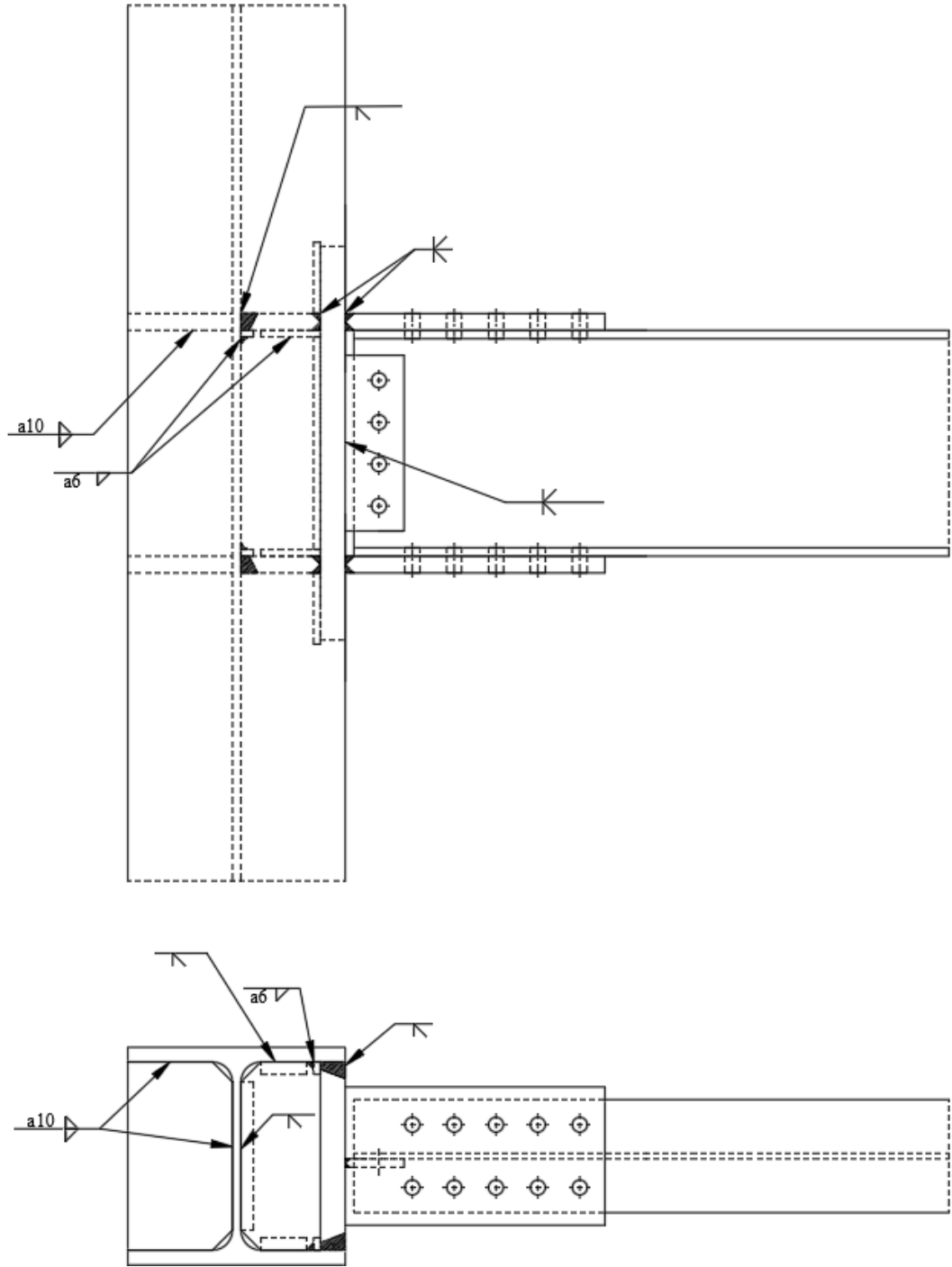
$$M_{uv} = 96,72 \times 410 \times 10^{-3} = 39,66 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 207,60 + 39,66 = 247,26 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = \frac{469,85}{247,26} = 1,90 > 1,00$$

Bulonlu başlık levhali I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil A.8’de gösterilmiştir.



Şekil A.8 : Birleşimdeki kaynak detayları.



EK B

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı (C_{pr}) TBDY 2018 Ek 9B.1.4'e göre 1,20 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

IPE270 profilinin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti $W_{pb} = 484 \times 10^3 \text{ mm}^3$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} = 1,20 \times 1,30 \times 275 \times 484 \times 10^3 \times 10^{-6} = 207,6 \text{ kNm}$$

Birleşim detayı değişkenleri aşağıdaki şekilde öngörülmüştür (Şekil B.1).

$$t_p = 25 \text{ mm}$$

$$b_p = 165 \text{ mm}$$

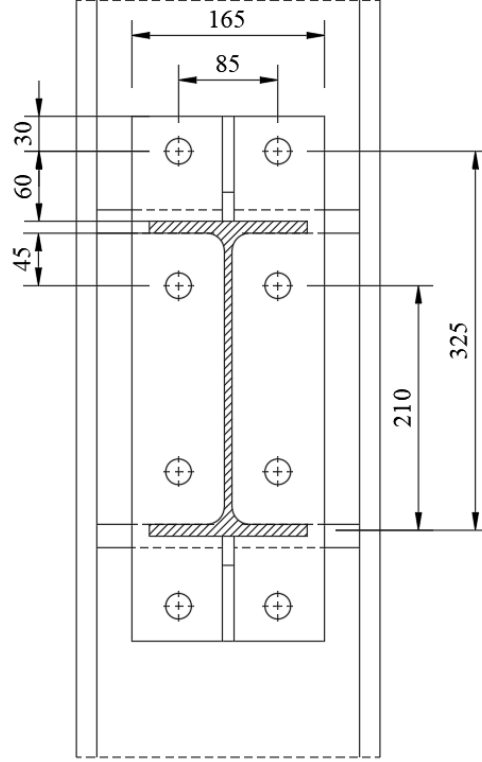
$$g = 85 \text{ mm}$$

$$p_{fi} = 45 \text{ mm}$$

$$p_{fo} = 60 \text{ mm}$$

$$d_b = 270 \text{ mm}$$

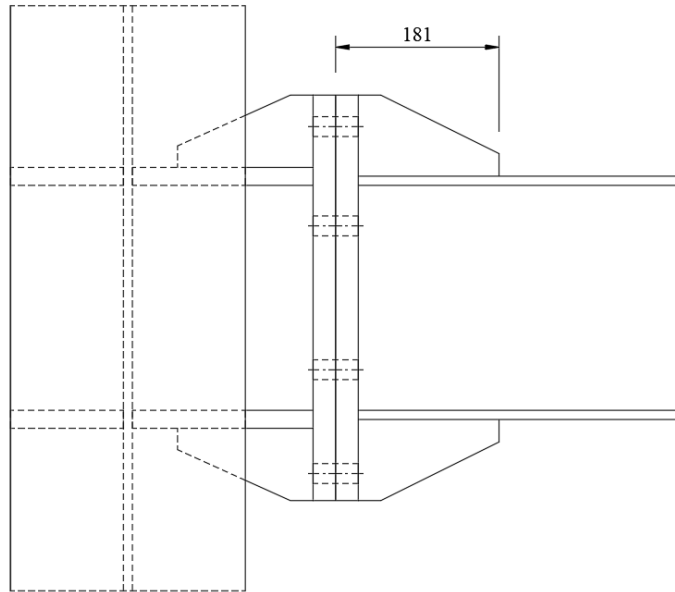
$$d_e = 30 \text{ mm}$$



Şekil B.1: Birleşim değişkenleri.

Plastik mafsalın alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyine uzaklığı (l_h), kiriş başlıkları ile alın levhaları arasındaki rijitlik levhalarının genişliği (L_b) ve alın levhasının kalınlığına (t_p) bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil B.2).

$$l_h = L_b + t_p = 156 + 25 = 181 \text{ mm}$$



Şekil B.2: Plastik mafsalın yeri.

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının uzunluğu (L_{bs}), uç alın levhasının kalınlığı (t_u) ve kolon gövde kalınlığı (t_{cw}) göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$t_u = 25 \text{ mm}$$

$$t_{cw} = 10 \text{ mm}$$

$$L_{bs} = 200 \text{ mm}$$

$$L = 6,26 \text{ m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \left(L_{bs} + \frac{t_{cw}}{2} \right) - 2 \times t_u$$

$$l_n = 6,26 - 2 \times 0,181 - 2 \times \left(0,20 + \frac{0,01}{2} \right) - 2 \times 0,025 = 5,44 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 207,6 + 0 + \frac{7,50 \times 5,44^2}{2}}{5,44} = 96,72 \text{ kN}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_{uc}l_h = 207,6 + 96,72 \times 181 \times 10^{-3} = 222,7 \text{ kNm}$$

Dört bulonun kullanıldığı alın levhalı birleşim tipi öngörülmüştür. Birleşimde kullanılacak bulonların çapı; alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_f = M_{uc}$), kirişin basınç etkisi altındaki başlığının merkezi ile çekme bölgesinde yer alan birinci sıradaki bulonların merkezleri arasındaki mesafe (h_1), kirişin basınç etkisi altındaki başlığının merkezi ile çekme bölgesindeki yer alan ikinci sıradaki bulonların merkezleri arasındaki mesafe (h_2) ve bulon karakteristik çekme gerilmesi dayanımı (F_{nt}) göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Şekil B.3).

$$h_1 = 325 \text{ mm}$$

$$h_2 = 210 \text{ mm}$$

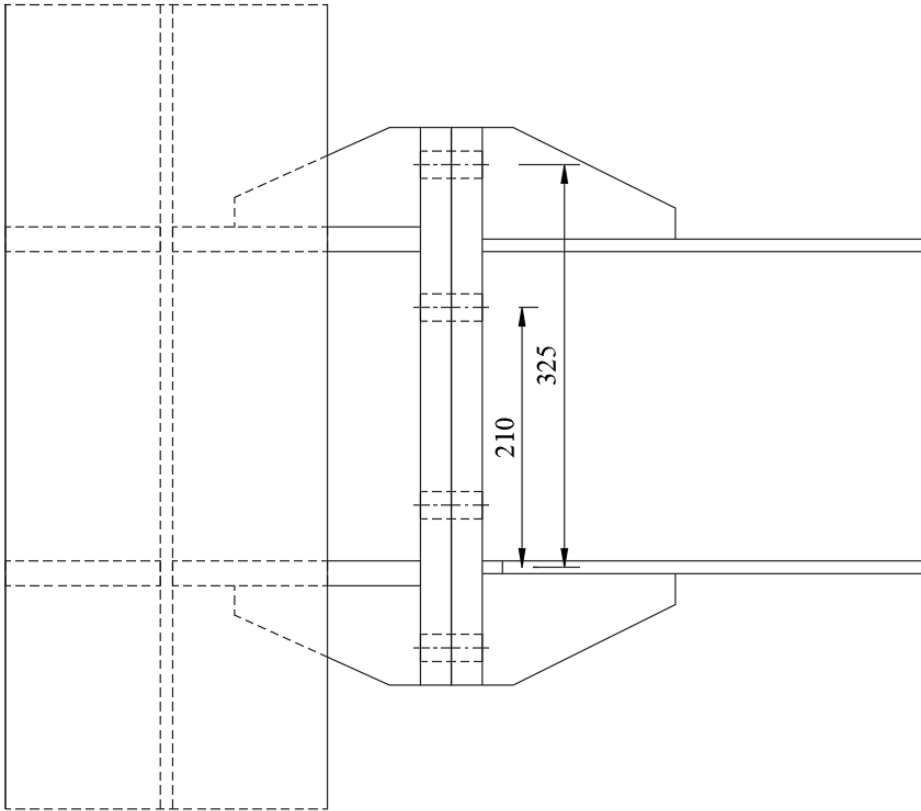
$$F_{nt} = 0,75F_u = 0,75 \times 1000 = 750 \text{ MPa}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$d_{b,req} = \sqrt{\frac{2M_f}{\pi\phi_n F_{nt}(h_1 + h_2)}} = \sqrt{\frac{2 \times 222,7 \times 10^6}{\pi \times 0,90 \times 750 \times (325 + 210)}}$$

$$d_{b,req} = 19,8 \text{ mm}$$

Bulon çapı $d_b = 20 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil B.3: Çekme etkisindeki bulon sıraları ile basınç başlığı merkezi arasındaki uzaklıklar.

Alın levhasının kalınlığının belirlenmesi için akma çizgisi mekanizması parametresi (Y_p) hesaplanacaktır. Y_p değeri, çekme bölgesinde yer alan birinci sıradaki bulonların merkezleri ile alın levhasının üst kenarına olan uzaklık (d_e) ile bulonlar arasındaki yatay mesafe (g) ve alın levhası genişliği b_p kullanılarak hesaplanan (s) parametresi arasındaki ilişkiye bağlı olarak belirlenmiştir (AISC 358-22 Tablo 6.3).

$$b_p = 165 \text{ mm}$$

$$g = 85 \text{ mm}$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} = \sqrt{165 \times 85} = 59 \text{ mm}$$

$d_e = 30 \text{ mm} \leq s = 59 \text{ mm}$ olduğundan Y_p parametresi AISC 358-22 Tablo 6.3 Durum 1'de verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$b_p = 165 \text{ mm}$$

$$g = 85 \text{ mm}$$

$$h_1 = 324,9 \text{ mm}$$

$$h_2 = 209,7 \text{ mm}$$

$$p_{fi} = 45 \text{ mm}$$

$$p_{fo} = 60 \text{ mm}$$

$$d_e = 30 \text{ mm}$$

$$s = 59 \text{ mm}$$

$$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_2 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_1 \left(\frac{1}{p_{fo}} + \frac{1}{2d_e} \right) \right] + \frac{2}{g} [h_2(p_{fi} + s) + h_1(d_e + p_{fo})]$$

$$Y_p = 2772 \text{ mm}$$

Alın levhasının gerekli kalınlığı $t_{p,req}$, Y_p parametresi kullanılarak belirlenmiştir.

$$t_{p,req} = \sqrt{\frac{1,11M_f}{\phi_d F_{yp} Y_p}} = \sqrt{\frac{1,11 \times 222,6 \times 10^6}{1,00 \times 355 \times 2772}} = 15,9 \text{ mm}$$

$t_p = 25 \text{ mm}$ olarak öngörülen alın levhası kalınlığının yeterli olduğu gösterilmiştir.

Kiriş başlıklarına etkiyen kuvvetler, alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_f = M_{uc}$), kiriş enkesit yüksekliği (d) ve kiriş başlığının kalınlığı (t_{bf}) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_{bf} = 10,2 \text{ mm}$$

$$F_{pr} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} = \frac{222,7 \times 10^3}{270 - 25} = 908,6 \text{ kN}$$

Bu adımda birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlıkları (t_s) belirlenmiştir.

$$t_{bw} = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa}$$

$$F_{ys} = 355 \text{ MPa}$$

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) = 6,6 \times \left(\frac{275}{355} \right) = 5,1 \text{ mm}$$

$$t_s = 10 \text{ mm}$$

Rijitleştirici levhada yerel burkulmanın önlenmesi için gerekli şart sağlanmıştır.

$$h_{st} = 90 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\frac{h_{st}}{t_s} = \frac{90}{10} = 9 \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}} \right)} = 0,56 \times \sqrt{\left(\frac{200000}{355} \right)} = 13,29 \text{ mm}$$

Rijitleştirici levha yerel burkulmaya karşı yeterli dayanıma sahiptir.

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (B.1).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (\text{B.1})$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1,00$ olarak alınmıştır.

$$A_w = d t_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,72 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimdeki kesme kuvvetlerinin basınç başlığındaki 4 (dört) adet 10.9 sınıfı M20 bulon tarafından karşılanacağı varsayılmış ve bulonların kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$d_b = 20 \text{ mm}$$

$$A_b = 314,2 \text{ mm}^2$$

$$n_b = 4$$

$$F_{nv} = 450 \text{ MPa}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$V_{uc} \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b = 0,90 \times 4 \times 450 \times 314,2 \times 10^{-3} = 509 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,72 \text{ kN} \leq 509 \text{ kN}$$

Basınç başlığındaki bulonların kesme kuvvetine karşı yeterli dayanıma sahip oldukları belirlenmiştir.

Bulonların kesme kuvveti dayanımının hesaplanmasının ardından, basınç kuvveti etkisi altındaki alın levhası bölgesindeki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları hesaplanmıştır.

İlk olarak, kuvvet doğrultusunda, bulon deliklerinin kenarından levha kenarına uzaklık (l_{ce}); bir delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki uzaklık (l_{ci}) belirlenmiştir. Bu uzaklıkların belirlenmesi için bulon deliği merkezinden levhanın kenarına olan uzaklık (L_e) ve iki bulon deliğinin merkezi arasındaki uzaklık (L_i) kullanılmıştır.

Basınç başlığında yer alan birinci sıradaki bulon delikleri “kenar bulon delikleri”; ikinci sıradaki bulon delikleri ise “iç bulon delikleri” olarak sınıflandırılır. Birleşimde 2 adet kenar bulon deliği (n_e); 2 adet iç bulon deliği (n_i) bulunmaktadır.

Kenar bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_e = 2$$

$$L_e = 30 \text{ mm}$$

$$l_{ce} = L_e - \frac{d_h}{2} = 30 - \frac{22}{2} = 19 \text{ mm}$$

$$t_p = 25 \text{ mm}$$

$$d_b = 20 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,e1} = n_e 1,2 l_{ce} t_p F_u = 2 \times 1,2 \times 19 \times 25 \times 510 \times 10^{-3} = 581 \text{ kN}$$

$$r_{n,e2} = n_e 2,4 d_b t_p F_u = 2 \times 2,4 \times 20 \times 25 \times 510 \times 10^{-3} = 1224 \text{ kN}$$

$$r_{n,e1} = 581 \text{ kN} \leq r_{n,e2} = 1224 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

İç bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_i = 2$$

$$L_i = 115 \text{ mm}$$

$$l_{ci} = L_i - d_h = 115 - 22 = 93 \text{ mm}$$

$$t_p = 25 \text{ mm}$$

$$d_b = 20 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,i1} = n_i 1,2 l_{ci} t_p F_u = 2 \times 1,2 \times 93 \times 25 \times 510 \times 10^{-3} = 2846 \text{ kN}$$

$$r_{n,i2} = n_i 2,4 d_b t_p F_u = 2 \times 2,4 \times 20 \times 25 \times 510 \times 10^{-3} = 1224 \text{ kN}$$

$$r_{n,i1} = 2846 \text{ kN} \geq r_{n,i2} = 1224 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

Birleşimin tasarım ezilme kuvveti dayanımı $\phi_n R_n$, kenar ve iç bulon deliklerinin dayanımlarının toplamı şeklinde hesaplanır.

$$\phi_n = 0,90$$

$$\phi_n R_n = \phi_n r_{n,e1} + \phi_n r_{n,i2} = 0,90 \times 581 + 0,90 \times 1224 = 1625 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_p = 96,72 \text{ kN} \leq \phi_n R_n = 1625 \text{ kN}$$

Bulon delikleri basınç kuvveti etkisi altındaki alın levhası bölgesinde yeterli ezilme kuvveti dayanımına sahiptir.

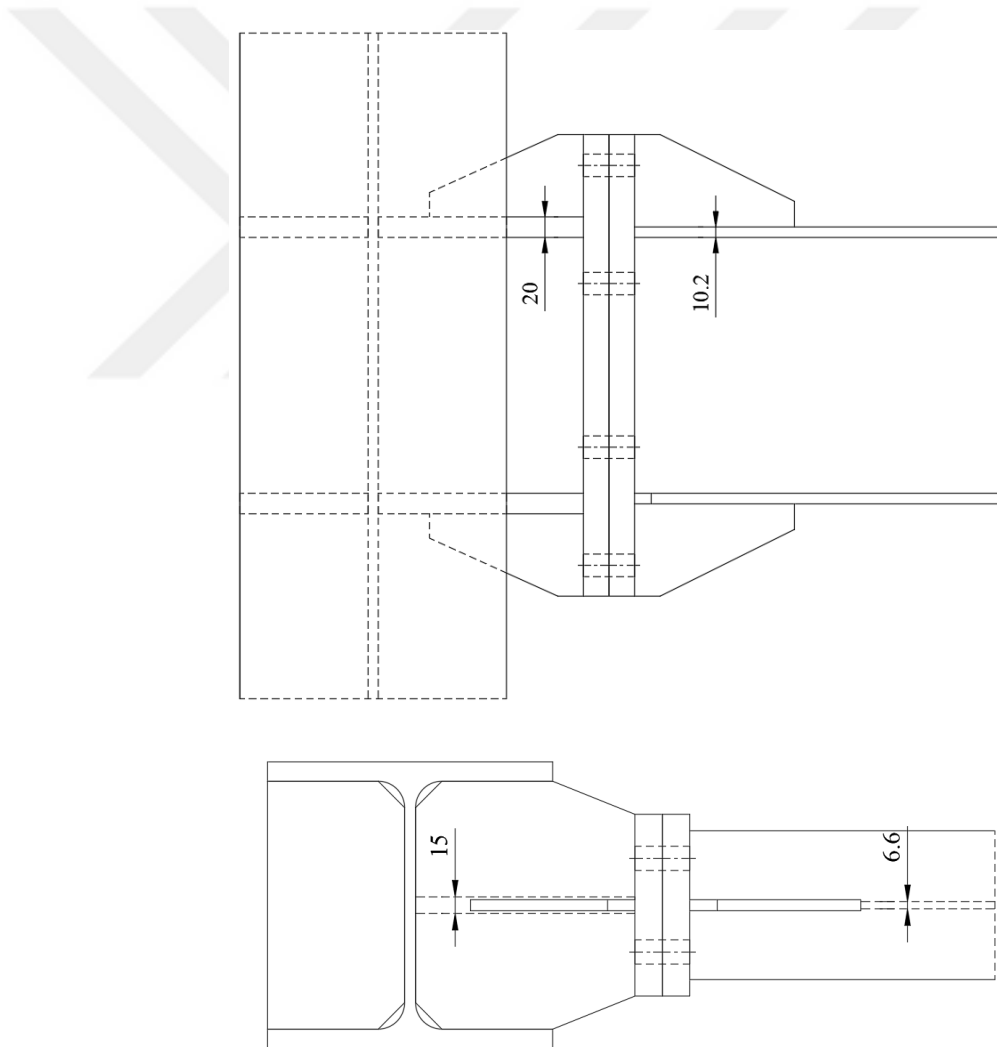
Kiriş başlıkları ve gövdesi hizasındaki bağlantı levhalarının uç kısmında yer alan uç levhasının kalınlığının belirlenmesinde, akma çizgisi mekanizması parametresi Y_p , önceki adımlarda alın levhası için yapılan hesaplamalarla aynı yöntem izlenerek

hesaplanmıştır ve uç levhasının kalınlığı (t_u) alın levhasının kalınlığı (t_p) ile aynı olacak şekilde 25 mm olarak belirlenmiştir.

Uç levhasına, kolon gövdesine ve kirişin başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarına kaynaklanan kiriş gövdesi hizasında yer alan bağlantı levhasının kalınlığı (t_{sw}); uç levhasına, kolon gövdesi ile başlıklarına ve kiriş gövdesinin hizasındaki bağlantı levhasına kaynaklanan, kiriş başlıkları hizasındaki başlık bağlantı levhalarının kalınlığı (t_{sf}), sırasıyla kiriş gövde kalınlığı (t_{bw}) ve kiriş başlık kalınlığından (t_{bf}) daha kalın olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil B.4).

$$t_{bf} = 10.2 \text{ mm} < t_{sf} = 20 \text{ mm}$$

$$t_{bw} = 6.6 \text{ mm} < t_{sw} = 15 \text{ mm}$$



Şekil B.4: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.

Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından son adım olarak kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilir. Plastik mafsallın ile kolon merkezi arasındaki uzaklık denklem B.2 ile hesaplanır (Şekil B.5).

$$s_{h,ba} = \frac{t_{cw}}{2} + L_{bs} + t_u + l_h \quad (B.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

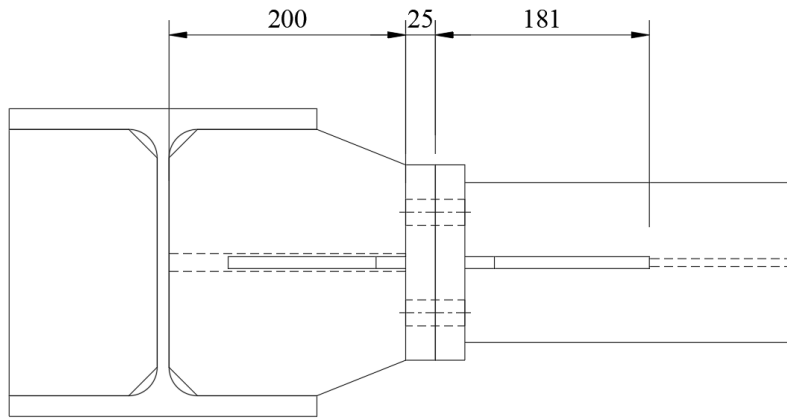
L_{bs} : Başlık bağlantı levhasının uzunluğu, mm.

t_{cw} : Kolon gövde kalınlığı, mm.

t_u : Uç levhasının kalınlığı, mm.

l_h : Plastik mafsallın alın levhası ve uç levhasının birleşim yüzeyine uzaklığı, mm.

$$s_{h,ba} = \frac{t_{cw}}{2} + L_{bs} + t_u + l_h = \frac{10}{2} + 200 + 25 + 181 = 411 \text{ mm}$$



Şekil B.5: Plastik mafsallın ile kolon merkezi arasındaki uzaklık.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri (M_{uv}) bulonlu alın levhalı birleşimde denklem B.3 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_p \times s_{h,ba} \quad (B.3)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

V_{uc} : Plastik mafsall konumundaki gerekli kesme kuvveti dayanımı, kN.

$s_{h,ba}$: Plastik mafsall ile kolon merkezi arasındaki uzaklık, mm.

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri göz önüne alınarak kiriş boyuna eksenel hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı (ΣM_{pc}^*) bu tezdeki 4.2 numaralı “Birleşim Tasarımındaki Genel koşullar” bölümünde hesaplanmıştır.

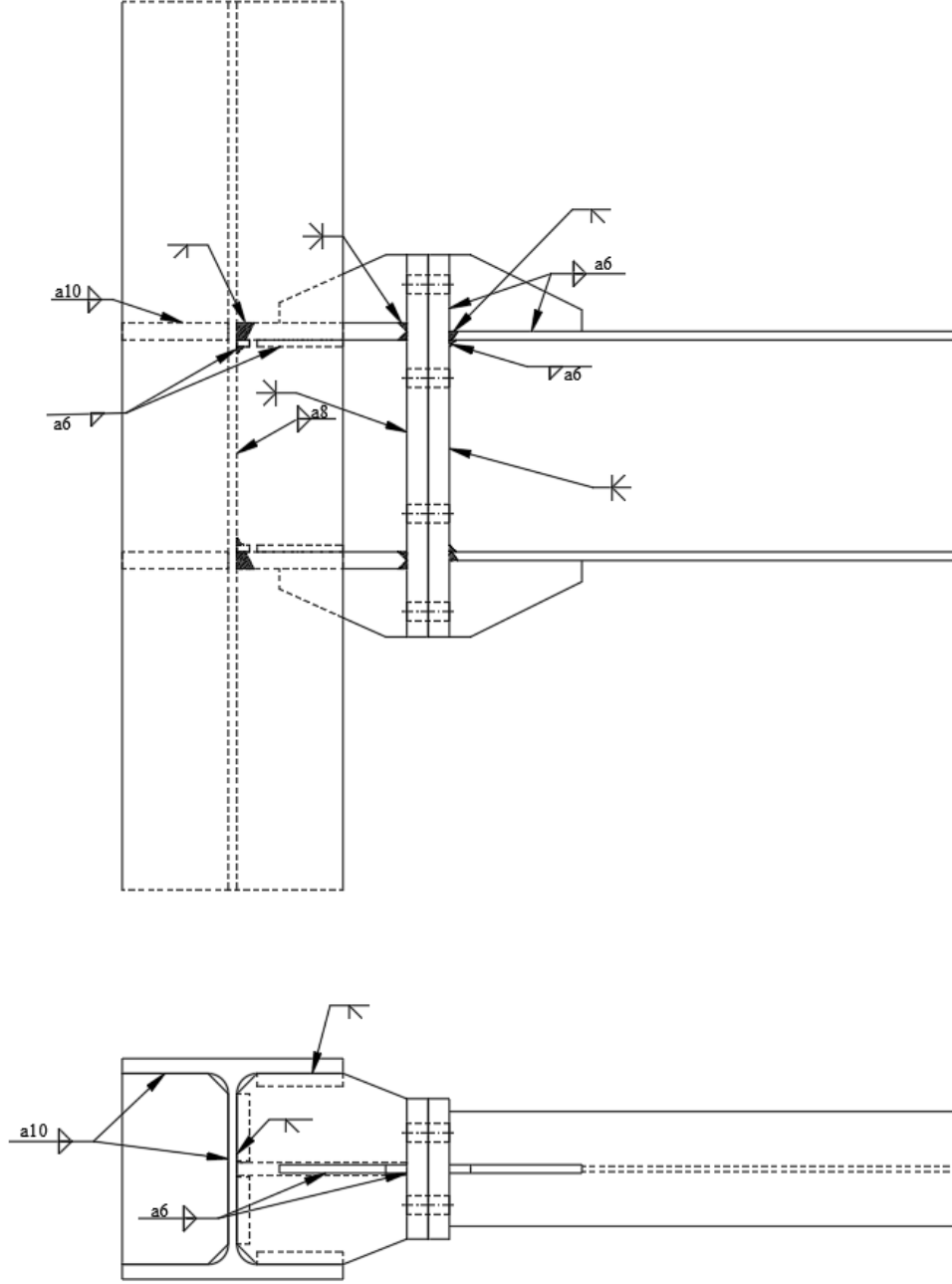
$$M_{uv} = 96,72 \times 411 \times 10^{-3} = 39,75 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 207,60 + 39,75 = 247,4 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = \frac{469,9}{247,4} = 1,90 > 1,00$$

Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil B.6’da gösterilmiştir.



Şekil B.6: Birleşimdeki kaynak detayları.

EK C

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

IPE 270 profiline sahip kiriş elemanının geometrisini göz önünde bulundurularak azaltılmış kiriş enkesitinin boyutları a , b ve c değerleri belirlenmiştir (Şekil C.1).

$$0.5b_{bf} = 67.5 \text{ mm} \leq a \leq 0.75b_{bf} = 101.2 \text{ mm}$$

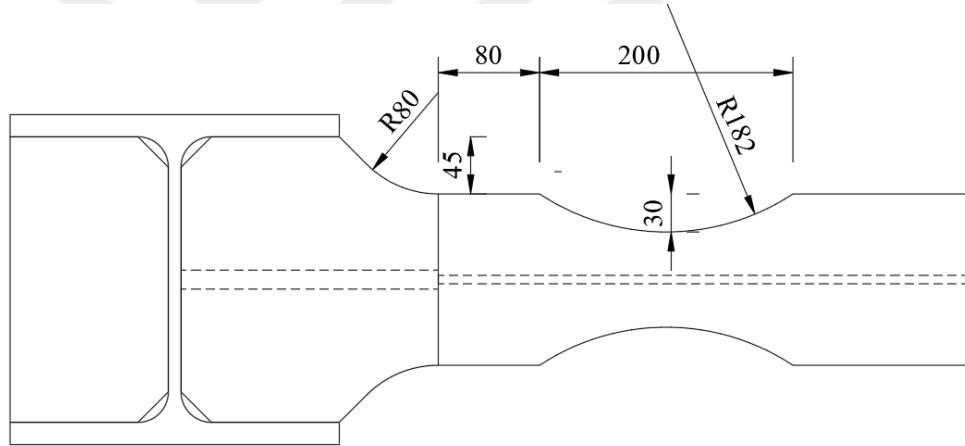
$$a = 80 \text{ mm}$$

$$0.65d = 175.5 \text{ mm} \leq b \leq 0.85d = 229.5 \text{ mm}$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$0.1b_{bf} = 13.5 \text{ mm} \leq c \leq 0.25b_{bf} = 33.75 \text{ mm}$$

$$c = 30 \text{ mm}$$



Şekil C.1: Azaltılmış kiriş enkesiti geometrisi.

Zayıflatılmış bölgedeki kesim yarı çapı (R) denklem C.1 kullanılarak hesaplanmıştır (C.1).

$$R = \frac{4c^2 + b^2}{8c} \quad (\text{C.1})$$

$$R = \frac{4c^2 + b^2}{8c} = \frac{4 \times 30^2 + 200^2}{8 \times 30} = 182 \text{ mm}$$

Bir sonraki adımda, azaltılmış kiriş enkesitinin merkezinde plastik mukavemet momenti hesaplanmıştır.

$$W_{p,RBS} = W_{p,b} - 2ct_{bf}(d_k - t_{bf})$$

$$W_{p,RBS} = 484 \times 10^3 - 2 \times 30 \times 10,2 \times (270 - 10,2)$$

$$W_{p,RBS} = 325 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı (C_{pr}) TBDY 2018 Ek 9B.1.4'e göre 1,20 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

Azaltılmış kiriş enkesitinin merkezindeki plastik mukavemet momenti kullanılarak plastik mafsalda beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr}R_yF_yW_p = 1,20 \times 1,30 \times 275 \times 325 \times 10^3 \times 10^{-6} = 139,4 \text{ kNm}$$

Plastik mafsalin zayıflatılmış kiriş enkesitinde oluşacağı göz önünde bulundurularak söz konusu enkesitin merkezi ile kiriş ucu arasındaki uzaklık belirlenmiştir.

$$l_h = a + \frac{b}{2} = 80 + \frac{200}{2} = 180 \text{ mm}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının uzunluğu (L_{bs}), kiriş ucu ile plastik mafsalin merkezi arasındaki uzaklık (l_h) ve kolon gövde kalınlığı (t_{cw}) göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \left(L_{bs} + \frac{t_{cw}}{2} \right)$$

$$L_{bs} = 203 \text{ mm}$$

$$l_n = 6,260 - 2 \times 0,18 - 2 \times \left(0,203 + \frac{0,01}{2} \right) = 5,48 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 139,4 + 0 + \frac{7,50 \times 5,48^2}{2}}{5,48} = 71,43 \text{ kN}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak kiriş ucunda gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_{uc}l_h = 139,4 + 71,44 \times 180 \times 10^{-3} = 152,3 \text{ kNm}$$

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (C.2).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (C.2)$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1,00$ olarak alınmıştır.

$$A_w = dt_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

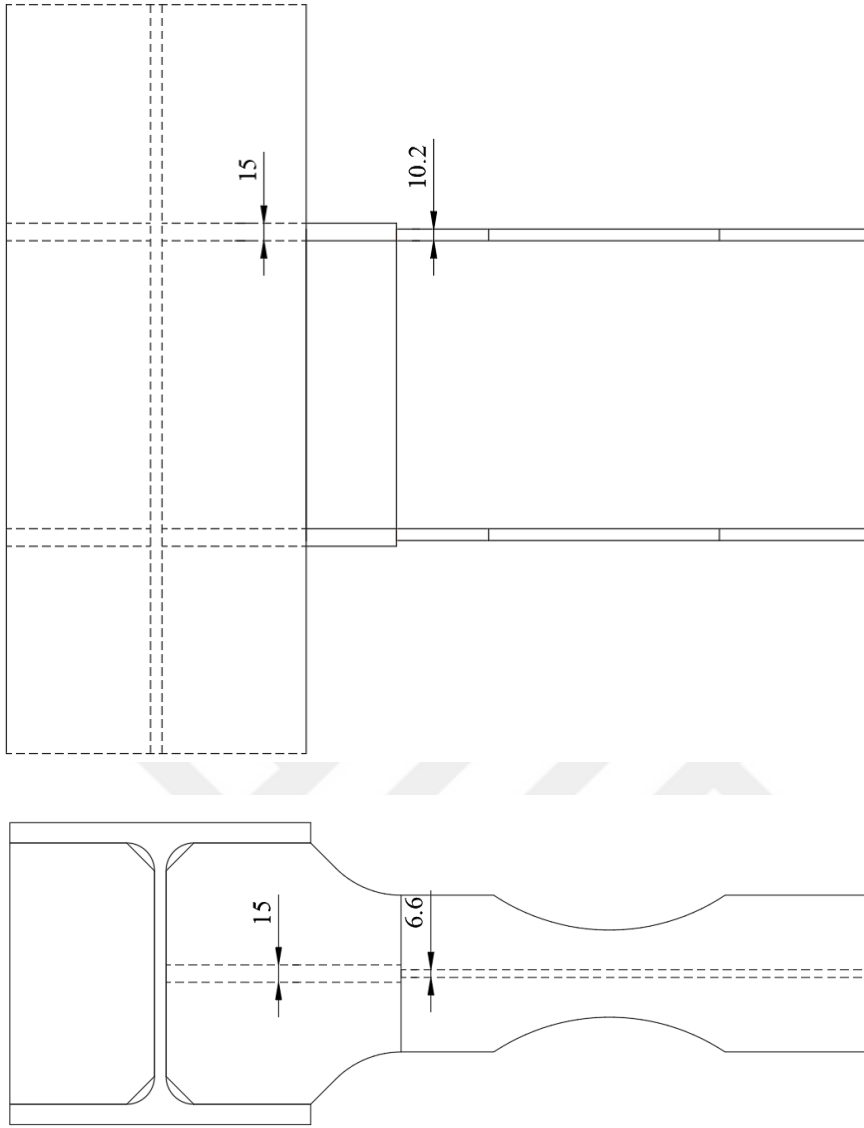
$$V_{uc} = V_h = 71,44 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimde kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı (t_{sw}); kiriş başlıkları hizasındaki başlık bağlantı levhalarının kalınlığı (t_{sf}), sırasıyla kiriş gövde kalınlığı (t_{bw}) ve başlık kalınlığından (t_{bf}) en az 3 mm kalın olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil C.2).

$$t_{bf} + 3 = 10,2 + 3 = 13,2 \text{ mm} \leq t_{sf} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{bw} + 3 = 6,6 + 3 = 9,6 \text{ mm} \leq t_{sw} = 15 \text{ mm}$$



Şekil C.2: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.

Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından son adım olarak kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilmiştir. Plastik mafsallın ile kolon merkezi arasındaki uzaklık denklem C.3 ile hesaplanır (Şekil C.3).

$$s_{h,RBS} = \frac{t_{cw}}{2} + L_{bs} + l_h \quad (C.3)$$

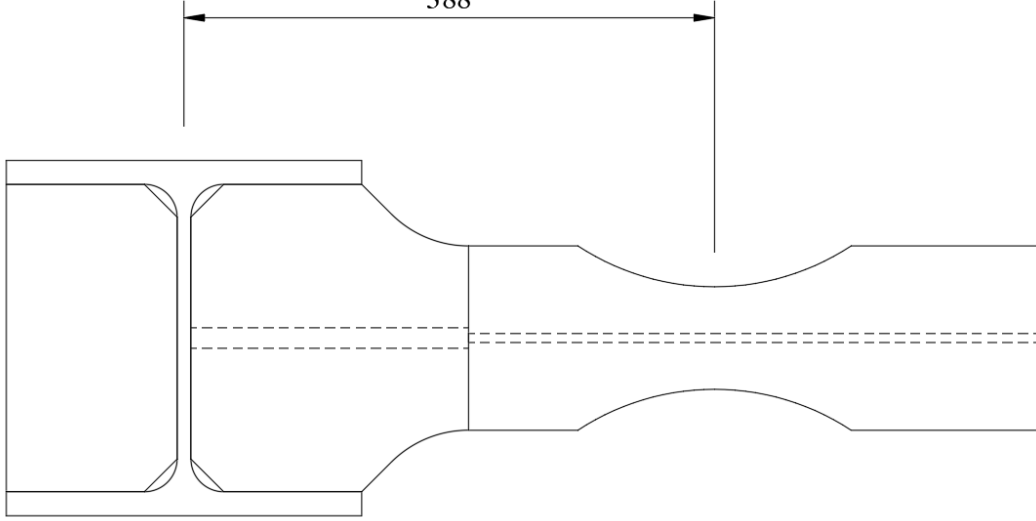
Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

L_{bs} : Başlık bağlantı levhasının uzunluğu, mm.

t_{cw} : Kolon gövde kalınlığı, mm.

l_h : Kiriş ucu ile plastik mafsallın merkezi arasındaki uzaklık, mm.

$$s_{h,RBS} = \frac{t_{cw}}{2} + L_{bs} + l_h = \frac{10}{2} + 203 + 180 = 388 \text{ mm}$$



Şekil C.3: Plastik mafsalsın kolon merkezinden uzaklığı.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri M_{uv} denklem C.4 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_{uc} \times s_{h,RBS} \quad (C.4)$$

V_{uc} : Plastik mafsals konumundaki gerekli kesme kuvveti dayanımı, kN.

$s_{h,RBS}$: Plastik mafsals ile kolon merkezi arasındaki mesafe, mm.

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri göz önüne alınarak kiriş boyuna eksen hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı (ΣM_{pc}^*) bu tezdeki 4.2 numaralı “Birleşim Tasarımındaki Genel koşullar” bölümünde hesaplanmıştır.

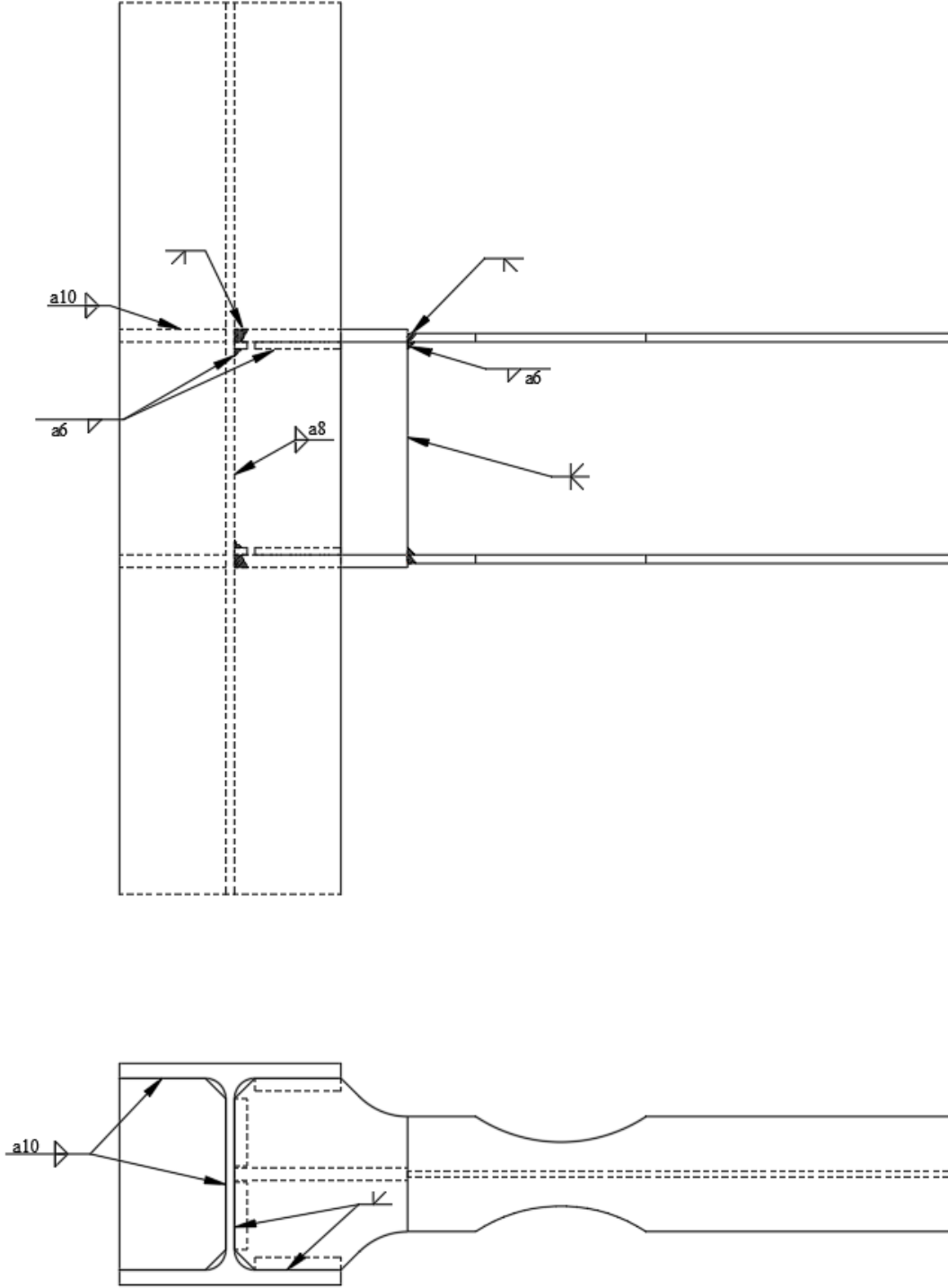
$$M_{uv} = 71,44 \times 388 \times 10^{-3} = 27,72 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 139,43 + 27,72 = 167,1 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = \frac{469,9}{167,1} = 2,81 > 1.0$$

Kaynaklı azaltılmış I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil C.4'te gösterilmiştir.



Şekil C.4: Birleşimdeki kaynak detayları.

EK D

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı TBDY 2018 Ek 9B.1.4'e göre (C_{pr}) 1,20 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

IPE270 profilinin kuvvetli eksen etrafındaki plastik mukavemet momenti $W_{pb} = 484 \times 10^3 \text{ mm}^3$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} = 1,20 \times 1,30 \times 275 \times 484 \times 10^3 \times 10^{-6} = 207,6 \text{ kNm}$$

Birleşimde, kiriş başlığının çekme kuvveti etkisinde kırılma sınır durumuna ulaşmasını önleyecek bulon deliği çapı hesaplanmıştır.

$$d_h \leq \frac{W_{pb}}{2t_f(d - t_f)} \left(1 - \frac{R_y F_y}{R_t F_u} \right) - 2 \text{ mm}$$

$$d_h \leq \frac{484 \times 10^3}{2 \times 10,2 \times (270 - 10,2)} \left(1 - \frac{1,30 \times 275}{1,10 \times 430} \right) - 2$$

$$d_h \leq 20,3 \text{ mm}$$

En büyük bulon çapı deliği 20,3 mm şeklinde elde edildiğinden, bulon çapı $d_b = 16 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Standart bulon deliği çapı (d_h) bulon çapından 2 mm daha büyük olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Kiriş başlığı ile T-parça gövdesinin birleşiminde kayma etkisinde dayanımın belirlenmesi için, çelik malzeme sınıfı ve birleşim için uygulama sınırları göz önünde tutularak, kiriş başlığında yer alan T-parça gövdesinin kalınlığı ve genişliği, bulonlar arasındaki uzaklık ve bulonların levha kenarlarına olan uzaklıkları kiriş başlık genişliği göz önünde bulundurularak öngörülmüştür.

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacağı varsayımı ile hesaplara devam edilmiştir. HE 400 B profilinin çelik sınıfı S355 olarak belirlenmiştir.

Kiriş enine doğrultuda iki bulon arasındaki uzaklık 75 mm olarak belirlenmiştir. Bulon merkezi ile giriş başlığı kenarı arasındaki uzaklık bulon çapının 1.5 katından fazla olacak şekilde 30 mm olarak belirlenmiştir.

Belirlenen boyutlar göz önünde bulundurularak, birleşimin kayma etkisindeki dayanımı ϕr_{nv} , bulonun kesme kuvveti dayanımı ve bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bulon sınıfı 10.9 olarak kabul edilmiştir.

$$\phi r_{nv} = \min \left[\begin{array}{l} \phi_n 1,0 F_{nv} A_b \\ \phi_d 2,4 F_{ub} d_{vb} t_{tfb} \\ \phi_d 2,4 F_{ut} d_{vb} t_{st} \end{array} \right]$$

$$t_{tfb} = 10,2 \text{ mm}$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$\phi r_{nv} = \min \left[\begin{array}{l} 0,90 \times (0,563 \times 1000) \times 201 \times 10^{-3} \\ 1,00 \times 2,4 \times 430 \times 16 \times 10,2 \times 10^{-3} \\ 1,00 \times 2,4 \times 510 \times 16 \times 13,5 \times 10^{-3} \end{array} \right] = 101,8 \text{ kN}$$

Birleşimin kayma etkisindeki dayanımının hesaplanması ile gerekli bulon sayısı öngörülmüştür.

$$n_{vb} \geq \frac{1,25 M_{pr}}{d_b \phi r_{nv}} = \frac{1,25 \times 207,6 \times 10^6}{270 \times 101,8 \times 10^3} = 9,4$$

Plastik mafsalsın kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı (l_h), birleşimde 10 adet bulonun 5 sıra halinde yerleştirileceği dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil D.1).

$$l_h = s_1 + L_{vb} = s_1 + s_{vb} \left(\frac{n_{vb}}{2} - 1 \right) = 75 + 50 \times \left(\frac{10}{2} - 1 \right) = 275 \text{ mm}$$

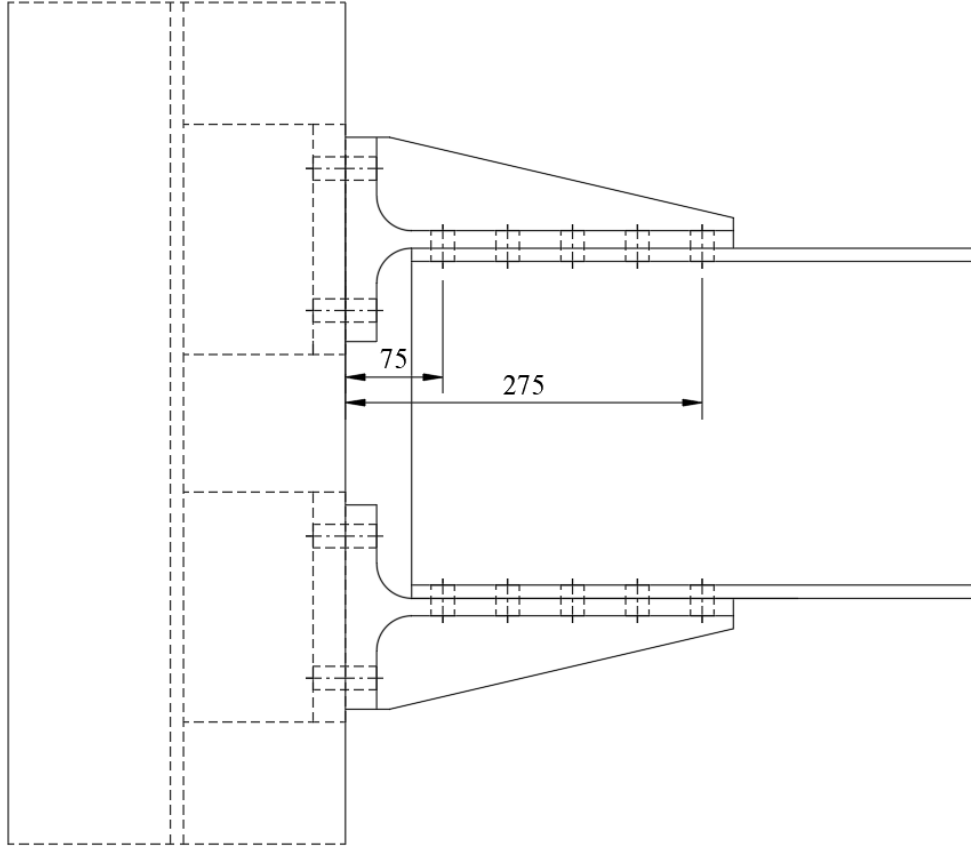
Plastik mafsalsın yeri dikkate alınarak plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \frac{b_c}{2} = 6,260 - 2 \times 0,275 - 2 \times \frac{0,260}{2} = 5,45 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 207,6 + 0 + \frac{7,50 \times 5,45^2}{2}}{5,45} = 96,62 \text{ kN}$$



Şekil D.1: Plastik mafsallın yeri.

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinde gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_h l_h = 207.6 + 96.62 \times 275 \times 10^{-3} = 234.17 \text{ kNm}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyindeki gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_{uc} = M_f$), kiriş enkesit yüksekliği (d_b) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{pr} = \frac{M_{uc}}{1,05 d_b} = \frac{234,17 \times 10^3}{1,05 \times 270} = 826 \text{ kN}$$

Bu adımda birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlıkları (t_s) belirlenmiştir.

$$t_{bw} = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa}$$

$$F_{ys} = 355 \text{ MPa}$$

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) = 6,6 \times \left(\frac{275}{355} \right) = 5,1 \text{ mm}$$

$$t_s = 10 \text{ mm}$$

Rijitlik levhasında yerel burkulmanın önlenmesi için gerekli şart sağlanmıştır.

$$h_{st} = 72 \text{ mm}$$

$$t_s = 10 \text{ mm}$$

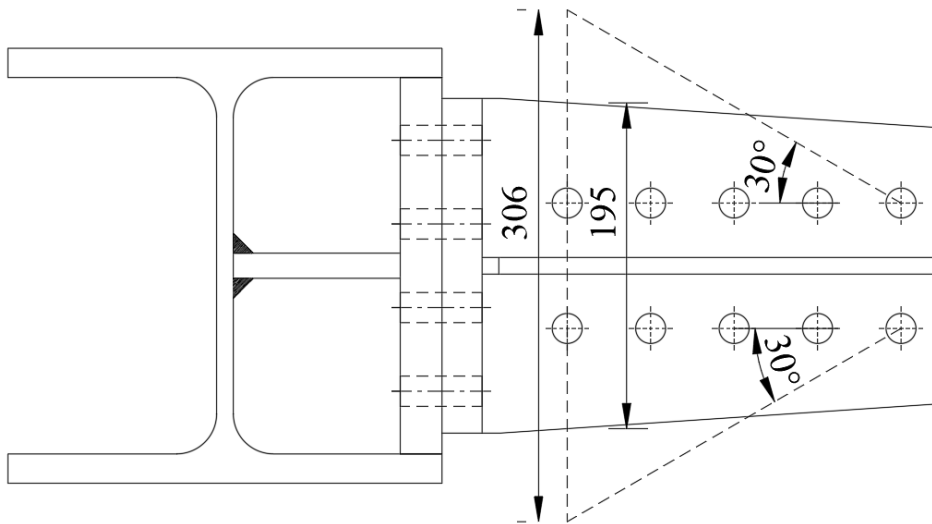
$$F_{ys} = 355 \text{ MPa}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\frac{h_{st}}{t_s} = \frac{72}{10} = 7,2 \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}} \right)} = 0,56 \times \sqrt{\left(\frac{200000}{355} \right)} = 13,29 \text{ mm}$$

Rijitlik levhalarının kontrollerinin yapılmasının ardından, kiriş başlığındaki T-parçanın gövde boyutları, çekme kuvveti etkisinde kayıpsız enkesit alanında akma ve net enkesit alanında kırılma; basınç kuvveti etkisinde ise kayıpsız enkesit alanında akma veya burkulma sınır durumlarına göre kontrol edilmiştir.

Çekme kuvveti etkisindeki kontroller için Whitmore genişliği (W_{whit}) hesaplanmıştır (Şekil D.2).



Şekil D.2: Whitmore genişliği ve ilk bulon hizasındaki genişlik.

$$W_{whit} = 2L_{vb} \tan 30^\circ + g_{vb}$$

$$L_{vb} = 200 \text{ mm}$$

$$g_{vb} = 75 \text{ mm}$$

$$W_{whit} = 2L_{vb}\tan 30^\circ + g_{vb} = 2 \times 200 \times \tan 30^\circ + 75 = 306 \text{ mm}$$

İlk bulonların hizasında T-parça gövde genişliği (W_T) 196 mm olarak ölçülmüştür. W_T genişliği Whitmore genişliğinden daha küçük olduğundan T-parçanın gövdesinin kalınlığının belirlenmesinde bu genişlik dikkate alınmıştır.

$$W_T = 196 \text{ mm} < W_{whit} = 306 \text{ mm}$$

Çekme kuvveti etkisinde akma sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı t_{st} hesaplanmıştır.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{\min(W_T, W_{whit}) \phi_d F_{yt}} = \frac{826 \times 10^3}{196 \times 1,00 \times 355} = 11,9 \text{ mm}$$

Çekme kuvveti etkisinde kırılma (kopma) sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı t_{st} hesaplanmıştır.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{\phi_n F_{ut} [\min(W_T, W_{whit}) - 2(d_{vht} + 2 \text{ mm})]}$$

$$t_{st} \geq \frac{826 \times 10^3}{0,90 \times 510 [196 - 2(18 + 2)]} = 11,5 \text{ mm}$$

Kiriş başlığına bağlanan T-parçası, HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacaktır. Söz konusu profilin gövde kalınlığı 13,5 mm 'dir. Bu kalınlık, çekme kuvveti etkisindeki sınır durumlara karşı yeterli dayanımın sağlanması için gerekli kalınlıklardan daha büyük olarak elde edildiğinden, HE 400 B profilinin gövde kalınlığı çekme kuvvetinin aktarılması açısından yeterli bulunmuştur.

Basınç kuvveti etkisi altındaki kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinde burkulma sınır durumu kontrol edilmiştir.

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm} \geq \frac{s_1 - t_{ft}}{9,60} = \frac{75 - 13,5}{9,60} = 6,40 \text{ mm}$$

Bu kontrolle, HE 400 B profilinin gövdesinin burkulma sınır durumuna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhası ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık levhasının birleşiminde kullanılacak bulonların minimum çapı (d_{tb}), T-parçanın başlığında 8 adet bulon kullanılacağı öngörülerek hesaplanmıştır.

$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4F_{pr}}{n_{tb}\phi_n\pi F_{nt}}} = \sqrt{\frac{4 \times 826 \times 10^3}{8 \times 0,90 \times \pi \times 750}} = 14 \text{ mm}$$

Bu sonuca göre çekme bulonlarının çapı $d_{tb} = 16 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Çekme bulonlarının çapının belirlenmesinin ardından, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği (b_{ft}) hesaplanmıştır (Şekil D.3).

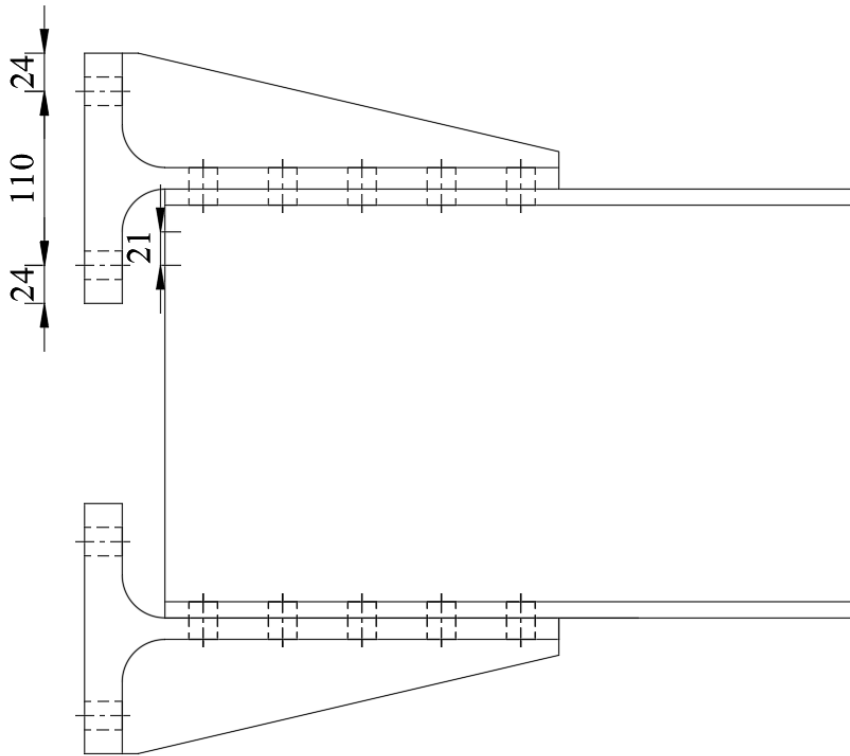
$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a$$

$$g_{tb} = 110 \text{ mm}$$

$$a = 1,5d_{tb} = 1,5 \times 16 = 24 \text{ mm} < 1,25b = 1,25 \times 21 = 26,25 \text{ mm}$$

$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a = 110 + 2 \times 24 = 158 \text{ mm}$$

$b_{ft} = 158 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil D.3: T-parçanın başlık genişliği.

T-parçanın başlığında bulunan bir bulonun çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$\phi_{r_{nt}} = \phi_n A_{tb} F_{nt} = 0,90 \times \frac{\pi d_{tb}^2}{4} \times 750 \times 10^{-3} = 135,7 \text{ kN}$$

Bir bulonun çekme dayanımının hesaplanmasının ardından, kiriş başlığında yer alan T-parça başlığının gerekli dayanımı (T_{req}) hesaplanmıştır.

$$T_{req} = \frac{F_{pr}}{n_{tb}} = \frac{826}{8} = 103,3 \text{ kN}$$

Karma göçme modu (Mixed-mode failure), hem T-parçanın başlığında akmanın meydana gelmesini hem de bulonlarda hasar oluşmasını kapsayan, her iki mekanizmanın birlikte etkili olduğu bir hasar türü olarak tanımlanmaktadır. Tasarımda genellikle belirleyici hasar modu olarak bu durumun gerçekleşeceği varsayımıyla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının minimum kalınlığı (t_{ft}) hesaplanmıştır.

$$a' = a + \frac{1}{2}d_{tb} = 24 + \frac{1}{2} \times 16 = 32 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{1}{2}d_{tb} = 21 - \frac{1}{2} \times 16 = 13 \text{ mm}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}} = \frac{2 \times 196}{8} = 49 \text{ mm}$$

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{T_{req}(a' + b') - \phi r_{nt} a'}{\phi_d F_{yt} p}}$$

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{103,3 \times 10^3 \times (32 + 13) - 135,7 \times 10^3 \times 32}{1,00 \times 355 \times 49}}$$

$$t_{ft} \geq 8,4 \text{ mm}$$

Kiriş başlığına bağlanan T-parçası, HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacaktır. Söz konusu profilin başlık kalınlığı 24 mm'dir. Bu kalınlık, karma göçme moduna karşı yeterli dayanımın sağlanması için gerekli kalınlıktan daha büyük elde edilmiştir.

HE 400 B profilinin başlık kalınlığının, kaldırma etkisini (prying action) ortadan kaldırmak için gereken kalınlık $t_{ft,crit}$ 'den daha büyük olduğu bu adımda gösterilmiştir.

$$t_{ft} = 24 \text{ mm} \geq t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4\phi r_{nt} b'}{\phi_d F_{yt} p}} = \sqrt{\frac{4 \times 135,7 \times 10^3 \times 13}{1,00 \times 355 \times 49}} = 20,14 \text{ mm}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın geometrisi belirlendikten sonra, birleşimin tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak sınıflandırılabilmesi için gerekli kontroller yapılmıştır.

$$I_{ft} = \frac{pt_{ft}^3}{12} = \frac{49 \times 24^3}{12} = 56448 \text{ mm}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{200000}{2 \times (1+0,3)} = 76923 \text{ MPa}$$

$$\beta_a = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}a'^2} = 1 + \frac{12 \times 200000 \times 56448}{76923 \times 49 \times 26 \times 32^2} = 2,35$$

$$\beta_b = 1 + \frac{12EI_{ft}}{Gpt_{ft}b'^2} = 1 + \frac{12 \times 200000 \times 56448}{76923 \times 49 \times 26 \times 13^2} = 9,18$$

$$K_{flange} = \frac{12n_{tb}EI_{ft}(a'\beta_a + 3b'\beta_b)}{b'^3\beta_b(4a'\beta_a + 3b'\beta_b)}$$

$$K_{flange} = \frac{12 \times 8 \times 200000 \times 56448 \times (32 \times 2,35 + 3 \times 13 \times 9,18) \times 10^{-3}}{13^3 \times 9,17 \times (4 \times 32 \times 2,35 + 3 \times 13 \times 9,18)}$$

$$K_{flange} = 35374 \text{ kN/mm}$$

$$K_{stem} = \frac{t_{st}E(W_T - b_{fb})^2}{L_{stem} \left[(W_T - b_{fb}) + b_{fb} \ln \left(\frac{b_{fb}}{W_T} \right) \right]}$$

$$K_{stem} = \frac{13,5 \times 200000 \times (196 - 135)^2}{248 \times \left[(196 - 135) + 135 \times \ln \left(\frac{135}{196} \right) \right]}$$

$$K_{stem} = 3798 \text{ kN/mm}$$

$$K_{slip} = \frac{P_{slip}}{\Delta_{slip}}$$

$$\Delta_{slip} = 0,19 \text{ mm}$$

$$P_{slip} = n_{vb} \alpha (0,70 F_{nt} A_{vb}) \mu$$

$$\alpha = 0,88$$

$$\mu = 0,30$$

$$P_{slip} = 10 \times 0,88 \times (0,70 \times 750 \times 201,1) \times 0,30 = 278,7 \text{ kN}$$

$$K_{slip} = \frac{278,7}{0,19} = 1467 \text{ kN/mm}$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{K_{flange}} + \frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{35374} + \frac{1}{3798} + \frac{1}{1467} \right)^{-1} = 1027,5 \text{ kN/mm}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{3798} + \frac{1}{1467} \right)^{-1} = 1058,2 \text{ kN/mm}$$

$$K_i = \frac{d_b^2 K_{ten} K_{comp}}{K_{ten} + K_{comp}} = \frac{270^2 \times 1027,5 \times 1058,2 \times 10^{-3}}{1027,5 + 1058,2} = 38004 \text{ kNm}$$

$$\frac{18 \times E \times I_{kiriş}}{L_o} = \frac{18 \times 200000 \times 5.79 \times 10^7 \times 10^{-9}}{6.26} = 33297 \text{ kNm}$$

$K_i \geq 18EI_{kiriş}/L$ koşulu sağlandığından birleşim tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak nitelendirilir.

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_f = M_{uc}$) ve kiriş başlığında yer alan T-parçanın belirlenen gövde kalınlığı kullanılarak kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki eden gerçek başlık kuvveti (F_f) hesaplanmıştır.

$$F_f = \frac{M_{uc}}{d_b + t_{st}} = \frac{234,17 \times 10^3}{270 + 13,5} = 826 \text{ kN}$$

T-parçanın gövdesi ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak bulonların dayanımı, gerçek başlık kuvveti (F_f) dikkate alınarak kontrol edilmiştir.

$$\phi r_{nv} n_{vb} = 101,8 \times 10 = 1018 \text{ kN} \geq 826 \text{ kN}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı hesaplanmış ve gerçek başlık kuvvetine (F_f) karşı kontrol edilmiştir.

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st}$$

$$\phi R_n = 1,00 \times 355 \times \min(196, 306) \times 13,5 \times 10^{-3} = 939,3 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 939,3 \text{ kN} \geq F_f = 826 \text{ kN}$$

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki net enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı hesaplanmış ve gerçek başlık kuvvetine (F_f) karşı kontrol edilmiştir.

$$\phi R_n = \phi_n F_{ut} [\min(W_T, W_{Whit}) - 2(d_{vht} + 2)] t_{st}$$

$$\phi R_n = 0,90 \times 510 \times [\min(196, 306) - 2(18 + 2)] \times 13,5 \times 10^{-3}$$

$$\phi R_n = 966,7 \text{ kN} \geq F_f = 826 \text{ kN}$$

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın gövdesindeki net enkesit alanında kopma dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma sınır durumuna karşı dayanımı kontrol edilmiştir.

$$\frac{KL}{r} = 2,60 \left(\frac{S_1 - t_{ft}}{t_{st}} \right) = 2,60 \times \left(\frac{75 - 24}{13,5} \right) = 9,82$$

$$\frac{KL}{r} = 9,82 \leq 25$$

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st}$$

$$\phi R_n = 1,00 \times 355 \times \min(196, 306) \times 13,5 \times 10^{-3} = 939,3 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 939,3 \text{ kN} \geq F_f = 826 \text{ kN}$$

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

T-parçanın başlık dayanımı, plastik başlık mekanizması, karma göçme modu ve kaldırma etkisi olmadan çekme etkisindeki bulonun kırılması sınır durumlarına karşı dayanımların en küçüğü olacak şekilde belirlenir.

İlk olarak, T-parçanın başlığında plastik mekanizma sınır durumu için dayanım (ϕT_1) hesaplanmıştır.

$$\phi T_1 = \frac{(1 + \delta)}{4b'} p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p} = 1 - \frac{18}{49} = 0,633$$

$$\phi T_1 = \frac{(1 + 0,633)}{4 \times 13} \times 49 \times 1,00 \times 355 \times 24^2 \times 10^{-3} = 314,6 \text{ kN}$$

T-parçanın başlığında, önce akma ardından bulonların kırılmasıyla meydana gelen karma göçme modu (mixed-mode failure) sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı (ϕT_2) hesaplanır.

$$\phi T_2 = \frac{\phi r_{nt} a'}{a' + b'} + \frac{p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2}{4(a' + b')}$$

$$\phi T_2 = \frac{135,7 \times 32}{32 + 13} + \frac{49 \times 1,00 \times 355 \times 24^2 \times 10^{-3}}{4 \times (32 + 13)} = 152,2 \text{ kN}$$

Son olarak, çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı (ϕT_3) hesaplanır.

$$\phi T_3 = \phi r_{nt} = 135,7 \text{ kN}$$

Kritik sınır durumu çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması olarak belirlenmiştir.

$$\phi T = \min(\phi T_1, \phi T_2, \phi T_3) = \min(314,6, 152,2, 135,7) = 135,7 \text{ kN}$$

Tasarımda kritik olan sınır durum belirlendikten sonra T-parçanın başlık dayanımı ϕR_n hesaplanır.

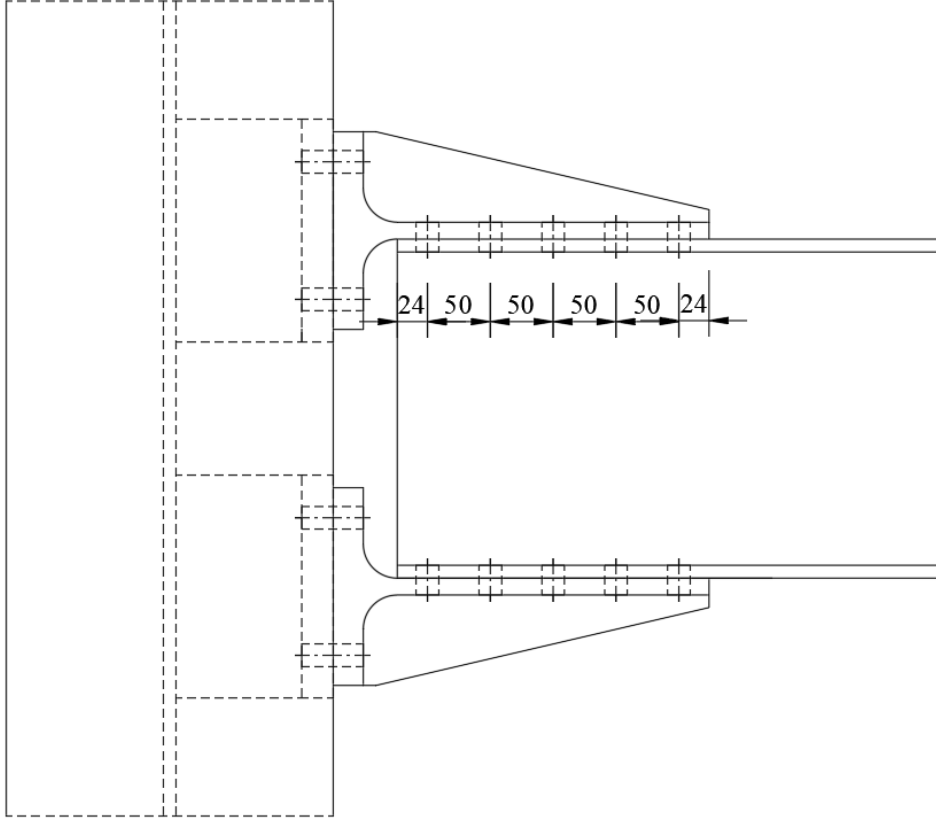
$$\phi R_n = n_{tb} \phi T = 8 \times 135,7 \text{ kN} = 1085,6 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 1085,6 \text{ kN} \geq F_f = 826 \text{ kN}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

Bu adımda, kiriş başlığı ve T-parçanın gövdesinde yer alan bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımları hesaplanmıştır.

İlk olarak, kuvvet doğrultusunda, bulon deliklerinin kenarından levha kenarına uzaklık (l_{ce}); bir delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki uzaklık (l_{ci}) belirlenmiştir. Bu uzaklıkların belirlenmesi için bulon deliği merkezinden levhanın kenarına olan uzaklık (L_e) ve iki bulon deliğinin merkezi arasındaki uzaklık (L_i) kullanılmıştır (Şekil D.4).



Şekil D.4: T-parçanın gövdesindeki bulonların yerleşimi.

Birleşimde kuvvet doğrultusunda 2 adet kenar bulon deliği (n_e) ve 8 adet iç bulon deliği (n_i) bulunmaktadır.

Kenar bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_e = 2$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_e = 24 \text{ mm}$$

$$l_{ce} = L_e - \frac{d_h}{2} = 24 - \frac{18}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{wb} = 10,2 \text{ mm}$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \min(t_{wb}, t_{st}) = \min(10,2, 13,5) = 10,2 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,e1} = n_e 1,2 l_{ce} t_{min} F_u = 2 \times 1,2 \times 15 \times 10,2 \times 510 \times 10^{-3} = 187,3 \text{ kN}$$

$$r_{n,e2} = n_e 2,4 d_b t_{min} F_u = 2 \times 2,4 \times 16 \times 10,2 \times 510 \times 10^{-3} = 399,5 \text{ kN}$$

$$r_{n,e1} = 187,3 \text{ kN} \leq r_{n,e2} = 399,5 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

İç bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_i = 8$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_i = 50 \text{ mm}$$

$$l_{ci} = L_i - d_h = 50 - 18 = 32 \text{ mm}$$

$$t_{wb} = 10,2 \text{ mm}$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \min(t_{wb}, t_{st}) = \min(10,2, 13,5) = 10,2 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n,i1} = n_i 1,2 l_{ci} t_{min} F_u = 8 \times 1,2 \times 32 \times 10,2 \times 510 \times 10^{-3} = 1598 \text{ kN}$$

$$r_{n,i2} = n_i 2,4 d_b t_{min} F_u = 8 \times 2,4 \times 16 \times 10,2 \times 510 \times 10^{-3} = 1598 \text{ kN}$$

$$r_{n,i1} = 1598 \text{ kN} \leq r_{n,i2} = 1598 \text{ kN} \text{ olarak edilmiştir.}$$

Birleşimin tasarım ezilme kuvveti dayanımı $\phi_n R_n$, kenar ve iç bulon deliklerinin dayanımlarının toplamı şeklinde hesaplanır.

$$\phi_n = 0,90$$

$$\phi_n R_n = \phi_n r_{n,e1} + \phi_n r_{n,i1} = 0,90 \times 187,3 + 0,90 \times 1598 = 1606,7 \text{ kN}$$

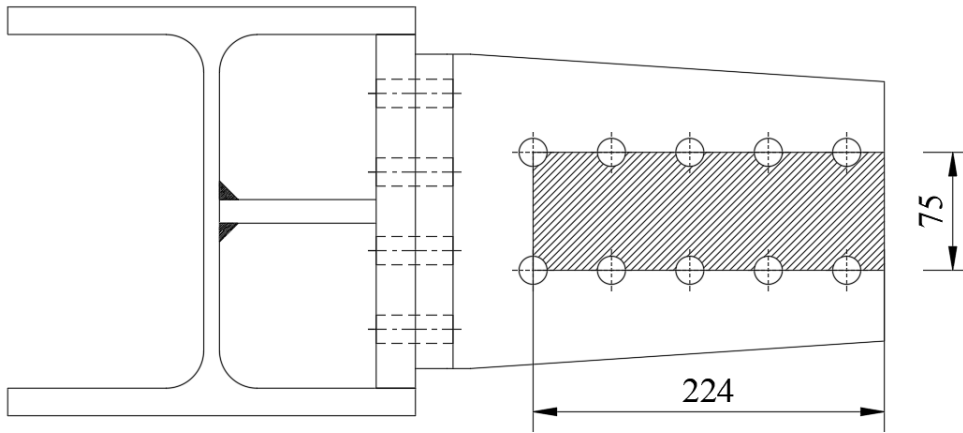
$$F_f = 826 \text{ kN} \leq \phi_n R_n = 1606,7 \text{ kN}$$

Bulon delikleri yeterli ezilme kuvveti dayanımına sahiptir.

Kiriş başlığına bağlanan T-parçanın gövdesinde ve kiriş başlığında blok kırılma dayanımı AISC 360-22 Bölüm J ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.4.2’te tanımlanan şekilde hesaplanmıştır.

Kiriş başlığına bağlanan T-parçanın gövdesinde 2 adet kırılma modu, kiriş başlığında ise 1 adet kırılma modu incelenecektir.

Kiriş başlığına bağlanan T-parçanın gövdesinde blok kırılma kontrolleri yapılmıştır. İlk blok kırılma modu Şekil D.5'te gösterilmiştir.



Şekil D.5: T-parçada birinci blok kırılma modu.

Bu blok kırılma modunda kayma gerilmesi etkisinde iki düzlem (n_{vp}); çekme gerilmesi etkisinde ise bir düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4,5$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesiti alanından (A_{nv}), $n_{tde} = 1$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 224 \text{ mm}$ olarak; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği ise $b_t = 75 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Çekme gerilmesi etkisinde üniform gerilme dağılımı olduğu göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 1,00$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 2$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_s = 224 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{sp} t_{st} b_s = 2 \times 13,5 \times 224 = 6048 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 16 + 2 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp}n_{vde}t_{st}d_e = 7398 - 2 \times 4,5 \times 13,5 \times 20 = 4968 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 1$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_t = 75 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp}t_p b_t = 1 \times 13,5 \times 75 = 1012,5 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 16 + 2 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp}n_{tde}t_{st}d_e = 1012,5 - 1 \times 1 \times 13,5 \times 20 = 742,5 \text{ mm}^2$$

S355 yapı çeliğın karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 355 \text{ MPa}$ ve karakteristik çekme dayanımı $F_{up} = 510 \text{ MPa}$ göz önünde bulundurulmuş ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60F_{yp}A_{gv}}{0,60F_{up}A_{nv}} \right) + U_{bs}F_{up}A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 \times 355 \times 6048 \times 10^{-3}}{0,60 \times 510 \times 4968 \times 10^{-3}} \right) + 1,00 \times 510 \times 742,5 \times 10^{-3}$$

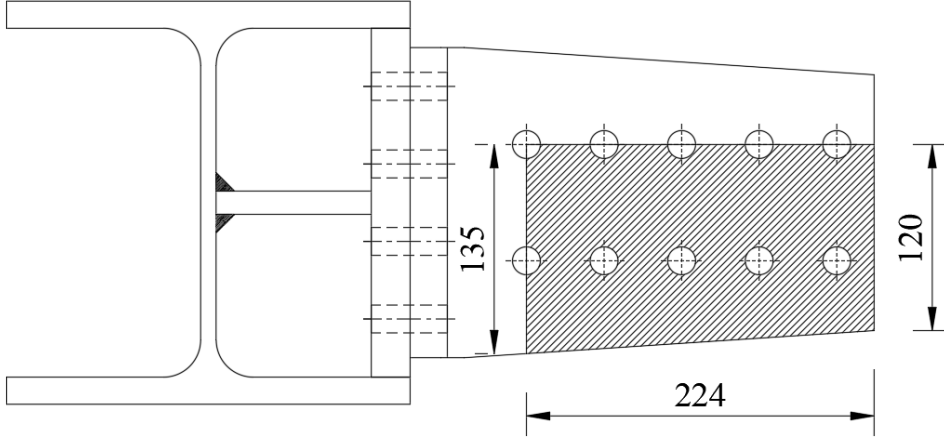
$$R_{nbs} = 1667 \text{ kN}$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$F_f = 826 \text{ kN} < \phi_d R_{nbs} = 1,00 \times 1667 \text{ kN} = 1667 \text{ N}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

T-parçanın gövdesinde ikinci blok kırılma modu Şekil D.6'da gösterilmiştir.



Şekil D.6: T-parçada ikinci blok kırılma modu.

Bu kırılma modunda kesme kuvvetinin karşılanacağı bir adet düzlem (n_{vp}); çekme kuvvetinin karşılanacağı da bir adet düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4.5$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesiti alanından (A_{nv}), $n_{tde} = 1.5$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 224 \text{ mm}$ olarak; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği ise güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla $b_t = 119,6 \text{ mm}$ olarak göz önünde bulundurulmuştur. Çekme gerilmesi etkisinde üniform gerilme dağılımı olduğu göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 0,50$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 1$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_s = 224 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{vp} t_p b_s = 1 \times 13,5 \times 224 = 3024 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 16 + 2 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp}n_{vde}t_{st}d_e = 3024 - 1 \times 4,5 \times 13,5 \times 20 = 1809 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 1$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_t = 119,6 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp}t_{st}b_t = 1,0 \times 13,5 \times 119,6 = 1614,6 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 16 + 2 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1.5$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp}n_{tde}t_{st}d_e = 1614,6 - 1 \times 1,5 \times 13,5 \times 20 = 1,210 \text{ mm}^2$$

S355 yapı çeliğinin karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 355 \text{ MPa}$ ve çekme dayanımı $F_{up} = 510 \text{ MPa}$ göz önünde bulundurulmuş ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60F_{yp}A_{gv}}{0,60F_{up}A_{nv}} \right) + U_{bs}F_{up}A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 \times 355 \times 3024 \times 10^{-3}}{0,60 \times 510 \times 1809 \times 10^{-3}} \right) + 0,50 \times 510 \times 1210 \times 10^{-3}$$

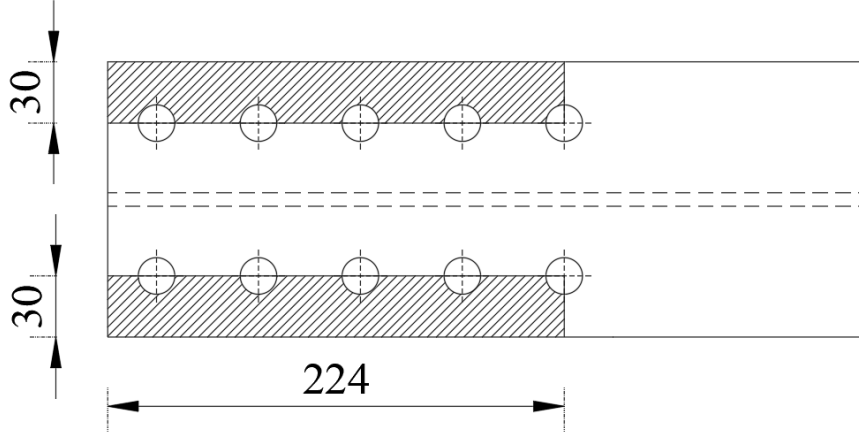
$$R_{nbs} = 862 \text{ kN}$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$F_f = 826 \text{ kN} < \phi_d R_{nbs} = 1,00 \times 862 \text{ kN} = 862 \text{ kN}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

Kiriş başlığında incelenen blok kırılma modu Şekil D.7'de gösterilmiştir.



Şekil D.7: Kiriş başlığında blok kırılma modu.

Bu blok kırılma modunda kayma gerilmesi etkisinde iki düzlem (n_{vp}); çekme gerilmesi etkisinde de iki düzlem (n_{tp}) mevcuttur.

Kayma gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nv}), kayıpsız enkesit alanından (A_{gv}), $n_{vde} = 4.5$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Çekme gerilmesi etkisindeki net enkesit alanı (A_{nt}), kayıpsız enkesiti alanından (A_{nv}), $n_{tde} = 1$ adet etkili delik çapı ile eleman kalınlığının çarpımının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Kayma gerilmesi etkisindeki düzlemin uzunluğu $b_s = 224 \text{ mm}$; çekme gerilmesi etkisi altındaki düzlemin genişliği $b_t = 30 \times 2 = 60 \text{ mm}$ ölçülmüştür. Çekme gerilmesi etkisinde üniform gerilme dağılımı olduğu göz önünde bulundurulmuş ve çekme gerilmeleri yayılışını göz önüne alan katsayı $U_{bs} = 1,00$ olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde dikkate alınacak kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 2$$

$$t_{bf} = 10,2 \text{ mm}$$

$$b_s = 224 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{vp} t_{bf} b_s = 2 \times 10,2 \times 224 = 4570 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 16 + 2 + 2 = 20 \text{ mm}$$

$$n_{vde} = 4,5$$

$$A_{nv} = A_{gv} - n_{vp} n_{vde} t_{bf} d_e = 4570 - 2 \times 4,5 \times 10,2 \times 20 = 3652 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 0,50 \times 2 = 1,00$$

$$t_{bf} = 10,2 \text{ mm}$$

$$b_t = 60 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp} t_{bf} b_t = 1,00 \times 10,2 \times 60 = 612 \text{ mm}^2$$

$$d_e = 20 \text{ mm}$$

$$n_{tde} = 1$$

$$A_{nt} = A_{gt} - n_{tp} n_{tde} t_{bf} d_e = 612 - 1 \times 1 \times 10,2 \times 20 = 408 \text{ mm}^2$$

S275 yapı çeliğinin karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 275 \text{ MPa}$ ve çekme dayanımı $F_{up} = 430 \text{ MPa}$ göz önünde bulundurulmuş ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(0,60 F_{yp} A_{gv}, 0,60 F_{up} A_{nv} \right) + U_{bs} F_{up} A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(0,60 \times 275 \times 4570 \times 10^{-3}, 0,60 \times 430 \times 3652 \times 10^{-3} \right) + 1,00 \times 430 \times 408 \times 10^{-3}$$

$$R_{nbs} = 929,5 \text{ kN}$$

$$\phi_d = 1.00$$

$$F_f = 826 \text{ kN} < \phi_d R_{nbs} = 1.00 \times 929,5 \text{ kN} = 929,5 \text{ kN}$$

Kiriş başlığının belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (D.1).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (D.1)$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1,00$ olarak alınmıştır.

$$A_w = dt_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,62 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimde kesme kuvvetinin eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı 8 adet 10.9 kalitedeki M16 bulon tarafından karşılanacağı öngörülmüş ve bulonların kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$A_b = 201,06 \text{ mm}^2$$

$$n_b = 8$$

$$F_{nv} = 450 \text{ MPa}$$

$$\phi_n = 0,90$$

$$V_u \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b = 0,90 \times 8 \times 450 \times 201,06 \times 10^{-3} = 651,4 \text{ kN}$$

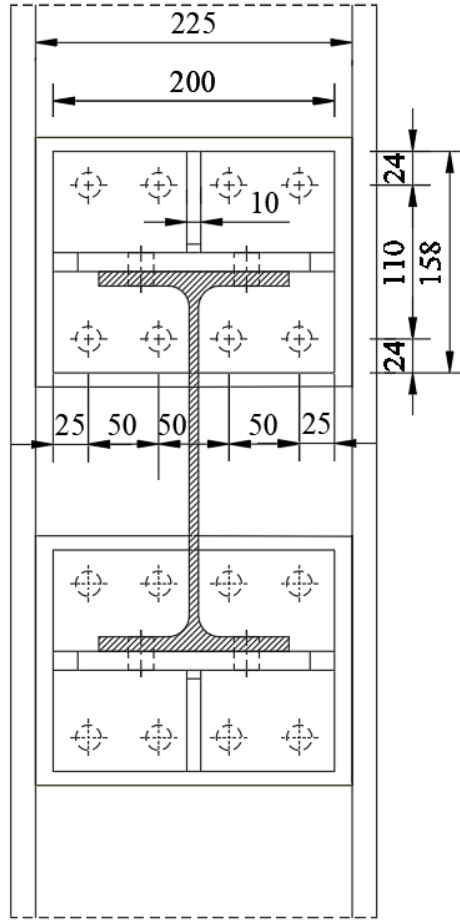
$$V_{uc} = V_h = 96,62 \text{ kN} \leq 651,4 \text{ kN}$$

Basınç kuvveti etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulonların kesme kuvvetine karşı yeterli dayanıma sahip oldukları görülmektedir.

Bulonların kesme kuvveti dayanımının hesaplanmasının ardından, T-parçanın başlığındaki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

İlk olarak, kuvvet doğrultusunda, bulon deliklerinin kenarından levha kenarına uzaklık (l_{ce}); bir delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki uzaklık (l_{ci}) belirlenmiştir. Bu uzaklıkların belirlenmesi için bulon deliği merkezinden levhanın

kenarına olan uzaklık (L_e) ve iki bulon deliğinin merkezi arasındaki uzaklık (L_i) kullanılmıştır (Şekil D.8).



Şekil D.8: T-parçanın başlıklarında bulon yerleşimi.

Basınç başlığında yer alan birinci sıradaki bulon delikleri “kenar bulon delikleri”; ikinci sıradaki bulon delikleri ise “iç bulon delikleri” olarak sınıflandırılmıştır. Birleşimde kuvvet doğrultusunda 4 adet kenar bulon deliği (n_e) ve 4 adet iç bulon deliği (n_i) bulunmaktadır.

Kenar bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_e = 4$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_e = 24 \text{ mm}$$

$$l_{ce} = L_e - \frac{d_h}{2} = 24 - \frac{18}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n1,e1} = n_e 1,2 l_{ce} t_{ft} F_u = 4 \times 1,2 \times 15 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 881,3 \text{ kN}$$

$$r_{n1,e2} = n_e 2,4 d_b t_{ft} F_u = 4 \times 2,4 \times 16 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 1880 \text{ kN}$$

İç bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_i = 4$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_i = 110 \text{ mm}$$

$$l_{ci} = L_i - d_h = 110 - 18 = 92 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm}$$

$$r_{n2,i1} = n_i 1,2 l_{ci} t_{ft} F_u = 4 \times 1,2 \times 92 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 5405 \text{ kN}$$

$$r_{n2,i2} = n_i 2,4 d_b t_{ft} F_u = 4 \times 2,4 \times 20 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 2350 \text{ kN}$$

Birleşimin tasarım ezilme kuvveti dayanımı $\phi_n R_n$, kenar ve iç bulon deliklerinin dayanımlarının toplamı şeklinde hesaplanır.

$$\phi_n = 0,90$$

$$\phi_n R_n = \phi_n r_{n1,e1} + r_{n2,i2} = 0,90 \times 881,3 + 0,90 \times 2,350 = 2,908 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,62 \text{ kN} \leq R_n = 2,908 \text{ kN}$$

Basınç kuvveti etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulon delikleri yeterli ezilme kuvveti dayanımına sahiptir.

Bir sonraki adımda, kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın gövde, t_{tcw} , ve başlık, t_{tcf} , kalınlıkları belirlenmiştir.

$$t_{bw} = 6.6 \text{ mm} \leq t_{tcw} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm} \leq t_{tcf} = 25 \text{ mm}$$

Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilmiştir. Plastik mafsallın kolon merkezinden uzaklığı denklem D.2 ile hesaplanır (Şekil D.9).

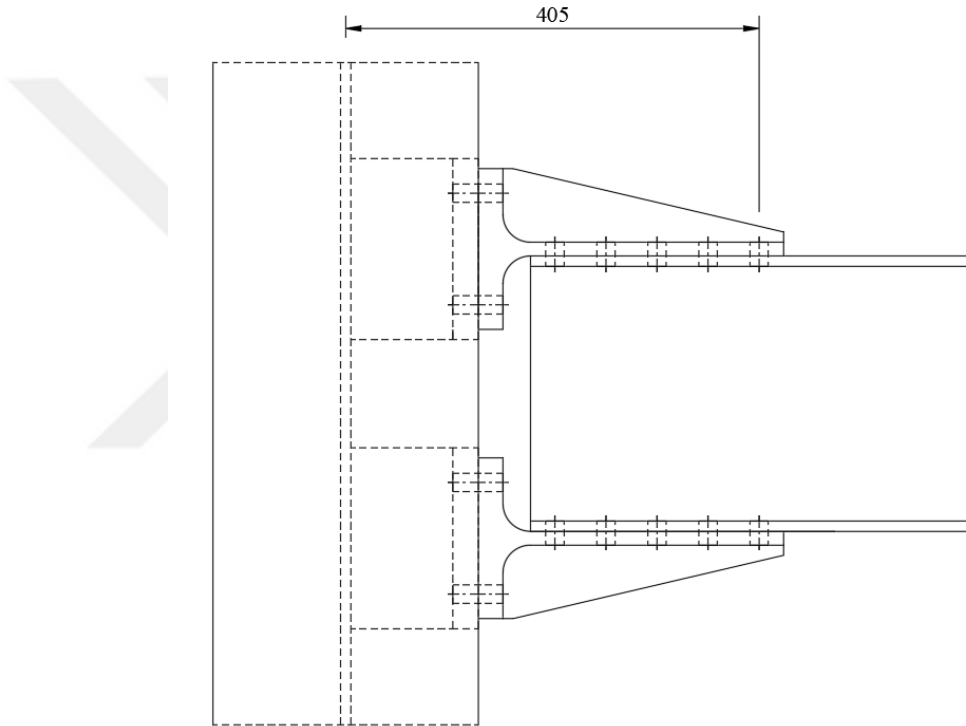
$$s_{h,bT} = \frac{d_c}{2} + l_h \quad (D.2)$$

Buradaki terimler aşağıda açıklanmıştır.

d_c : Kolon enkesit yüksekliği, mm.

l_h : Plastik mafsalsın kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı, mm.

$$s_{h,bT} = \frac{d_c}{2} + l_h = \frac{260}{2} + 275 = 405 \text{ mm}$$



Şekil D.9: Plastik mafsalsın kolon merkezinden uzaklığı.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri (M_{uv}) bulonlu alın levhalı birleşimde denklem D.3 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_p \times s_{h,bT} \quad (D.3)$$

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri gözönüne alınarak kiriş boyuna eksenel hizasında hesaplanan üst veya alt kat

kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı (ΣM_{pc}^*) bu tezdeki 4.2 numaralı “Birleşim Tasarımındaki Genel koşullar” bölümünde hesaplanmıştır.

$$V_{uc} = V_h = 96,62 \text{ kN}$$

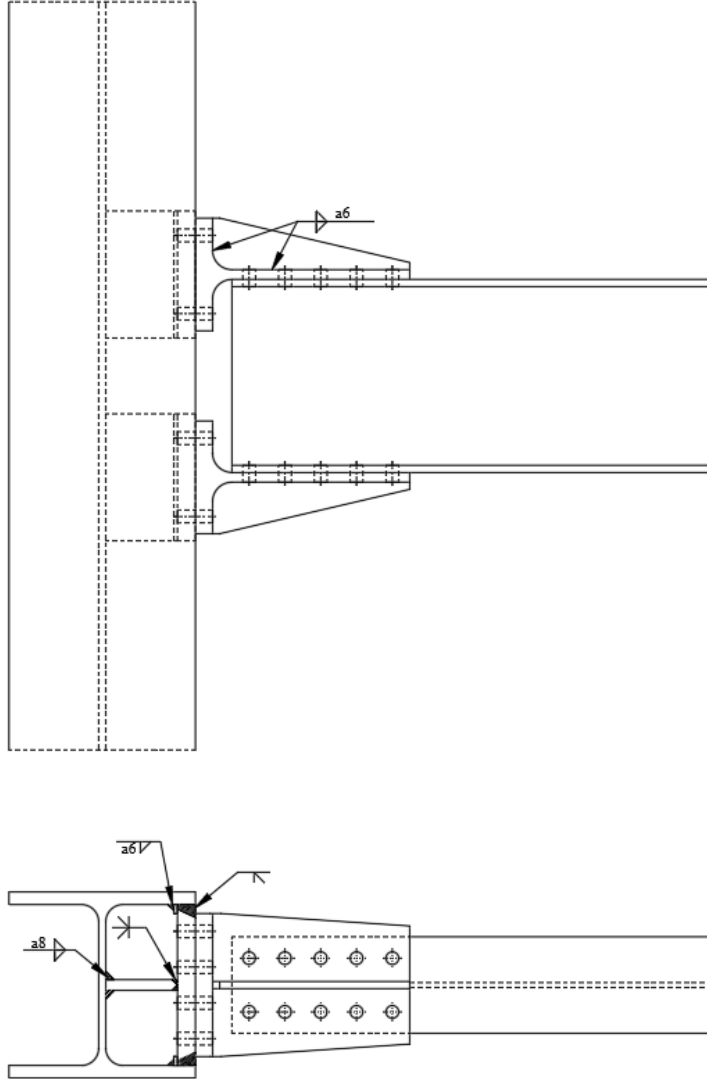
$$M_{uv} = 96,62 \times 405 \times 10^{-3} = 39,13 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 207,60 + 39,13 = 246,7 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = \frac{469,9}{246,7} = 1,91 > 1.0$$

T-parçalı bulonlu I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil D.10’da gösterilmiştir.



Şekil D.10: Birleşimdeki kaynak detayları.

EK E

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı TBDY 2018 Ek 9B.1.4'e göre (C_{pr}) 1,20 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

IPE270 profilinin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti $W_{pb} = 484 \times 10^3 \text{ mm}^3$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} = 1,20 \times 1,30 \times 275 \times 484 \times 10^3 \times 10^{-6} = 207,6 \text{ kNm}$$

Kiriş başlığı ile T-parçanın gövdesinin köşe kaynak uygulamasıyla oluşturulan birleşiminde kayma etkisinde dayanımın belirlenmesi için ilk olarak T-parçanın gövde kalınlığının tahmin edilmesi gerekir. Bu nedenle, kiriş başlığına birleşen T-parçanın HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacağı öngörülerek hesaplara devam edilmiştir. HE 400 B profilinin çelik malzeme sınıfı S355 olarak belirlenmiştir.

T-parçanın gövdesi ile kiriş arasındaki bağlantının birim kaynak uzunluğu için dayanımı hesaplanacaktır.

Çelik malzeme sınıfı, birleşim için uygulama sınırları ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 13.2'de tanımlanan köşe kaynak uygulama sınırları göz önünde tutularak, kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin kalınlığı öngörülmüştür. Köşe kaynak etkin kalınlığı ÇYTHYE 2018'de verilen minimum ve maksimum kalınlık değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. ÇYTHYE 2018 Tablo 13.4'te birleşen ince elemanın kalınlığına bağlı olarak minimum köşe kaynak kalınlıkları verilmektedir. Birleşimde ince olan eleman kiriş başlığıdır ve kalınlığı $t_{tfb} = 10,2 \text{ mm}$ 'dir. Bu kalınlıkta bir levha için minimum köşe kaynak etkin kalınlığı $a_{min} = 3,5 \text{ mm}$ olarak belirtilmektedir. Kaynaklanan elemanın kalınlığı $6,0 \text{ mm}$ veya daha kalın ise, öngörülen köşe kaynak etkin kalınlığının sağlanabilmesi amacıyla, maksimum köşe kaynak etkin kalınlığı $a_{max} = 0,7(t - 2 \text{ mm})$ olarak belirlenecektir. Hesaplarda $t = t_{tfb} = 10,2 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.

$$a_{max} = 0,7(t - 2 \text{ mm}) = 0,7 \times (10,2 - 2) = 5,74 \text{ mm} \text{ olarak belirlenir.}$$

Köşe kaynak etkin kalınlığı $a = 5,5 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

$$a_{min} = 3,5 \text{ mm} < a = 5,5 \text{ mm} < a_{max} = 5,74 \text{ mm}$$

Köşe kaynak etkin kalınlığının öngörülmesinin ardından esas metal ve kaynak metalinin karakteristik dayanımları birim köşe kaynak uzunluğu için hesaplanmıştır.

$$F_E = 550 \text{ MPa}$$

$$F_{ub} = 430 \text{ MPa}$$

$$F_{ut} = 510 \text{ MPa}$$

$$t_{tfb} = 10,2 \text{ mm}$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$\phi R_n = \min \begin{bmatrix} \phi_n 0,60 F_E a_w \\ \phi_n 0,60 F_{ub} t_{tfb} \\ \phi_n 0,60 F_{ut} t_{st} \end{bmatrix} = \min \begin{bmatrix} 0,90 \times 0,60 \times 550 \times (2 \times 5,5) \\ 0,90 \times 0,60 \times 430 \times (2 \times 10,2) \\ 0,90 \times 0,60 \times 510 \times 13,5 \end{bmatrix}$$

$$\phi R_n = 3,27 \text{ kN/mm}$$

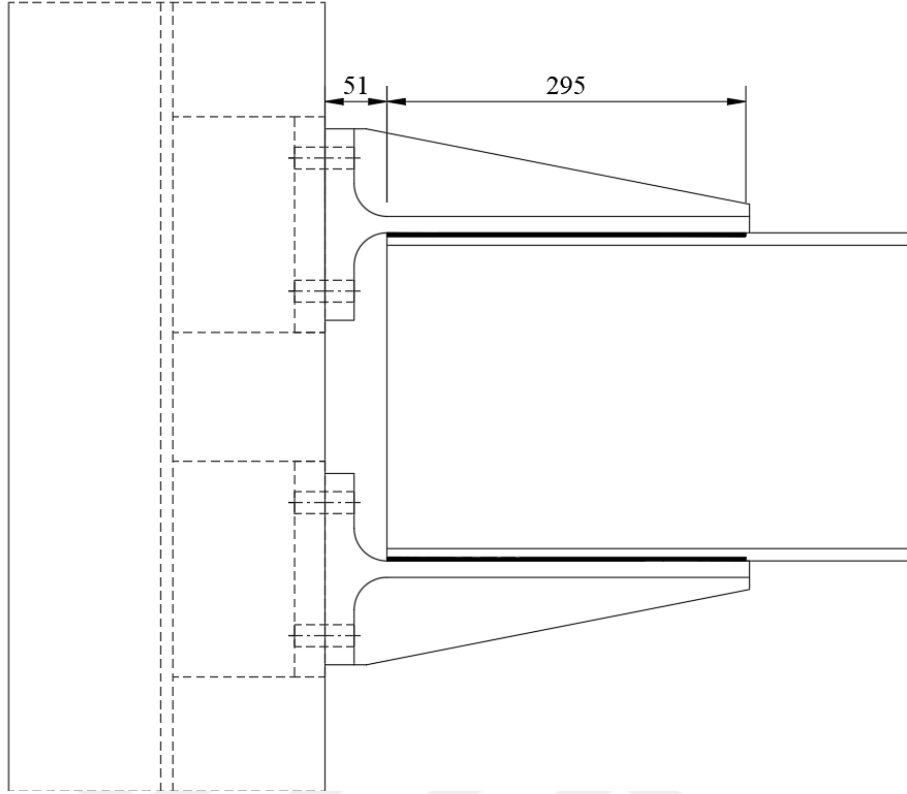
Birim köşe kaynak uzunluğunda kayma etkisinde dayanımın hesaplanmasının ardından kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesi ile kiriş başlığı arasındaki bağlantıda kullanılacak köşe kaynakların uzunluğu belirlenmiştir.

$$L_w \geq \frac{1,25 M_{pr}}{d_b \phi R_n} = \frac{1,25 \times 207,6 \times 10^6}{270 \times 3,27 \times 10^3} = 294 \text{ mm}$$

$L_w = 295 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Plastik mafsalsın kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı (l_h), köşe kaynak uzunluğu dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil E.1).

$$l_h = s_2 + L_w = 51 + 295 = 346 \text{ mm}$$



Şekil E.1: Plastik mafsallın yeri.

Plastik mafsallın yeri dikkate alınarak plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \frac{b_c}{2} = 6,260 - 2 \times 0,346 - 2 \times \frac{0,260}{2} = 5,44 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 207,6 + 0 + \frac{7,50 \times 5,44^2}{2}}{5,44} = 96,74 \text{ kN}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinde gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_h l_h = 207,6 + 96,74 \times 370 \times 10^{-3} = 243.39 \text{ kNm}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki etmesi beklenen kuvvet, kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyindeki gerekli eğilme

momenti dayanımı ($M_{uc} = M_f$) , kiriş enkesit yüksekliği (d_b) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{pr} = \frac{M_{uc}}{1,05d_b} = \frac{243,39 \times 10^3}{1,05 \times 270} = 858,5 \text{ kN}$$

Bu adımda birleşimde kullanılacak rijitlik levhalarının kalınlıkları (t_s) belirlenmiştir.

$$t_{bw} = 6,6 \text{ mm}$$

$$F_{yb} = 275 \text{ MPa}$$

$$F_{ys} = 355 \text{ MPa}$$

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) = 6,6 \times \left(\frac{275}{355} \right) = 5,1 \text{ mm}$$

$$t_s = 10 \text{ mm}$$

Rijitlik levhasında yerel burkulmanın önlenmesi için gerekli şart sağlanmıştır.

$$h_{st} = 72 \text{ mm}$$

$$t_s = 10 \text{ mm}$$

$$F_{ys} = 355 \text{ MPa}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$\frac{h_{st}}{t_s} = \frac{72}{10} = 7,2 \leq 0,56 \sqrt{\left(\frac{E}{F_{ys}} \right)} = 0,56 \times \sqrt{\left(\frac{200000}{355} \right)} = 13,29 \text{ mm}$$

Rijitlik levhasının kontrollerinin yapılmasının ardından, kiriş başlığındaki T-parçanın gövde boyutları, çekme kuvveti etkisinde kayıpsız enkesit alanında akma ve basınç kuvveti etkisinde kayıpsız enkesit alanında akma veya burkulma sınır durumlarına göre kontrol edilmiştir.

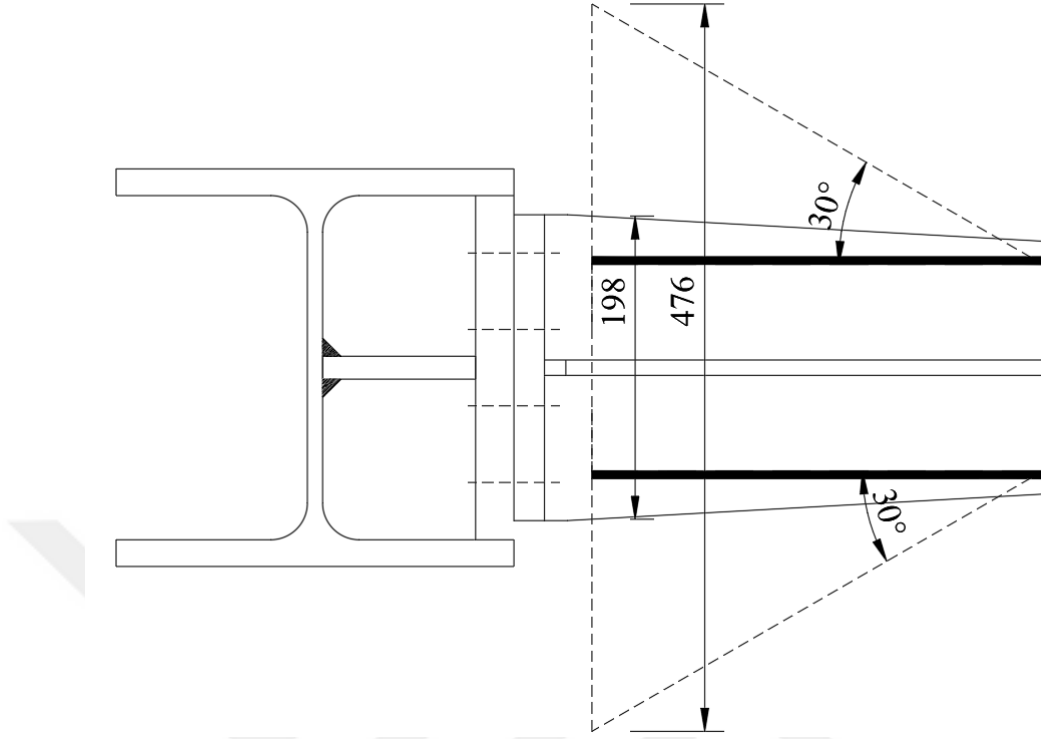
Çekme kuvveti etkisindeki kontroller için Whitmore genişliği (W_{whit}) hesaplanmıştır (Şekil E.2).

$$W_{whit} = 2L_{vb} \tan 30^\circ + g_{vb}$$

$$L_w = 295 \text{ mm}$$

$$g_w = b_f = 135 \text{ mm}$$

$$W_{whit} = 2L_w \tan 30^\circ + g_w = 2 \times 295 \times \tan 30^\circ + 135 = 475,6 \text{ mm}$$



Şekil E.2: Whitmore genişliği ve kaynak başlangıcında T-parçanın gövdesinin genişliği.

Köşe kaynakların başlangıcında T-parça başlık genişliği (W_T) 198 mm olarak ölçülmüştür. W_T genişliği Whitmore genişliğinden daha küçük olduğundan T-parçanın gövdesinin kalınlığının belirlenmesinde bu genişlik dikkate alınmıştır.

$$W_T = 198 \text{ mm} < W_{whit} = 475,6 \text{ mm}$$

Çekme kuvveti etkisinde akma sınır durumuna bağlı olarak T-parçanın gövdesinin minimum kalınlığı t_{st} hesaplanmıştır.

$$t_{st} \geq \frac{F_{pr}}{\min(W_T, W_{whit}) \phi_d F_{yt}} = \frac{858,5 \times 10^3}{198 \times 1,00 \times 355} = 12,3 \text{ mm}$$

Kiriş başlığına bağlanan T-parçası, HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacaktır. Söz konusu profilin gövde kalınlığı 13,5 mm 'dir. Bu kalınlık, çekme kuvveti etkisindeki sınır durumlara karşı yeterli dayanımın sağlanması için gerekli kalınlıklardan daha büyük olarak elde edildiğinden, HE 400 B profilinin gövde kalınlığı çekme kuvvetinin aktarılması açısından yeterli bulunmuştur.

Basınç kuvveti etkisi altındaki kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinde burkulma sınır durumu kontrol edilmiştir.

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm} \geq \frac{s_2 - t_{ft}}{9,60} = \frac{51 - 13,5}{9,60} = 3,91 \text{ mm}$$

Bu kontrolle, HE 400 B profilinin gövdesinin burkulma sınır durumuna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu gösterilmiştir.

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlık levhası ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık levhasının birleşiminde kullanılacak bulonların minimum çapı (d_{tb}), T-parçanın başlığında 8 adet bulon kullanılacağı öngörülerek hesaplanmıştır.

$$d_{tb} \geq \sqrt{\frac{4F_{pr}}{n_{tb}\phi_n\pi F_{nt}}} = \sqrt{\frac{4 \times 858,5 \times 10^3}{8 \times 0,90 \times \pi \times 750}} = 14,23 \text{ mm}$$

Bu sonuca göre çekme bulonlarının çapı $d_{tb} = 16 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir.

Çekme bulonlarının çapının belirlenmesinin ardından, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlık genişliği (b_{ft}) hesaplanmıştır (Şekil E.3).

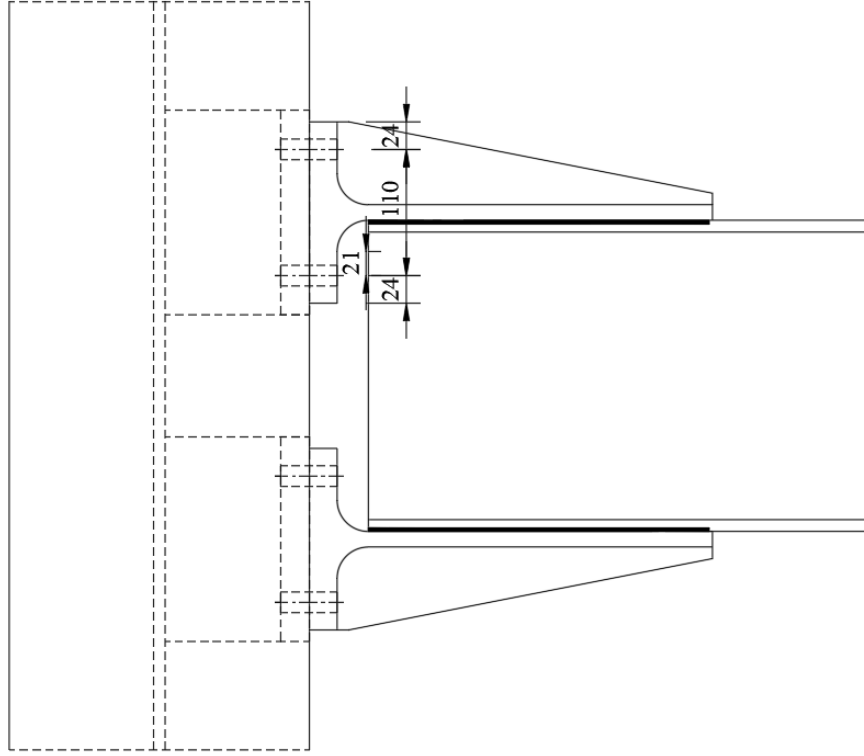
$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a$$

$$g_{tb} = 110 \text{ mm}$$

$$a = 1,5d_{tb} = 1,5 \times 16 = 24 \text{ mm} < 1,25b = 1,25 \times 21 = 26,25 \text{ mm}$$

$$b_{ft} \geq g_{tb} + 2a = 110 + 2 \times 24 = 158 \text{ mm}$$

$$b_{ft} = 158 \text{ mm} \text{ olarak belirlenmiştir.}$$



Şekil E.3: T-parçanın başlık genişliği.

T-parçanın başlığında bulunan bir bulonun çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$\phi r_{nt} = \phi_n A_{tb} F_{nt} = 0,90 \times \frac{\pi d_{tb}^2}{4} \times 750 \times 10^{-3} = 135,7 \text{ kN}$$

Bir bulonun çekme dayanımının hesaplanmasının ardından, kiriş başlığında yer alan T-parça başlığının gerekli dayanımı (T_{req}) hesaplanmıştır.

$$T_{req} = \frac{F_{pr}}{n_{tb}} = \frac{858,5}{8} = 107,3 \text{ kN}$$

Karma göçme modu (Mixed-mode failure), hem T-parçanın başlığında akmanın meydana gelmesini hem de bulonlarda hasar oluşmasını kapsayan, her iki mekanizmanın birlikte etkili olduğu bir hasar türü olarak tanımlanmaktadır. Tasarımda genellikle belirleyici hasar modu olarak bu durumun gerçekleşeceği varsayımıyla, kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığının minimum kalınlığı (t_{ft}) hesaplanmıştır.

$$a' = a + \frac{1}{2} d_{tb} = 24 + \frac{1}{2} \times 16 = 32 \text{ mm}$$

$$b' = b - \frac{1}{2} d_{tb} = 21 - \frac{1}{2} \times 16 = 13 \text{ mm}$$

$$p = \frac{2W_T}{n_{tb}} = \frac{2 \times 196}{8} = 49 \text{ mm}$$

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{T_{req}(a' + b') - \phi r_{nt} a'}{\phi_a F_{yt} p}}$$

$$t_{ft} \geq 2 \sqrt{\frac{107,3 \times 10^3 \times (32 + 13) - 135,7 \times 10^3 \times 32}{1,00 \times 355 \times 49}}$$

$$t_{ft} \geq 10,6 \text{ mm}$$

Kiriş başlığına bağlanan T-parçası, HE 400 B profilinden kesilerek oluşturulacaktır. Söz konusu profilin başlık kalınlığı 24 mm'dir. Bu kalınlık, karma göçme moduna karşı yeterli dayanımın sağlanması için gerekli kalınlıktan daha büyük elde edilmiştir. HE 400 B profilinin başlık kalınlığının, kaldırma etkisini (prying action) ortadan kaldırmak için gereken kalınlık $t_{ft,crit}$ 'den daha büyük olduğu bu adımda gösterilmiştir.

$$t_{ft} = 24 \text{ mm} \geq t_{ft,crit} = \sqrt{\frac{4\phi r_{nt} b'}{\phi_a F_{yt} p}} = \sqrt{\frac{4 \times 135,7 \times 10^3 \times 13}{1,00 \times 355 \times 49}} = 20,14 \text{ mm}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın geometrisi belirlendikten sonra, birleşimin tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak sınıflandırılabilmesi için gerekli kontroller yapılmıştır.

$$I_{ft} = \frac{p t_{ft}^3}{12} = \frac{49 \times 24^3}{12} = 56448 \text{ mm}^4$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{200000}{2 \times (1 + 0,3)} = 76923 \text{ MPa}$$

$$\beta_a = 1 + \frac{12EI_{ft}}{G p t_{ft} a'^2} = 1 + \frac{12 \times 200000 \times 56448}{76923 \times 49 \times 26 \times 32^2} = 2,35$$

$$\beta_b = 1 + \frac{12EI_{ft}}{G p t_{ft} b'^2} = 1 + \frac{12 \times 200000 \times 56448}{76923 \times 49 \times 26 \times 13^2} = 9,18$$

$$K_{flange} = \frac{12n_{tb}EI_{ft}(a'\beta_a + 3b'\beta_b)}{b'^3\beta_b(4a'\beta_a + 3b'\beta_b)}$$

$$K_{flange} = \frac{12 \times 8 \times 200000 \times 56448 \times (32 \times 2,35 + 3 \times 13 \times 9,18) \times 10^{-3}}{13^3 \times 9,17 \times (4 \times 32 \times 2,35 + 3 \times 13 \times 9,18)}$$

$$K_{flange} = 35,364 \text{ kN/mm}$$

$$K_{stem} = \frac{t_{st} E (W_T - b_{fb})^2}{L_{stem} \left[(W_T - b_{fb}) + b_{fb} \ln \left(\frac{b_{fb}}{W_T} \right) \right]}$$

$$K_{stem} = \frac{13,5 \times 200000 \times (196 - 135)^2}{298 \times \left[(196 - 135) + 135 \times \ln \left(\frac{135}{196} \right) \right]}$$

$$K_{stem} = 3,161 \text{ kN/mm}$$

$$1/K_{slip} = 0$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{K_{flange}} + \frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{ten} = \left(\frac{1}{35364} + \frac{1}{3161} + 0 \right)^{-1} = 2902 \text{ kN/mm}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{K_{stem}} + \frac{1}{K_{slip}} \right)^{-1}$$

$$K_{comp} = \left(\frac{1}{3161} + 0 \right)^{-1} = 3161 \text{ kN/mm}$$

$$K_i = \frac{d_b^2 K_{ten} K_{comp}}{K_{ten} + K_{comp}} = \frac{270^2 \times 2902 \times 3161 \times 10^{-3}}{2902 + 3161} = 110297 \text{ kNm}$$

$$\frac{18 \times E \times I_{kiriş}}{L_o} = \frac{18 \times 200000 \times 5,79 \times 10^7 \times 10^{-9}}{6,26} = 33297 \text{ kNm}$$

$K_i \geq 18EI_{kiriş}/L$ koşulu sağlandığından birleşim tam rijit (Fully Restrained) bir bağlantı olarak nitelendirilir.

Kolon başlıkları arasında yer alan T-parçanın başlığı ile kiriş başlığında yer alan T-parçanın başlığı arasındaki yüzeyde gerekli eğilme momenti dayanımı ($M_f = M_{uc}$) ve kiriş başlığında yer alan T-parçanın belirlenen gövde kalınlığı kullanılarak kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesine etki eden gerçek başlık kuvveti (F_f) hesaplanmıştır.

$$F_f = \frac{M_{uc}}{d_b + t_{st}} = \frac{243,4 \times 10^3}{270 + 13,5} = 858,5 \text{ kN}$$

T-parçanın gövdesi ile kiriş başlığının bağlantısında kullanılacak kaynaklı birleşimin dayanımı, esas metalde ve kaynak metalindeki sınır durumlara göre hesaplanmış ve gerçek başlık kuvveti (F_f) göz önüne alınarak kontrol edilmiştir. Hesaplamalarda köşe kaynak etkin uzunluğu ($L_{w'}$) dikkate alınmıştır.

$$A_{we} = n_w a_w$$

$$A_{BM,t} = n_w L_{w'} t_{st}$$

$$A_{BM,b} = n_w L_{w'} t_{fb}$$

$$L_{w'} = L_w - 2a_w$$

$$\phi R_n = \min \left[\begin{array}{l} \phi_n 0,60 F_E A_{we} \\ \phi_n 0,60 F_{ub} A_{BM,b} \\ \phi_n 0,60 F_{ut} A_{BM,t} \end{array} \right]$$

$$\phi R_n = \min \left[\begin{array}{l} 0,90 \times 0,60 \times 550 \times (2 \times 5,5) \times (295 - 2 \times 5,5) \\ 0,90 \times 0,60 \times 430 \times (2 \times 10,2) \times (295 - 2 \times 5,5) \\ 0,90 \times 0,60 \times 510 \times (2 \times 13,5) \times (295 - 2 \times 5,5) \end{array} \right] = 927 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 927 \text{ kN} \geq 858,5 \text{ kN}$$

Böylelikle önceki adımlarda belirlenen kaynak kalınlığı ve uzunluğu ile oluşturulan bağlantının gerçek başlık kuvvetine (F_f) karşı yeterli dayanıma sahip olduğu doğrulanmıştır.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımı hesaplanmış ve gerçek başlık kuvvetine (F_f) karşı kontrol edilmiştir.

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st}$$

$$\phi R_n = 1,00 \times 355 \times \min(196, 475,6) \times 13,5 \times 10^{-3} = 939,3 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 939,3 \text{ kN} \geq F_f = 858,5 \text{ kN}$$

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın gövdesindeki kayıpsız enkesit alanında çekme kuvveti dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma sınır durumuna karşı dayanımı kontrol edilmiştir.

$$\frac{KL}{r} = 2,60 \left(\frac{S_2 - t_{ft}}{t_{st}} \right) = 2,60 \times \left(\frac{51 - 24}{13,5} \right) = 5,20$$

$$\frac{KL}{r} = 5,20 \leq 25$$

$$\phi R_n = \phi_d F_{yt} \min(W_T, W_{Whit}) t_{st}$$

$$\phi R_n = 1,00 \times 355 \times \min(196, 475, 6) \times 13,5 \times 10^{-3} = 939,3 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 939,3 \text{ kN} \geq F_f = 858,5 \text{ kN}$$

Kiriş başlığına birleşen T-parçanın gövdesinin eğilmeli burkulma dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.

T-parçanın başlık dayanımı, plastik başlık mekanizması, karma göçme modu ve kaldırma etkisi olmadan çekme etkisindeki bulonun kırılması sınır durumlarına karşı dayanımların en küçüğü olacak şekilde belirlenir.

İlk olarak, T-parçanın başlığında plastik mekanizma sınır durumu için dayanım (ϕT_1) hesaplanmıştır.

$$\phi T_1 = \frac{(1 + \delta)}{4b'} p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2$$

$$\delta = 1 - \frac{d_{tht}}{p} = 1 - \frac{18}{49} = 0,633$$

$$\phi T_1 = \frac{(1 + 0,633)}{4 \times 13} \times 49 \times 1,00 \times 355 \times 24^2 \times 10^{-3} = 314,6 \text{ kN}$$

T-parçanın başlığında, önce akma ardından bulonların kırılmasıyla meydana gelen karma göçme modu (mixed-mode failure) sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı (ϕT_2) hesaplanır.

$$\phi T_2 = \frac{\phi r_{nt} a'}{a' + b'} + \frac{p \phi_d F_{yt} t_{ft}^2}{4(a' + b')}$$

$$\phi T_2 = \frac{135,7 \times 32}{32 + 13} + \frac{49 \times 1,00 \times 355 \times 24^2 \times 10^{-3}}{4 \times (32 + 13)} = 152,2 \text{ kN}$$

Son olarak, çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması sınır durumu için, her bir çekme bulonu başına düşen tasarım dayanımı (ϕT_3) hesaplanır.

$$\phi T_3 = \phi r_{nt} = 135,7 \text{ kN}$$

Kritik sınır durumu çekme başlığında akma meydana gelmeksizin gerçekleşen bulon kırılması olarak belirlenmiştir.

Kayma gerilmesi etkisi altındaki düzlemde kayıpsız enkesit alanı A_{gv} ve net enkesit alanı A_{nv} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{vp} = 2$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_s = 295 \text{ mm}$$

$$A_{gv} = n_{sp} t_{st} b_s = 2 \times 13,5 \times 295 = 7965 \text{ mm}^2$$

$$A_{nv} = A_{gv} = 7965 \text{ mm}^2$$

Çekme gerilmesi etkisi altındaki kayıpsız enkesit alanı A_{gt} ve net enkesit alanı A_{nt} aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_{tp} = 1$$

$$t_{st} = 13,5 \text{ mm}$$

$$b_t = 135 \text{ mm}$$

$$A_{gt} = n_{tp} t_p b_t = 1 \times 13,5 \times 135 = 1822,5 \text{ mm}^2$$

$$n_{tde} = 1$$

$$A_{nt} = A_{gt} = 1822,5 \text{ mm}^2$$

S355 yapı çeliğın karakteristik akma gerilmesi $F_{yp} = 355 \text{ MPa}$ ve karakteristik çekme dayanımı $F_{up} = 510 \text{ MPa}$ göz önünde bulundurulmuş ve blok kırılma dayanımı hesaplanmıştır.

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 F_{yp} A_{gv}}{0,60 F_{up} A_{nv}} \right) + U_{bs} F_{up} A_{nt}$$

$$R_{nbs} = \min \left(\frac{0,60 \times 355 \times 7965 \times 10^{-3}}{0,60 \times 510 \times 7965 \times 10^{-3}} \right) + 1,00 \times 510 \times 1822,5 \times 10^{-3}$$

$$R_{nbs} = 2626 \text{ kN}$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$F_f = 858,5 \text{ kN} < \phi_d R_{nbs} = 1,00 \times 2626 \text{ kN} = 2626 \text{ kN}$$

Kiriş başlığında yer alan T-parçanın gövdesinin belirlenen blok kırılma moduna karşı yeterli dayanıma sahip olduğu görülmektedir.

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (E.1).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (E.1)$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1,00$ olarak alınmıştır.

$$A_w = dt_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,74 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimde kesme kuvvetinin eğilme momentinin etkisinde basınç bölgesinde yer alan T-parçalar ve bu parçaların kolon başlıklarında yer alan T-parçaların başlıklarına bağlandığı 8 adet 10.9 kalitedeki M16 bulon tarafından karşılanacağı öngörülmüş ve bulonların kesme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

$$A_b = 201,06 \text{ mm}^2$$

$$n_b = 8$$

$$F_{nv} = 450 \text{ MPa}$$

$$\phi_n = 0,90$$

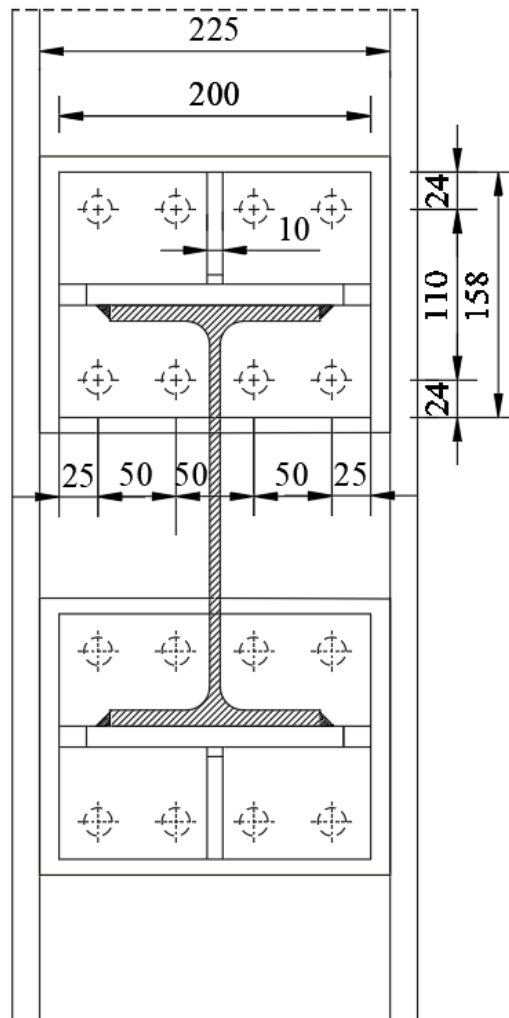
$$V_u \leq \phi_n n_b F_{nv} A_b = 0,90 \times 8 \times 450 \times 201,06 \times 10^{-3} = 651,4 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,74 \text{ kN} \leq 651,4 \text{ kN}$$

Basınç kuvveti etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulonların kesme kuvvetine karşı yeterli dayanıma sahip oldukları görülmektedir.

Bulonların kesme kuvveti dayanımının hesaplanmasının ardından, T-parçanın başlığındaki bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı hesaplanmıştır.

İlk olarak, kuvvet doğrultusunda, bulon deliklerinin kenarından levha kenarına uzaklık (l_{ce}); bir delik kenarı ile en yakın diğer delik kenarı arasındaki uzaklık (l_{ci}) belirlenmiştir. Bu uzaklıkların belirlenmesi için bulon deliği merkezinden levhanın kenarına olan uzaklık (L_e) ve iki bulon deliğinin merkezi arasındaki uzaklık (L_i) kullanılmıştır (Şekil E.5).



Şekil E.5: T-parçanın başlıklarında bulon yerleşimi.

Basınç başlığında yer alan birinci sıradaki bulon delikleri “kenar bulon delikleri”; ikinci sıradaki bulon delikleri ise “iç bulon delikleri” olarak sınıflandırılmıştır.

Birleşimde kuvvet doğrultusunda 4 adet kenar bulon deliği (n_e) ve 4 adet iç bulon deliği (n_i) bulunmaktadır.

Kenar bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_e = 4$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_e = 24 \text{ mm}$$

$$l_{ce} = L_e - \frac{d_h}{2} = 24 - \frac{18}{2} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm}$$

$$F_u = 510 \text{ MPa}$$

$$r_{n1,e1} = n_e 1,2 l_{ce} t_{ft} F_u = 4 \times 1,2 \times 15 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 881,3 \text{ kN}$$

$$r_{n1,e2} = n_e 2,4 d_b t_{ft} F_u = 4 \times 2,4 \times 16 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 1880 \text{ kN}$$

İç bulon deliklerinin ezilme kuvveti dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$n_i = 4$$

$$d_b = 16 \text{ mm}$$

$$d_h = 18 \text{ mm}$$

$$L_i = 110 \text{ mm}$$

$$l_{ci} = L_i - d_h = 110 - 18 = 92 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm}$$

$$r_{n2,i1} = n_i 1,2 l_{ci} t_{ft} F_u = 4 \times 1,2 \times 92 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 5405 \text{ kN}$$

$$r_{n2,i2} = n_i 2,4 d_b t_{ft} F_u = 4 \times 2,4 \times 16 \times 24 \times 510 \times 10^{-3} = 2350 \text{ kN}$$

Birleşimin tasarım ezilme kuvveti dayanımı $\phi_n R_n$, kenar ve iç bulon deliklerinin dayanımlarının toplamı şeklinde hesaplanır.

$$\phi_n = 0,90$$

$$\phi_n R_n = \phi_n r_{n1,e1} + r_{n2,i2} = 0,90 \times 881,3 + 0,90 \times 2,350 = 2,908 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = V_h = 96,74 \text{ kN} \leq R_n = 2,908 \text{ kN}$$

Basınç kuvveti etkisi altındaki T-parçanın başlığındaki bulon delikleri yeterli ezilme kuvveti dayanımına sahiptir.

Bir sonraki adımda, kolon başlıkları arasına kaynaklanan T-parçanın gövde, t_{tcw} , ve başlık, t_{tcf} , kalınlıkları belirlenmiştir.

$$t_{bw} = 6.6 \text{ mm} \leq t_{tcw} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{ft} = 24 \text{ mm} \leq t_{tcf} = 25 \text{ mm}$$

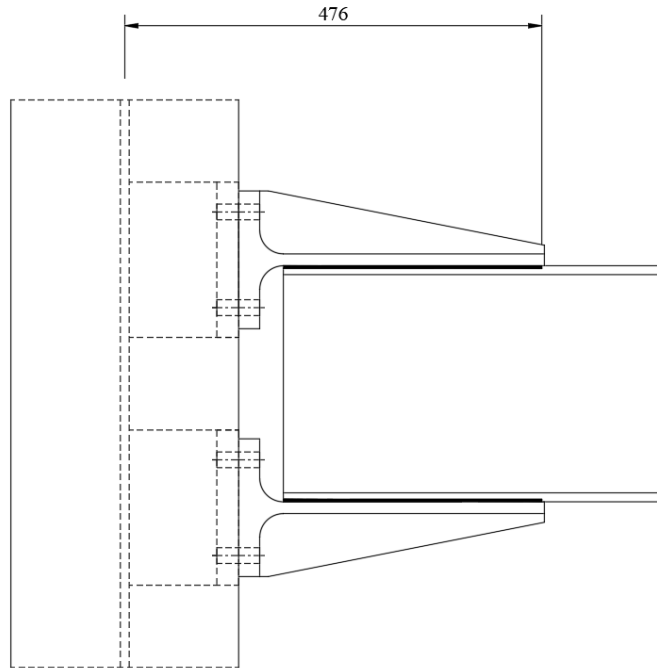
Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilmiştir. Plastik mafsalin kolon merkezinden uzaklığı denklem E.2 ile hesaplanır (Şekil E.6).

$$s_{h,kT} = \frac{d_c}{2} + l_h \quad (\text{E.2})$$

d_c : Kolon enkesit yüksekliği, mm.

l_h : Plastik mafsalin kolon başlıklarının arasında yer alan T-parçanın başlığının dış yüzeyinden uzaklığı, mm.

$$s_{h,kT} = \frac{d_c}{2} + l_h = \frac{260}{2} + 346 = 476 \text{ mm}$$



Şekil E.6: Plastik mafsalin kolon merkezinden uzaklığı.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri (M_{uv}) bulonlu alın levhalı birleşimde denklem E.3 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_p \times s_{h,kT} \quad (E.3)$$

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri gözönüne alınarak kiriş boyuna eksenel hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı (ΣM^*_{pc}) bu tezdeki 4.2 numaralı “Birleşim Tasarımındaki Genel koşullar” bölümünde hesaplanmıştır.

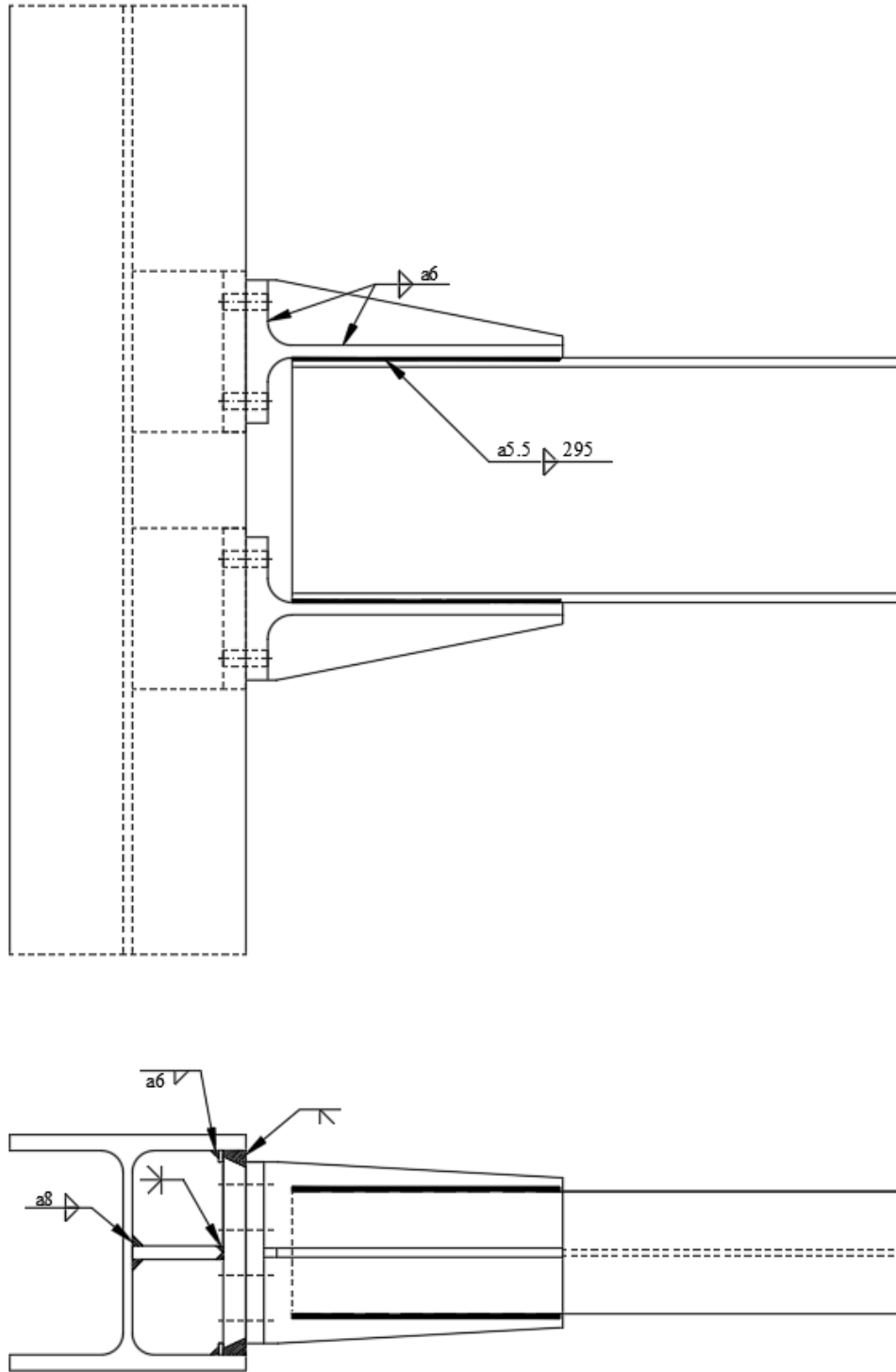
$$M_{uv} = 96,74 \times 476 \times 10^{-3} = 46,05 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M^*_{pb} = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 207,60 + 46,05 = 253,7 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M^*_{pc}}{\Sigma M^*_{pb}} = \frac{469,9}{253,7} = 1.85 > 1.0$$

T-parçalı kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil E.7’de gösterilmiştir.



Şekil E.7: Birleşimdeki kaynak detayları.



EK F

Belirlenen tasarım esasları doğrultusunda birleşimin boyutlandırması bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

S275 yapı çeliğinin pekleşme durumunun dikkate alındığı katsayı AISC 358-22 Bölüm 8 ve TBDY 2018 Ek 9B.4'te belirtildiği gibi (C_{pr}) 1,40 olarak belirlenmiştir. Beklenen akma gerilmesinin yönetmeliklerce belirlenen karakteristik akma gerilmesine oranını dikkate alan katsayı (R_y) ise 1,30 olarak alınmıştır (TBDY 2018 9.2.4).

IPE270 profilinin kuvvetli eksenini etrafındaki plastik mukavemet momenti $W_{pb} = 484 \times 10^3 \text{ mm}^3$ şeklinde hesaplanmıştır. Bu bilgiler kullanılarak beklenen plastik eğilme momenti kapasitesi hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_{yb} W_{pb} = 1,40 \times 1,30 \times 275 \times 484 \times 10^3 \times 10^{-6} = 242,2 \text{ kNm}$$

Plastik mafsallın kiriş ucuna kaynaklanan alın levhasının kirişle birleştiği bölgede oluşması beklenir. Bu nedenle plastik mafsallın alın levhasının yüzeyinden mesafesi $l_h = 0$ olarak alınır.

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı, kiriş başlıkları hizasındaki bağlantı levhalarının uzunluğu (L_{bs}), kiriş ucu ile plastik mafsallın merkezi arasındaki uzaklık (l_h) ve kolon gövde kalınlığı (t_{cw}) göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

$$P = 0 \text{ kN}$$

$$W = 7,50 \text{ kN/m}$$

$$l_n = L - 2 \times l_h - 2 \times \left(L_{bs} + \frac{t_{cw}}{2} \right)$$

$$L_{bs} = 203 \text{ mm}$$

$$l_n = 6,260 - 2 \times 0 - 2 \times \left(0,203 + \frac{0,01}{2} \right) = 5,84 \text{ m}$$

$$V_{uc} = \frac{2M_{pr} + \frac{Pl_n}{2} + \frac{Wl_n^2}{2}}{l_n} = \frac{2 \times 242,2 + 0 + \frac{7,50 \times 5,84^2}{2}}{5,84} = 104,8 \text{ kN}$$

Plastik mafsalda gerekli kesme kuvveti dayanımı ve beklenen eğilme momenti kapasitesi göz önüne alınarak kiriş ucunda gerekli eğilme momenti dayanımı hesaplanmıştır.

$$M_{uc} = M_{pr} + V_{uc}l_h = 242,2 + 104,8 \times 0 = 242,2 \text{ kNm}$$

Kirişin tasarım kesme kuvveti dayanımı V_d , AISC 360-22 Bölüm G2 ve ÇYTHYE 2018 Bölüm 10.2.1'e göre kontrol edilmiştir (F.1).

$$V_{uc} \leq V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1} \quad (F.1)$$

$$h = 219,6 \text{ mm}$$

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$t_w = 6,6 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 275 \text{ MPa}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{219,6}{6,6} = 33,27 \leq 2,24 \sqrt{\frac{200000}{275}} = 60,41$$

koşulu sağlandığından $C_{v1} = 1.00$ olarak alınır.

$$A_w = dt_w = 270 \times 6,6 = 1782 \text{ mm}^2$$

$$\phi_d = 1,00$$

$$V_d = \phi_d 0,60 F_y A_w C_{v1}$$

$$V_d = 1,00 \times 0,60 \times 275 \times 1782 \times 1,00 \times 10^{-3} = 294 \text{ kN}$$

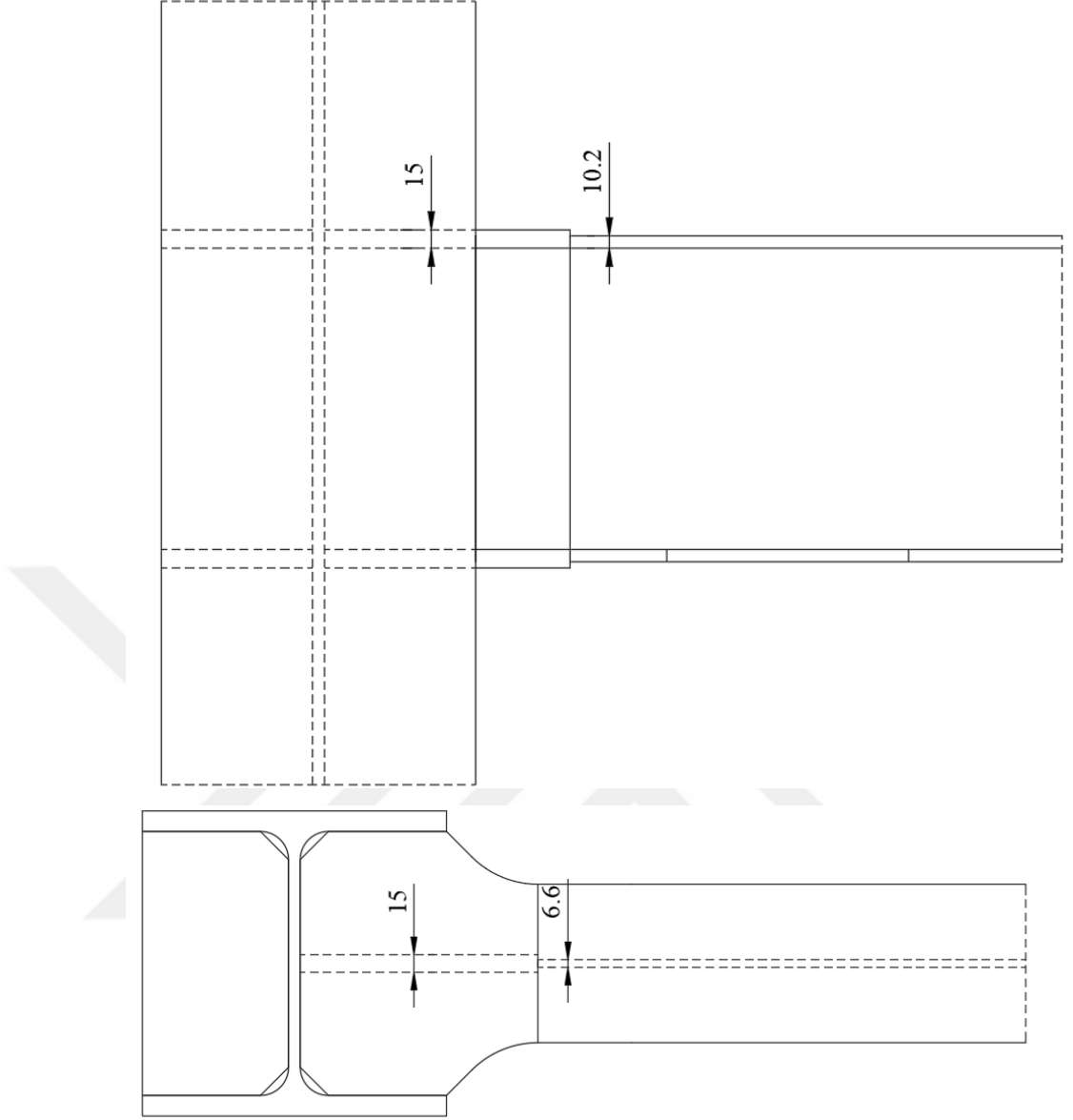
$$V_{uc} = V_h = 104,8 \text{ kN} \leq V_d = 294 \text{ kN}$$

Kiriş yeterli kesme kuvveti dayanımına sahiptir.

Birleşimde kiriş gövdesi hizasındaki bağlantı levhasının kalınlığı (t_{sw}); kiriş başlıkları hizasındaki başlık bağlantı levhalarının kalınlığı (t_{sf}), sırasıyla kiriş gövde kalınlığı (t_{bw}) ve başlık kalınlığından (t_{bf}) en az 3 mm kalın olacak şekilde belirlenmiştir (Şekil F.1).

$$t_{bf} + 3 = 10,2 + 3 = 13,2 \text{ mm} \leq t_{sf} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{bw} + 3 = 6,6 + 3 = 9,6 \text{ mm} \leq t_{sw} = 15 \text{ mm}$$



Şekil F.1: Bağlantı levhalarının kalınlıkları.

Birleşimdeki elemanlarının geometrisinin belirlenmesinin ardından son adım olarak kirişin kolondan daha güçlü olması durumu kontrol edilmiştir. Plastik mafsalin ile kolon merkezi arasındaki uzaklık denklem F.2 ile hesaplanır (Şekil F.2).

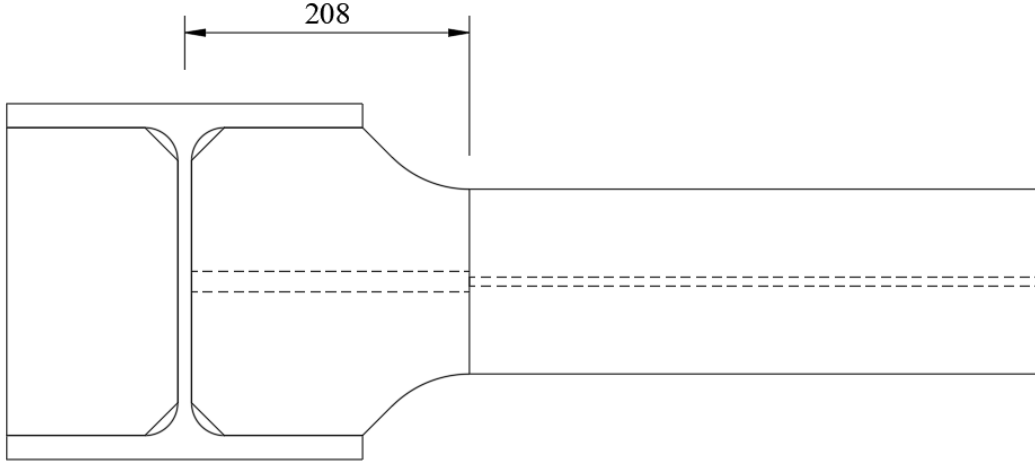
$$s_{h,ka} = \frac{t_{cw}}{2} + L_{bs} + l_h \quad (F.2)$$

L_{bs} : Başlık bağlantı levhasının uzunluğu, mm.

t_{cw} : Kolon gövde kalınlığı, mm.

l_h : Kiriş ucu ile plastik mafsalin merkezi arasındaki uzaklık, mm.

$$s_{h,ka} = \frac{10}{2} + 203 + 0 = 208 \text{ mm}$$



Şekil F.2: Plastik mafsalsın kolon merkezinden uzaklığı.

Kolon aksındaki eğilme momenti değeri M_{uv} bulonlu alın levhalı birleşimde denklem F.3 ile hesaplanır.

$$M_{uv} = V_{uc} \times s_{h,ka} \quad (F.3)$$

V_p : Plastik mafsalda oluşacak kesme kuvveti, kN.

$s_{h,ka}$: Plastik mafsal ile kolon merkezi arasındaki mesafe, mm.

d_c : Kolon enkesit yüksekliği, mm.

Kolon aksındaki eğilme momenti, plastik mafsalda beklenen eğilme momenti kapasitesi (M_{pr}) ve gerekli kesme kuvveti dayanımına (V_{uc}) bağlı olarak hesaplanmıştır. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde depremin yönü ile uyumlu olmak koşuluyla, kolon eğilme momenti dayanımlarını en küçük yapan tasarım eksenel kuvvetleri gözönüne alınarak kiriş boyuna eksenel hizasında hesaplanan üst veya alt kat kolonların eğilme momenti dayanımlarının toplamı (ΣM_{pc}^*) bu tezdeki 4.2 numaralı “Birleşim Tasarımındaki Genel koşullar” bölümünde hesaplanmıştır.

$$V_{uc} = 104,8 \text{ kN}$$

$$s_{h,ka} = 208 \text{ mm}$$

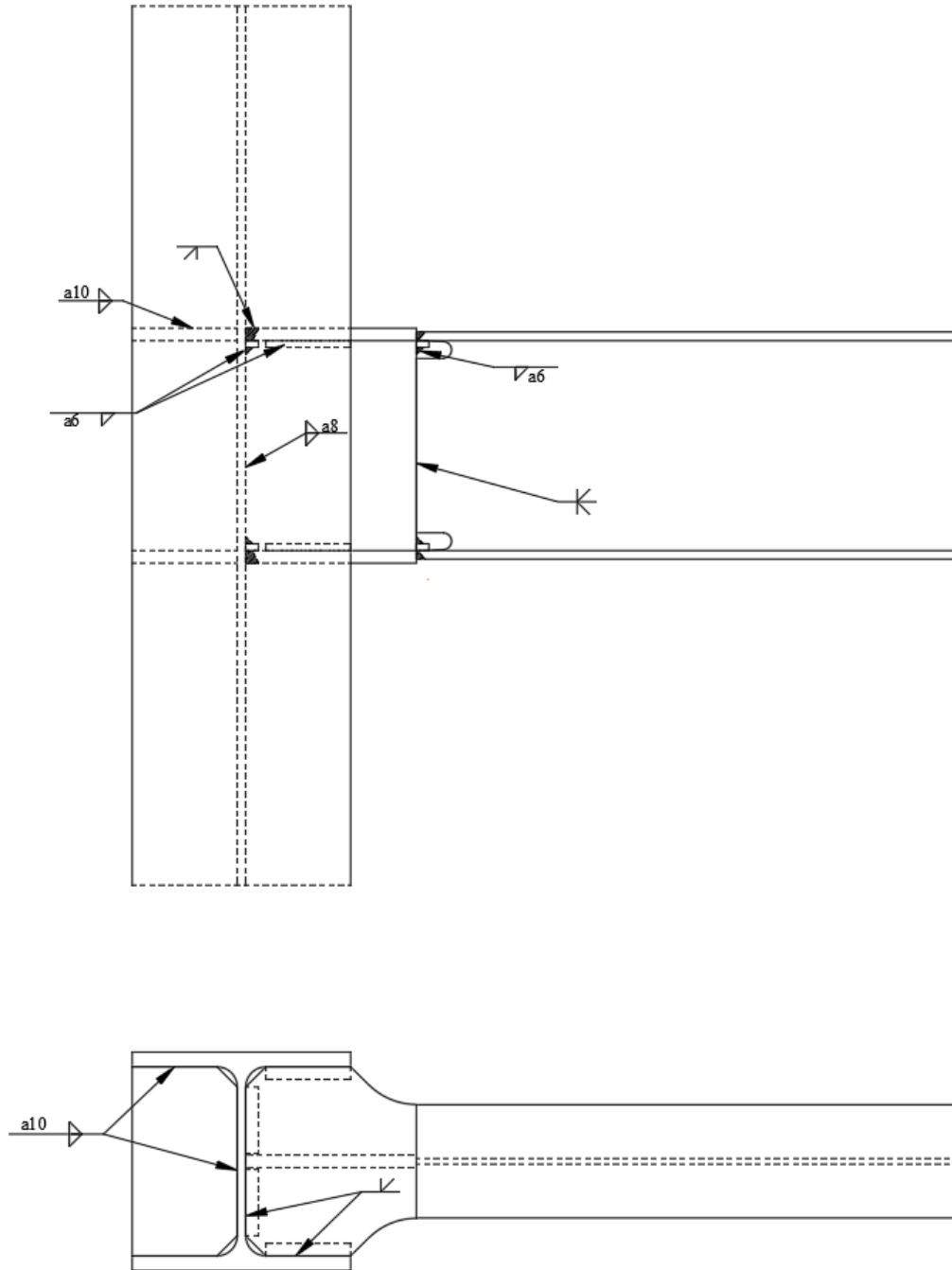
$$M_{uv} = 104,8 \times 208 \times 10^{-3} = 21,80 \text{ kNm}$$

$$\Sigma M_{pb}^* = \Sigma M_{pr} + M_{uv} = 242,2 + 21,80 = 264 \text{ kNm}$$

$$\frac{\Sigma M_{pc}^*}{\Sigma M_{pb}^*} = \frac{469.9}{264} = 1.78 > 1.0$$

Tam penetrasyonlu küt kaynaklı I-enkesitli kiriş – zayıf eksen H-enkesitli kolon birleşimi için kolonun kirişten daha güçlü olması koşulu sağlanmıştır.

Birleşimdeki kaynak detayları Şekil F3'te gösterilmiştir.



Şekil F.3: Birleşimdeki kaynak detayları.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Kutay Kutsal

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Vatansever, C. & Kutsal, K.** 2024. Nonlinear Behavior of I-Shaped Reduced Beam-to-H-Shaped Column Weak Axis Moment Connections Under Cyclic Loading, *Arabian Journal for Science and Engineering*.
<https://doi.org/10.1007/s13369-024-09635-w>

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Vatansever, C., Kutsal, K.** 2018. Effect of Bolted Splice within the Plastic Hinge Zone on Beam-to-Column Connection Behavior, *Steel and Composite Structures*, 28(6), 767–778. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.28.6.767>