

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DBYBHY-2007'DEKİ MOMENT AKTARAN
ÇELİK BİRLEŞİMLERİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ**

ORKUN YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. SERKAN BEKİROĞLU**

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DBYBHY-2007'DEKİ MOMENT AKTARAN
ÇELİK BİRLEŞİMLERİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Orkun YILMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 02/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Abdurrahman ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Barlas ÇAĞLAYAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Çalışmalarımın her aşamasında sabır ve hoşgörü ile değerli görüş, eleştiri ve tavsiyelerini bana aktaran tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU'na teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren jürideki hocalarım Sayın Doç. Dr. Abdurrahman ŞAHİN'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Barlas ÇAĞLAYAN'a teşekkür ederim.

Zaman zaman görüşlerinden faydalandığım Yapı Anabilim Dalı'ndaki hocalarıma da teşekkür ederim.

Bugüne kadar verdikleri bütün desteklerden dolayı annem Arzu YILMAZ'a, babam Mustafa YILMAZ'a ve kardeşim Muammer YILMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2015

Orkun YILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iiv
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	1
1.3 Bulgular	2
BÖLÜM 2	
GENEL BİLGİLER	3
2.1 Çeliğin Mekanik Özellikleri	3
2.2 Kolon – Kiriş Birleşimleri	4
2.3 Northridge Öncesi Birleşimler.....	5
2.4 Northridge Sonrası Birleşimler	8
2.5 Plastik Mafsal Kavramı ve Enerji Tüketme.....	15
2.6 Kolon – Kiriş Birleşimleri İçin Yapılan Bazı Çalışmalar	15
2.6.1 Bulonlu Birleşimler İçin Yapılan Bazı Çalışmalar	16
2.6.2 Kaynaklı Birleşimler İçin Yapılan Bazı Çalışmalar.....	20
BÖLÜM 3	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLEME YAKLAŞIMI	23

3.1	Problem Geometrisinin Oluşturulması	24
3.2	Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi	26
3.3	Temas Durumlarının Belirlenmesi.....	27
3.4	Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması	30

BÖLÜM 4

SONLU ELEMEN MODELLEMELERİNİN DOĞRULANMASI.....		39
4.1	Birleşimlerin Analize Hazırlanması.....	39
4.1.1	Birleşimlerin Geometrik Detayları.....	39
4.1.2	Sonlu Eleman Modelleri	41
4.1.3	Temas Özellikleri	44
4.1.4	Malzeme Özellikleri.....	45
4.1.5	Yükleme	45
4.1.6	Analiz Ayarları.....	45
4.2	İrdeleme ve Değerlendirme	46

BÖLÜM 5

DBYBHY-2007'DE BELİRTİLEN MOMENT AKTARAN ÇELİK BİRLEŞİMLERİN ANALİZİ		50
5.1	Birleşimlerin Analize Hazırlanması.....	50
5.1.1	Birleşimlerin Geometrik Detayları.....	50
5.1.2	Sonlu Eleman Modelleri	54
5.1.3	Temas Özellikleri	61
5.1.4	Yükleme	62
5.1.5	Malzeme Özellikleri.....	64
5.1.6	Analiz Ayarları.....	64
5.2	Sonlu Eleman Çözümlemelerinin İncelenmesi.....	65
5.2.1	Sonuçların Elde Edilmesi	65
5.2.1.1	Moment ve Dönme Değerlerinin Hesaplanması	65
5.2.1.2	Tüketilen Enerji Miktarının Hesaplanması	66
5.2.1.3	Başlangıç Dönme Rijitliklerinin Hesaplanması	66
5.2.1.4	Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması	66
5.2.2	Bulonlu Birleşimler	67
5.2.2.1	Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri	67
5.2.2.2	Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri	74
5.2.2.3	Bulonlardaki Maksimum Eşdeğer (von-Mises) Gerilme Değerleri ..	82
5.2.2.4	Bulonlu Birleşimlerin Değerlendirilmesi	84
5.2.3	Kaynaklı Birleşimler	86

5.2.3.1	Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri	86
5.2.3.2	Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri	92
5.2.3.3	Kaynaklı Birleşimlerin Değerlendirilmesi	101
5.2.4	TALB ve EBLK Birleşim Örneklerinin Karşılaştırılması	101
5.2.4.1	Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri	101
5.2.4.2	Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri	102
BÖLÜM 6		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		106
KAYNAKLAR		106
EK-A		
TEZ KAPSAMINDA ELE ALINMIŞ OLAN BİRLEŞİM ÖRNEKLERİNİN BOYUTLANDIRMASI.....		113
A-1	Takviyesiz Alın Levhalı Bulonlu Birleşim Örneği.....	115
A-1-1	Momentlerin Hesaplanması	115
A-1-2	Bulon Çapı Kontrolü	116
A-1-3	Alın Levhası Kalınlığı Seçimi.....	117
A-2	Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Örneği.....	118
A-2-1	Momentlerin Hesaplanması	118
A-2-2	Bulon Çapı Kontrolü	118
A-2-3	Alın Levhası Kalınlığı Seçimi.....	120
A-3	Alın Levhasız Bulonlu Birleşim Örneği	120
A-3-1	Momentlerin Hesaplanması	120
A-3-2	Başlık Levhası Kalınlığının Seçimi	121
A-3-3	Yük Taşıma Kaybı Mekanizmalarının Oluşmaması Bakımından Birleşimin Uygunluğunun İncelenmesi.....	122
A-4	Kaynaklı Birleşim Örneği	124
A-5	Ek Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşim Örneği	124
A-5-1	Momentlerin Hesaplanması	124
A-5-2	Başlık Levhası Kalınlığının Seçimi	125
A-5-3	Başlık Levhası Uzunluğunun Kontrolü.....	125
A-6	Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti Kaynaklı Birleşim Örneği	126
A-6-1	Zayıflama Yeri ve Miktarının Hesaplanması	126
A-6-2	Momentlerin Hesaplanması	126
A-6-3	Boyutlandırmanın Kontrolü	127
A-7	Kayma Bölgesinin Güvenliği.....	127

EK-B

SONLU ELEMEN MODELERİNİN ANSYS WORKBENCH PROGRAMI İLE HAZIRLANMASI	129
B-1 Birleşim Geometrisinin Oluşturulması	129
B-2 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi	130
B-3 Temasların Belirlenmesi	130
B-4 Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması	132
ÖZGEÇMİŞ	136

SİMGE LİSTESİ

A_b	Bulon kesit alanı
a	Kolon başlığından kiriş başlığındaki zayıflamanın başlangıcına olan mesafe
b	Kiriş başlığındaki zayıflamanın uzunluğu
b_b	Kiriş başlık genişliği
b_c	Kolon başlık genişliği
b_{ep}	Alın levhası genişliği
C	Kiriş başlığındaki zayıflamanın en fazla olduğu yerdeki zayıflama miktarı
c	Kiriş ile kolon arasındaki mesafe
C_{pr}	En büyük birleşim mukavemeti katsayısı
C_y	Kolon başlık yüzünde, kiriş başlığında akma başladığı andaki moment hesabında kullanılan bir katsayı
D_a	Arttırma katsayısı
$d_{b,b}$	Kiriş başlığındaki delik çapı
$d_{b,p}$	Başlık levhasındaki delik çapı
d_{bt}	Bulon çapı
d_z	Kayma bölgesinin süreklilik levhaları arasında kalan derinliği
d_0	Kiriş basınç başlığı ortasından, kiriş çekme başlığının üstündeki ilk çekme bulonunun merkezine uzaklığı
d_1	Kiriş basınç başlığı ortasından, en yakın çekme bulonunun merkezine uzaklığı
F_{fu}	M_f momentinden dolayı kiriş başlıklarına etki eden kuvvet
$F_{v,b}$	Bulonun kayma dayanımı
g	Kiriş gövdesinin sağ ve sol tarafındaki bulonların merkezleri arasındaki uzaklık
H_{ort}	Ortalama kat yüksekliği
h_b	Kiriş kesit yüksekliği
h_c	Kolon kesit yüksekliği
h_t	Kiriş alt ve üst başlıklarının orta noktaları arasındaki mesafe
I	Atalet momenti
L	Kolon eksenleri arasındaki uzaklık
L'	Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu

L_{st}	Alın takviye levhasının uzunluğu
L_{TF1}	Alın levhasız bulonlu birleşimde yük taşıma kaybı mekanizmalarının oluşmaması bakımından birleşimin uygunluğunun incelenmesi hesaplarında kullanılan bir katsayı
L_{TF2}	Alın levhasız bulonlu birleşimde yük taşıma kaybı mekanizmalarının oluşmaması bakımından birleşimin uygunluğunun incelenmesi hesaplarında kullanılan bir katsayı
L_{TF3}	Alın levhasız bulonlu birleşimde yük taşıma kaybı mekanizmalarının oluşmaması bakımından birleşimin uygunluğunun incelenmesi hesaplarında kullanılan bir katsayı
l_k	Kiriş başlığı takviye levhasını kiriş başlığına bağlayan köşe kaynakların toplam uzunluğu
M_c	Kolon ekseni üzerindeki moment
M_f	Kolon başlık yüzeyindeki moment
M_g	Kolon başlığı hizasında yük taşıma kaybı mekanizmalarına karşı gelen moment
M_p	Plastik moment taşıma kapasitesi
M_{pr}	Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsallarda oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi
M_{yf}	Kolon başlık yüzünde, kiriş başlığında akma başladığı andaki moment
N	Kiriş başlığı ile başlık levhası bağlantısında bir sıradaki bulon sayısı
n	Bulon sayısı
P	Kiriş üzerindeki tekil yük
P_f	Çekme bölgesindeki en yakın bulonların merkezinin kiriş başlığına uzaklığı
P_v	Bulona uygulanacak öngerilme
s_b	Kiriş gövde kalınlığı
s_c	Kolon gövde kalınlığı
S_h	Kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri
S_1	Kolon yüzünün en yakındaki bulon merkezine uzaklığı
S_3	Bulonların kiriş ekseni doğrultusunda ara mesafeleri toplamı
t_b	Kiriş başlık kalınlığı
t_c	Kolon başlık kalınlığı
t_{ep}	Alın levhası kalınlığı
t_{st}	Alın takviye levhasının kalınlığı
t_p	Birleşim kayma bölgesi kalınlığı
t_{pl}	Başlık levhası kalınlığı
T_{ub}	Bir bulonun dışdibi alanı ile taşıyabileceği maksimum çekme kuvveti
V_{ke}	Kayma bölgesinin gerekli kesme kuvveti dayanımı
V_n	Kayma bölgesinin kesme kuvveti kapasitesi
V_p	Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsallarda oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti

W	Mukavemet momenti
w	Kiriş üzerindeki yayılı yük
W_p	Plastik mukavemet momenti
$W_{p,az}$	Azaltılmış kiriş kesitinin plastik mukavemet değeri
w_z	Kayma bölgesinin kolon başlık elemanları arasında kalan genişliği
Δ	Kolon başlık levhasındaki kiriş alt ve üst başlıklarının orta nokta hizalarındaki yer değiştirme farkları
δ	Kolon başlık levhası ve alın levhası arasında kiriş üst başlığının orta nokta hizasındaki boşluk
σ_y	Kiriş kesitinin akma gerilmesi
$\sigma_{y,ep}$	Alın levhası çeliğinin akma gerilmesi
$\sigma_{u,b}$	Kiriş malzemesinin kopma dayanımı
$\sigma_{u,pl}$	Başlık levhasında kullanılan çeliğin kopma dayanımı
τ_{kem}	Kaynak emniyet gerilmesi
ϕ	Birleşimdeki dönme değeri
ϕ_{ep}	Birleşimdeki boşluk dönmesi değeri
ϕ_s	Birleşimdeki kayma dönmesi değeri

KISALTMA LİSTESİ

AISC	American Institute of Steel Construction
ALB	Alın Levhasız Bulonlu
ANSI	American National Standards Institute
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EBLK	Ek Başlık Levhalı Kaynaklı
EN	European Standart
FEMA	Federal Emergency Management Agency
TALB	Takviyeli Alın Levhalı Bulonlu
TSALB	Takviyesiz Alın Levhalı Bulonlu
ZKEK	Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti Kaynaklı

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Yapı çeliğinin çekme deneyine tabi tutulmasından elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisi	4
Şekil 2. 2 Bulonlu ve kaynaklı kolon – kiriş birleşimlerine örnekler [7]	5
Şekil 2. 3 Northridge öncesi sık kullanılan birleşim detayı [8]	6
Şekil 2. 4 Northridge depreminde sık karşılaşılan kırılma biçimi [8]	7
Şekil 2. 5 Northridge depremi sonrasında kiriş-kolon birleşimlerinde gözlemlenen kırılma çeşitleri [8]	7
Şekil 2. 6 Takviyesiz alın levhalı bulonlu birleşim detayı [9]	9
Şekil 2. 7 Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim detayı [9]	10
Şekil 2. 8 Alın levhalısız bulonlu birleşim detayı [9]	11
Şekil 2. 9 Kaynaklı birleşim detayı [9]	12
Şekil 2. 10 Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı [9]	13
Şekil 2. 11 Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı [9]	14
Şekil 2. 12 Monotonik ve çevrimsel yükleme örneği	16
Şekil 3. 1 SEY ile çözüm için izlenecek sürecin gösterildiği akış diyagramı	24
Şekil 3. 2 Örnek 1 adlı birleşim	25
Şekil 3. 3 Örnek 2 adlı birleşim	25
Şekil 3. 4 Dikkate alınan örneklerdeki bulon ve bulonun parçaları.....	25
Şekil 3. 5 Örnek 1 adlı birleşimin indirgenmiş modeli	26
Şekil 3. 6 Örnek 2 adlı birleşimin indirgenmiş modeli	26
Şekil 3. 7 İki doğrulu ve çok doğrulu gerilme – şekil değiştirme eğrisine sahip örnek durumlar.....	27
Şekil 3. 8 Temas ve hedef parçalarının şematik olarak gösterilmesi.....	27
Şekil 3. 9 Parçalar arasındaki etkileşimin dikkate alınmaması durumu	28
Şekil 3. 10 Parçalar arasındaki etkileşimin dikkate alınması durumu	28
Şekil 3. 11 ANSYS Workbench programında dikkate alınabilen temas durumlarının şematik olarak gösterilmesi	29
Şekil 3. 12 Örneklerde dikkate alınan temas türlerinin şekil üzerinde gösterilmesi.....	30
Şekil 3. 13 SOLID185 elemanı [55]	31
Şekil 3. 14 SOLID186 elemanı [55]	31
Şekil 3. 15 SOLID187 elemanı [55]	31
Şekil 3. 16 Örneklerin sınır şartları, dış kuvvetin yeri ve değeri ve bulon numaralandırmaları	32
Şekil 3. 17 Örnek 1 birleşiminin en az sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı.....	33
Şekil 3. 18 Örnek 1 birleşiminin en fazla sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı.....	34

Şekil 3. 19 Örnek 1 birleşiminde Model 6 için eş değer gerilme dağılımı (MPa).....	35
Şekil 3. 20 Örnek 2 birleşiminin en az sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı.....	36
Şekil 3. 21 Örnek 2 birleşiminin en fazla sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı.....	37
Şekil 3. 22 Örnek 2 birleşiminde Model 7 için eş değer gerilme dağılımı (MPa).....	38
Şekil 4. 1 Örnek 1 birleşiminin detayları	40
Şekil 4. 2 Örnek 2 birleşiminin detayları	40
Şekil 4. 3 Birleşimlerin boyutları ve mesnet şartları (Örnek 2 üzerinde gösterilmektedir)	41
Şekil 4. 4 Birleşimlerin tam ve yarım geometrik şekilleri (Örnek 2 üzerinden gösterilmektedir)	42
Şekil 4. 5 Literatürden alınan çalışmadaki sonlu elemanlar ağları [31]	42
Şekil 4. 6 Örnek 1 birleşiminin sonlu eleman ağı	43
Şekil 4. 7 Örnek 2 birleşiminin sonlu eleman ağı	43
Şekil 4. 8 Birleşimlerdeki bulonların sonlu eleman ağı	44
Şekil 4. 9 Temas durumlarının bir şekil üzerinde açıklanması	45
Şekil 4. 10 Bu çalışmadaki ve literatürden alınan çalışmadaki moment – dönme eğrilerinin karşılaştırılması	47
Şekil 4. 11 Bu çalışmadaki ve literatürden alınan çalışmadaki moment – kayma dönmesi eğrilerinin karşılaştırılması	48
Şekil 4. 12 Örnek 1 birleşiminin göçme modu bakımından karşılaştırılması.....	49
Şekil 5. 1 Birleşimlerdeki kolon ve kiriş uzunlukları ile sınır şartları	52
Şekil 5. 2 TSALB birleşim detayı.....	52
Şekil 5. 3 TALB birleşim detayı	53
Şekil 5. 4 ALB birleşim detayı	53
Şekil 5. 5 Kaynaklı birleşim detayı.....	53
Şekil 5. 6 EBLK birleşim detayı	54
Şekil 5. 7 ZKEK birleşimin kiriş detayı	54
Şekil 5. 8 Kaynaklı ve ZKEK birleşimlerin kaynak ulaşım deliği detayı.....	54
Şekil 5. 9 TSALB birleşimin sonlu eleman ağı	55
Şekil 5. 10 TALB birleşimin sonlu eleman ağı	56
Şekil 5. 11 ALB birleşimin sonlu eleman ağı	57
Şekil 5. 12 Kaynaklı birleşimin sonlu eleman ağı	58
Şekil 5. 13 EBLK birleşimin sonlu eleman ağı	59
Şekil 5. 14 ZKEK birleşimin sonlu eleman ağı	60
Şekil 5. 15 Alın levhali birleşimlerin temas özellikleri	61
Şekil 5. 16 Alın levhasız birleşimin başlıklarındaki temas özellikleri	61
Şekil 5. 17 Alın levhasız birleşimin gövdesindeki temas özellikleri.....	62
Şekil 5. 18 Uygulanan çevrimsel yükleme protokolü.....	63
Şekil 5. 19 Moment ve dönme hesabında pozitif ve negatif yönler	65
Şekil 5. 20 Birleşimlerin rijitliklerinin belirlenmesi	66
Şekil 5. 21 TSALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	68
Şekil 5. 22 TALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	69
Şekil 5. 23 ALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	69

Şekil 5. 24 TSALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	70
Şekil 5. 25 TALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	70
Şekil 5. 26 ALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	70
Şekil 5. 27 TSALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	72
Şekil 5. 28 TALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	72
Şekil 5. 29 ALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	72
Şekil 5. 30 TSALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	73
Şekil 5. 31 TALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	73
Şekil 5. 32 ALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	73
Şekil 5. 33 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulanan kuvvet	75
Şekil 5. 34 Çevrimsel yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulana kuvvet	75
Şekil 5. 35 TSALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	76
Şekil 5. 36 TALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	76
Şekil 5. 37 ALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	76
Şekil 5. 38 Birleşimlerde her dönme için çevrimsel ve monotonik yükleme altında meydana gelen maksimum moment farkları	78
Şekil 5. 39 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları	80
Şekil 5. 40 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	81
Şekil 5. 41 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	81
Şekil 5. 42 Birleşimlerin analiz süresince rijitlik – dönme eğrileri	82
Şekil 5. 43 Monotonik yükleme altında analiz süresince birleşimlerin bulon gruplarındaki maksimum eş değer (von-Mises) gerilme değerleri	83
Şekil 5. 44 Çevrimsel yükleme altında analiz süresince birleşimlerin bulon gruplarındaki maksimum eş değer (von-Mises) gerilme değerleri	84
Şekil 5. 45 Kaynaklı birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	86
Şekil 5. 46 EBLK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	87
Şekil 5. 47 ZKEK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	87
Şekil 5. 48 Kaynaklı birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	88

Şekil 5. 49 EBLK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	88
Şekil 5. 50 ZKEK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları	88
Şekil 5. 51 Kaynaklı birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	90
Şekil 5. 52 EBLK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	90
Şekil 5. 53 ZKEK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	90
Şekil 5. 54 Kaynaklı birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	91
Şekil 5. 55 EBLK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	91
Şekil 5. 56 ZKEK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları	91
Şekil 5. 57 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol giriş üzerine uygulanan kuvvet	93
Şekil 5. 58 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol giriş üzerine uygulanan kuvvet	93
Şekil 5. 59 Kaynaklı birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	94
Şekil 5. 60 EBLK birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	94
Şekil 5. 61 ZKEK birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri	94
Şekil 5. 62 Birleşimlerde her dönme için çevrimsel ve monotonik yükleme altında meydana gelen maksimum moment farkları	97
Şekil 5. 63 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları	98
Şekil 5. 64 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	99
Şekil 5. 65 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	99
Şekil 5. 66 Birleşimlerin analiz süresince rijitlik – dönme eğrileri	100
Şekil 5. 67 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri	103
Şekil 5. 68 Birleşimlerin çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları	103
Şekil 5. 69 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	104
Şekil 5. 70 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri	104
Şekil B-1 TSALB birleşim örneğinin geometrisinin oluşturulduktan sonraki görüntüsü.....	129
Şekil B-2 ASTM A490 çeliğinin özelliklerinin programa girilmesi	130
Şekil B-3 Kolon başlığındaki delikler ile bulon gövdeleri arasında belirlenmiş olan “No Separation” (Ayrılmayan) temaslar	131
Şekil B-4 Bulon gövdesinin üst yüzeyi ile somunlar arasında belirlenmiş olan “Bonded” (Bağlı) temaslar	131

Şekil B-5 Alın levhası ile giriş arasında belirlenmiş olan “Bonded” (Bağlı) temas.....	132
Şekil B-6 Kolona “MultiZone” uygulanması	132
Şekil B-7 Kolon gövdesinin on elemana bölünmesinin ayarlanması	133
Şekil B-8 Kolon için “inflation” özelliğın uygulanması.....	133
Şekil B-9 Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temasa uygulanan “Contact Sizing”	134
Şekil B-10 Bulon gövdesi ile kolon başlığındaki delikler arasındaki temaslara uygulanan “Contact Sizing”	134
Şekil B-11 Bir bulona öngerilme kuvvetinin uygulanması	135
Şekil B-12 Giriş üzerindeki yükleme noktasına uygulanan yer değıştirmeler	135

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Takviyesiz alın levhali bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9]	9
Çizelge 2. 2 Takviyeli alın levhali bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9].....	10
Çizelge 2. 3 Alın levhasız bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9].....	11
Çizelge 2. 4 Kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]	12
Çizelge 2. 5 Ek başlık levhali kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]	13
Çizelge 2. 6 Zayıflatılmış giriş enkesiti kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]	14
Çizelge 3. 1 Örnek 1 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı durumları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile parçaların en büyük eş değer gerilme değerleri.....	33
Çizelge 3. 2 Teması modelleyen ara elemanların sıklığının değiştirilmesiyle Örnek 1 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri.....	35
Çizelge 3. 3 Örnek 2 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri	36
Çizelge 3. 4 Teması modelleyen ara elemanların sıklığının değiştirilmesiyle Örnek 2 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri	37
Çizelge 4. 1 Kolon ve giriş kesitinin boyuları (mm) [31].....	40
Çizelge 4. 2 Birleşimlerdeki eleman ve düğüm noktası sayıları.....	44
Çizelge 4. 3 Yüksek mukavemetli bulonun gerilme – şekil değiştirme değerleri [31].....	45
Çizelge 4. 4 Yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması (kN)	46
Çizelge 5. 1 Birleşimlerin sonlu eleman modellerindeki eleman ve düğüm noktası sayıları.....	60
Çizelge 5. 2 Çevrimsel yükleme altında uygulanan yer değiştirme değerleri	63
Çizelge 5. 3 Kullanılan malzemeler ile gerilme ve şekil değiştirme değerleri [32]	64
Çizelge 5. 4 Alın levhali birleşimlerde çevrimsel yükleme altında maksimum moment kapasitesine ulaştıktan sonra, her çevrimde okunan maksimum moment değerleri	77
Çizelge 5. 5 Birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasiteleri	79
Çizelge 5. 6 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri	82

Çizelge 5. 7 Birleşimlerde çevrimsel yükleme altında maksimum moment kapasitesine ulaştıktan sonra, her çevrimde okunan maksimum moment değerleri	95
Çizelge 5. 8 Birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasiteleri	98
Çizelge 5. 9 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri.....	100
Çizelge 5. 10 TALB ve EBLK birleşim örneklerinin moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	103
Çizelge 5. 11 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri	104
Çizelge A-1 HE240B ve IPE270 profillerinin geometrik özellikleri	113

DBYBHY-2007'DEKİ MOMENT AKTARAN ÇELİK BİRLEŞİMLERİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Orkun YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Yüksek süneklik kapasitelerinden dolayı, moment aktaran sünek çelik çerçeve sistemler deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, 1994 Northridge depreminden sonra yapılan incelemeler göstermiştir ki, bu sistemlerin birçok birleşim bölgesinin kaynaklarında ve kaynaklara yakın çelik malzemede bazı gevrek kırılmalar meydana gelmiştir. FEMA (Federal Emergency Management Agency) tarafından kurulan “the SAC Steel Project” adındaki ekip, birleşim detaylarındaki gevrek kırılmaların sebeplerini önlemek ve yeni tavsiyeler üretmek için yoğun bir test programı başlatmıştır. Bu testler sonucunda önerilen birleşim türleri FEMA-350 adlı raporda sunulmuştur. Bu birleşimlerin üçü bulonlu, üçü kaynaklı olmak üzere altı tanesi “DBYBHY - Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik-2007”de de aynen yer almaktadır. DBYBHY-2007’de bulonlu birleşimler; alın levhalı bulonlu, takviyeli alın levhalı bulonlu ve alın levhasız bulonlu birleşim olarak, kaynaklı birleşimler ise, kaynaklı, ek başlık levhalı kaynaklı ve zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim olarak adlandırılmaktadır.

Bu tez kapsamında DBYBHY-2007’de belirtilen moment aktaran çelik kolon – kiriş birleşimlerinin monotonik ve çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizi ile performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Sözü edilen bu birleşimlerin analizini yapmadan önce, sonlu eleman modellerini doğrulamak amacıyla, literatürden deneysel ve sonlu eleman analizi yapılmış iki adet alın levhalı bulonlu birleşimin sonlu eleman analizleri yapılmış ve bu çalışmanın sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada

bulunan sonuçlar ile literatürdeki deneysel ve nümerik sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonlu eleman modellemelerinin doğrulaması yapıldıktan sonra, DBYBHY-2007’de belirtilen birleşimlerin önce modelleme süreci anlatılmış, sonra analizlerden elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan malzeme ve geometri değişimleri dikkate alınmıştır. Birleşimlerdeki bulon, kolon, kiriş gibi parçalar arasındaki temas durumları doğrusal veya doğrusal olmayan olarak dikkate alınmıştır. Sözü edilen birleşimlerden bulonlu ve kaynaklı birleşimler önce kendi aralarında karşılaştırılmış, sonra bu karşılaştırmalardan öne çıkan birleşimler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda, bulonlu birleşimlerden alın levhasız birleşim örneğinin istenmeyen bir kırılma biçimi gösterdiği görülmüştür. Bulonlu birleşimlerden takviyeli alın levhalı birleşimin, kaynaklı birleşimlerden ek başlık levhalı kaynaklı birleşimin plastik mafsallık oluşma noktası, moment taşıma kapasitesi ve rijitlik bakımından diğer birleşimlere göre daha güvenilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: DBYBHY-2007, bulonlu birleşim, kaynaklı birleşim, sonlu eleman analizi, doğrusal olmayan analiz.

ABSTRACT

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MOMENT RESISTING STEEL CONNECTIONS BASED ON DBYBHY-2007

Orkun YILMAZ

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Moment resisting ductile steel frame systems are widely used in seismic zones, due to their high ductility capacity. However, investigations conducted after the 1994 Northridge Earthquake showed that some brittle fracture occurs on weldings of connections and structural steel close to weldings. The SAC Steel Project funded by the FEMA (Federal Emergency Management Agency) has started intensive test program to dispose the causes of brittle fractures, provide solutions and improve connections performance. Recommended connection types have been presented in report entitled FEMA-350. Six connections proposed FEMA-350 including three bolted and three welded ones are even specified in Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones (DBYBHY-2007). Bolted connections are entitled as bolted unstiffened end plate connection, bolted stiffened end plate connection and bolted flange plate connection, while welded connections are entitled as welded unreinforced flange – welded web connection, welded flange plate connection and reduced beam section connection.

This thesis aims to assess the performance of moment resisting steel column – beam connections based on DBYBHY-2007 under monotonic and cyclic loading with finite element analysis. Before analyze mentioned connections, to evaluate the adequacy of numerical analysis to be conducted in this study, experimental and numerical results of two examples from the literature are considered and compared with the results of this

study. It is obtained that the results of this study and the experimental and numerical results in the literature are in good agreement with each other.

After verification of finite element modeling, modeling process of connections based of DBYBHY-2007 and results of analyses are explained. Material and geometry nonlinearities are considered. Contacts between connection parts such as bolt, column and beam are considered as linear and nonlinear. After analyses, first, the mentioned bolted and welded connections are compared between themselves, then one bolted and one welded connections which have better performance than other connections are compared with each other. The results reveal that bolted flange plate connection model shows an invalid failure mode. It is showed that, bolted stiffened end plate connection from bolted ones and welded flange plate connection from welded ones are more reliable than other connections in terms of plastic hinge location, moment capacity and stiffness.

Keywords: DBYBHY-2007, bolted connection, welded connection, finite element analysis, nonlinear analysis.

1.1 Literatür Özeti

Yüksek süneklik kapasitelerinden dolayı, moment aktaran sünek çelik çerçeve sistemler deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Ancak, 1994 Northridge depreminden sonra, bu sistemlerin gösterdikleri performansa duyulan güven bir miktar zedelenmiştir. Depremden sonra yapılan incelemeler göstermiştir ki, birçok birleşim bölgesinin kaynaklarında ve kaynaklara yakın çelik malzemede bazı gevrek kırılmalar meydana gelmiştir [2]-[4]. FEMA (Federal Emergency Management Agency) tarafından kurulan “the SAC Steel Project” adındaki ekip, birleşim detaylarındaki gevrek kırılmaların sebeplerini önlemek ve yeni tavsiyeler üretmek için yoğun bir test programı başlatmıştır [5], [6]. Burada geliştirilmiş olan birleşimler “ANSI/AISC 358-10 (Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications)” [7] isimli standartta ve “FEMA-350 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Building” [8] isimli raporda yer almıştır. Bu birleşimlerin üçü bulonlu, üçü kaynaklı olmak üzere altı tanesi Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY-2007)’de [9] de yer almaktadır. DBYBHY-2007’de bulonlu birleşimler; alın levhalı bulonlu, takviyeli alın levhalı bulonlu ve alın levhasız bulonlu birleşim olarak, kaynaklı birleşimler ise; kaynaklı, ek başlık levhalı kaynaklı ve zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim olarak adlandırılmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, DBYBHY-2007’de belirtilen altı adet moment aktaran çelik kolon – kiriş birleşimlerinin sonlu eleman analizleri yapılacaktır. Literatürde bu birleşim türlerinin sonlu

eleman analizlerini yaparak birbirleriyle kıyaslayan bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca literatürde bu birleşim türlerinden alın levhalı ve kaynaklı birleşim türlerine dair çok fazla deneysel ve nümerik çalışmalara rastlanırken, alın levhasız birleşimler için deneysel ve nümerik çalışmalara çok az rastlanmıştır. Bu tez kapsamında, sözü edilen altı birleşimin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki davranışları sonlu eleman analizleri ile incelenecek ve birbirleriyle karşılaştırılacaktır. Böylelikle, literatürde bu konudaki eksiklik giderilerek mevcut çalışmalara ve ülkemizde çelik birleşimleri için yapılan çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

1.3 Bulgular

DBYBHY-2007 çelik yapılarda kullanılmak üzere altı adet kolon – kiriş birleşimi verilmektedir. Bu birleşimlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları hakkında yapılan bu çalışmada, bulonlu ve kaynaklı birleşimler önce kendi aralarında karşılaştırılacak olup, sonra da bu karşılaştırmalardan öne çıkan birleşimler birbirleriyle kıyaslanacaktır. Birleşimlerin değerlendirilmesinde kullanılacak parametreler şöyle sıralanabilir: Hasar durumları ve plastik mafsall oluşma yerleri, kuvvet ve moment taşıma kapasiteleri, dönme kapasiteleri, enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik ve başlangıç dönme rijitlikleri ve bulonlu birleşimlerde bulonlardaki maksimum gerilmeler. Birleşimlerin DBYBHY-2007’de belirtilen 0,04 radyan görelî kat ötelemesi değerine ulaştıkları görülmüştür. Fakat alın levhasız bulonlu birleşimin istenmeyen bir kırılma biçimi gösterdiği görülmüştür. Bulonlu birleşimlerden takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim örneğinin, plastik mafsall oluşma yeri, moment kapasitesi, rijitlik gibi parametreler göz önüne alındığında, diğer bulonlu birleşimlere göre daha üstün ve güvenilir olduğu görülmüştür. Kaynaklı birleşimlerden ise, ek başlık levhalı kaynaklı birleşimin diğer kaynaklı birleşimlerden daha üstün olduğu görülmüştür.

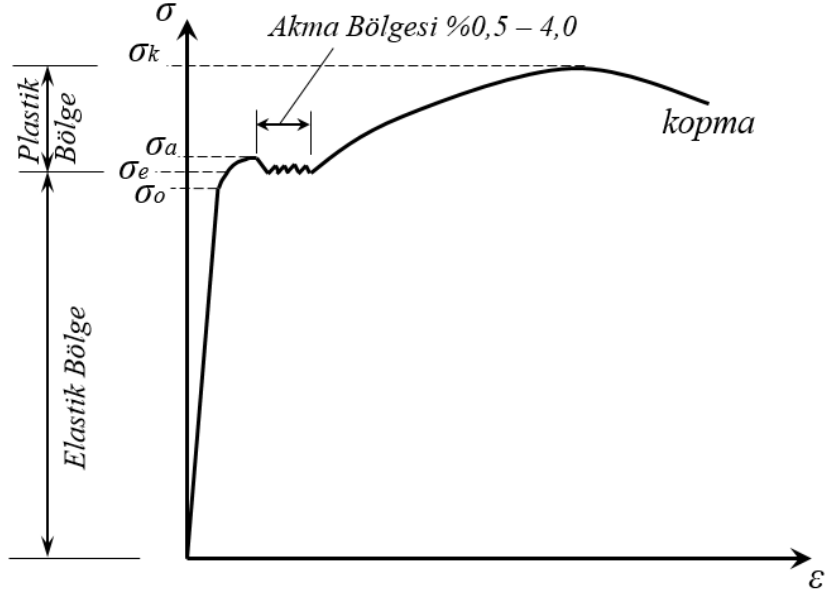
BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1 Çeliğin Mekanik Özellikleri

Çelik, mekanik olarak işlenebilen yani dövülerek, preslenerek, haddeden geçirilerek şekil alabilen demir alaşımdır. Uzun yıllardır bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çelik malzemenin diğer yapı malzemelerine nazaran birçok avantajları vardır. Elastisite modülünün yüksek olması, homojen ve izotrop bir malzeme olması, aynı yükü daha küçük bir kesitle taşıyabilmesi, takviyesinin kolay olması, molozundan istifade edilebilmesi çelik malzemenin üstünlükleri olarak sıralanabilir. Bunların yanında çelik malzemenin dezavantajlı durumları da vardır. Paslanmaya karşı, yangına karşı, asit, baz ve tuza karşı dayanımlarının düşük olması çelik malzemenin dezavantajları olarak söylenebilir [10].

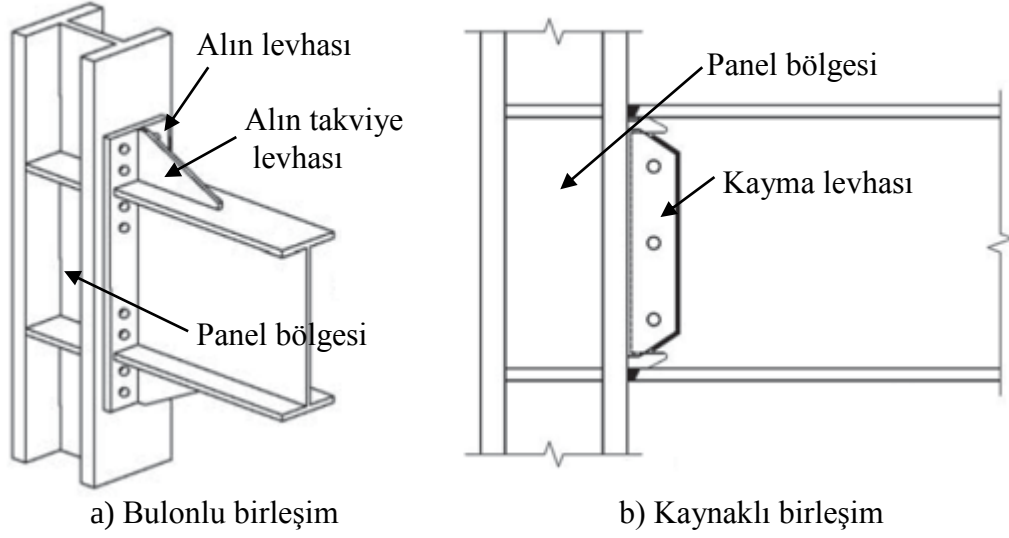
Çelik malzeme kristal bir yapıya sahip olup, izotrop ve homojen bir malzeme yani her yer ve her doğrultuda aynı fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Yapı çeliklerinin mekanik özellikleri çekme deneyi ile tespit edilir. Bir yapı çeliği çekme deneyine tabi tutulduğunda Şekil 2.1’de görülen gerilme – şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Çubuğa etkililen kuvvet arttırıldığında, çelik malzeme orantılı sınır gerilmesine (σ_o) kadar malzeme lineer elastik bir davranış gösterir yani Hooke kanunu geçerlidir. Elastik sınıra kadar (σ_e) malzeme yine elastiktir fakat bu bölgede Hooke kanunu geçerli değildir. Elastik sınır aşıldığında malzeme artık plastikleşir, akma sınırına (σ_a) geldiğinde malzemede akma görülür ve büyük plastik deformasyona uğrar. Sonrasında malzeme kopma gerilmesine (σ_k) ulaşıncaya kadar kopar [10].



Şekil 2. 1 Yapı çeliğinin çekme deneyine tabi tutulmasından elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisi

2.2 Kolon – Kiriş Birleşimleri

Çeliğin yapılarda kullanılması ile çelik profillerin birbirine bağlantısı için birleştirme vasıtaları gerekli olmaktadır. Çelik yapılarda kullanılan birleştirme vasıtaları perçin, bulon ve kaynaktır. Günümüzde perçin hemen hemen hiç kullanılmamaktadır. Bulonlu ve kaynaklı kolon – kiriş birleşimleri için günümüze kadar farklı türde birleşim çeşitleri sunulmuştur. Kolon – kiriş birleşimleri için çeşitli araştırmalar yapılmış olup, yönetmelikler hazırlanmıştır. EN 1993-1-8 (Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-8) [11], ANSI/AISC 358-10 (Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications) [7] ve FEMA-350 (Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings) [8] kolon – kiriş birleşimleri için hazırlanan yönetmeliklere örnek gösterilebilir. Şekil 2.2’de bulonlu ve kaynaklı kolon – kiriş birleşimlere örnek gösterilmiş ve birleşimdeki parçaların isimleri belirtilmiştir.

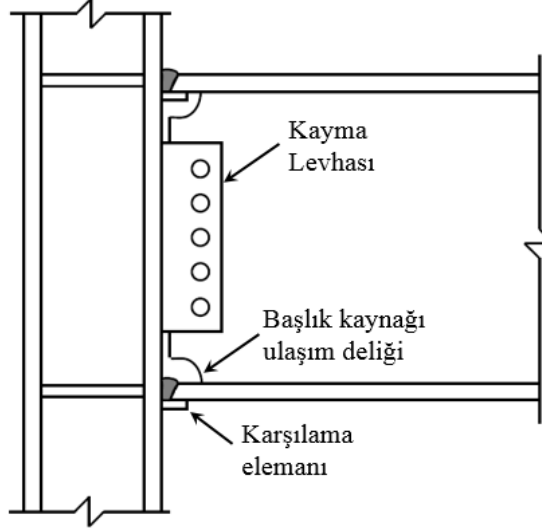


Şekil 2.2 Bulonlu ve kaynaklı kolon – kiriş birleşimlerine örnekler [7]

2.3 Northridge Öncesi Birleşimler

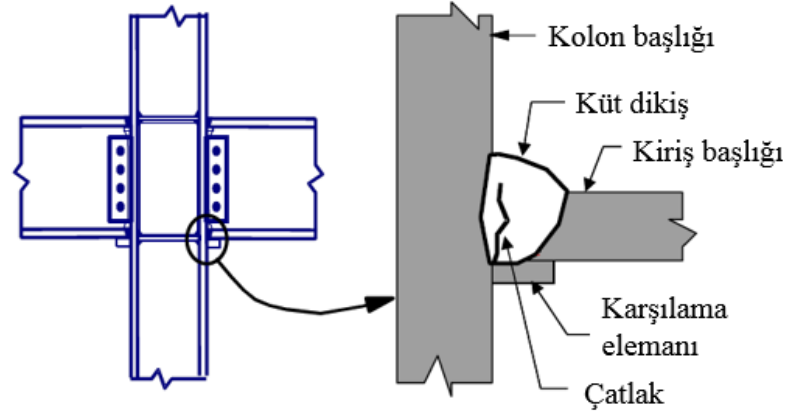
Depreme dayanıklı yapıların sünek ve yüksek dayanımlı olması istenir. Moment aktaran çelik çerçeve sistemler, yüksek süneklik kapasitelerinden dolayı deprem bölgelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [1] Ancak, yapı malzemesi olarak çeliğin yaygın olarak kullanıldığı Amerika Birleşik Devletleri'nde meydana gelen 1994 Kaliforniya Northridge depreminden sonra yapılan incelemelerde, bu sistemlerin gösterdikleri performansa duyulan güven bir miktar zedelenmiştir. Depremi hemen sonrasında yapılan incelemelerde, çelik yapılarda önemli bir hasar oluşmadığı görülmüştür. Fakat yangın izolasyonu ve mimari detaylar sebebiyle gizlenen birleşimler incelendiğinde, durumun bu şekilde olmadığı anlaşılmıştır. Yapılan incelemelere göre, birleşim bölgesinin kaynaklarında ve kaynaklara yakın çelik malzemede bazı gevrek kırılmalar meydana gelmiştir. Bu depremde hasar gören rijit çelik çerçeveli binalar, sınırlı miktarda yapısal hasar görmüş ve göçmemişlerdir, yani yapı şartnamelerinin temel tasarım gereksinimlerini karşılamışlardır. Fakat gösterdikleri gevrek kırılmalardan dolayı, öngörüldüğü şekilde davranış gösterememişlerdir [2]-[4].

Şekil 2.3'te 1994 Northridge depremine kadar çelik yapılarda çok yaygın olarak kullanılan kolon – kiriş birleşim detayı görülmektedir. Bu birleşimlerde kiriş başlıkları kolon başlığına küt kaynak ile bağlanırken, kiriş gövdesi ile kolon başlığı bağlantısında kayma levhası kullanılmaktadır. Kiriş gövdesi ile levha bulonlu veya perçinli olarak birleştirilirken, levha ile kolon başlığı kaynak ile birleştirilmektedir.

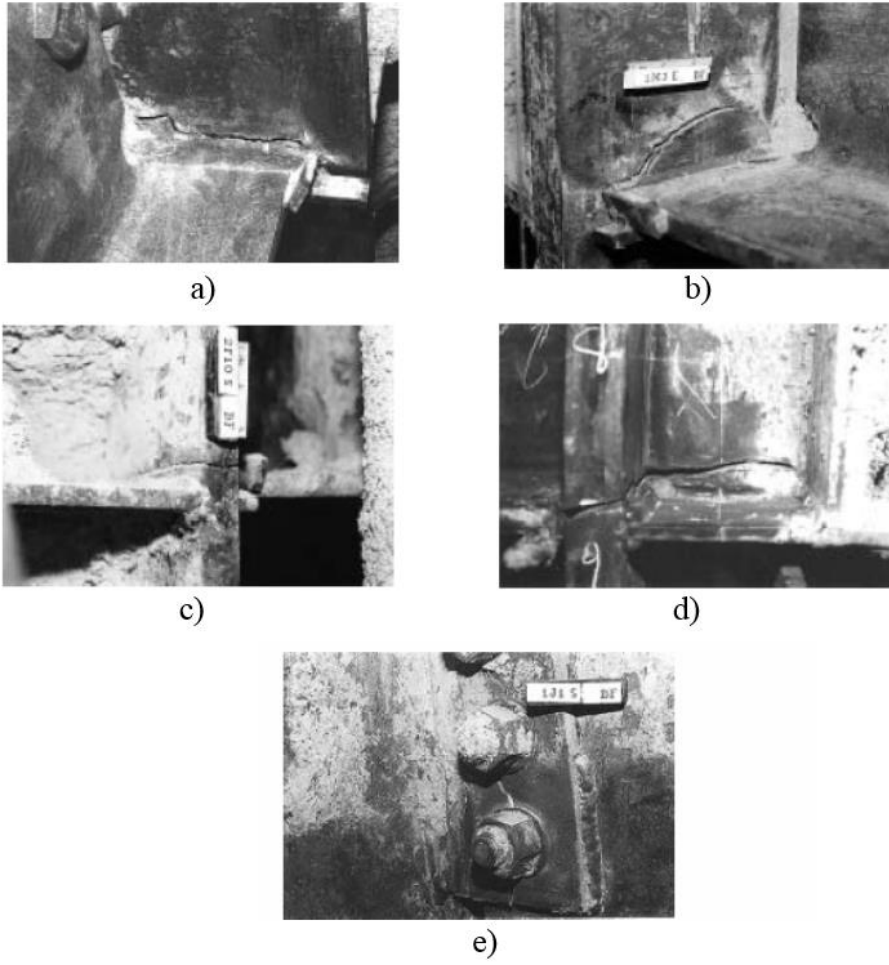


Şekil 2. 3 Northridge öncesi sık kullanılan birleşim detayı [8]

Bu birleşimlerde, kiriş üst başlığına kaynak tam olarak yapılabilirken, alt başlığına kiriş gövdesinden dolayı kaynak tamamen yapılamamaktadır. Kiriş alt başlığını kolon başlığına bağlayan küt dikişlerin uygulanması sırasında her bir kaynak pasosu kiriş gövdesi nedeniyle bölünmektedir. Bu durumda kiriş gövdesi her bir pasonun başlangıç ya da bitiş noktası olmaktadır. Ayrıca, küt kaynakların uygulanması sırasında kaynakların altında bulunan karşılama levhası kaynak işlemi tamamlandıktan sonra yerinde bırakılmaktadır. Karşılama levhası ile kolon başlığı arasında bulunan kaynaklanmamış bölge bir süreksizlik oluşturmaktadır. Bu da o bölgede gerilmelerin artmasına ve yeni çatlakların oluşumuna neden olabilmektedir. Şekil 2.4'te bu birleşim şeklinde 1994 Northridge depreminden sonra yapılan incelemelerde sık karşılaşılan kırılma biçimi verilmiştir. Burada, kiriş alt başlığı ile kolon başlığı arasındaki tam penetrasyonlu küt kaynak beklenmeyen bir davranış göstererek, gevrek bir şekilde çatlamaya başlamış ve bu çatlakların başladıktan sonra Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, çok farklı yollar izleyerek genişleyip, yayılabildikleri tespit edilmiştir [8].



Şekil 2. 4 Northridge depreminde sık karşılaşılan kırılma biçimi [8]



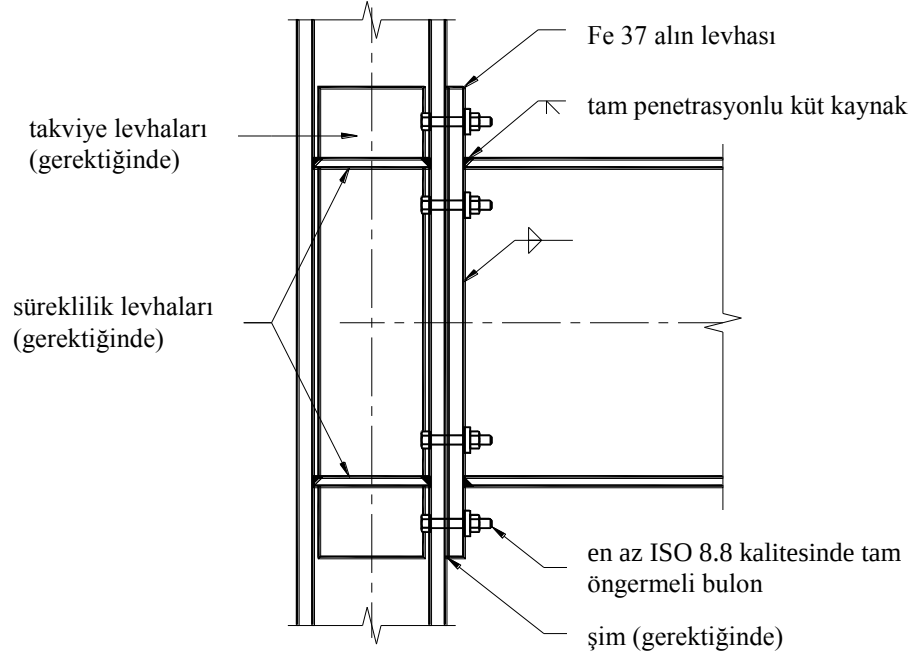
Şekil 2. 5 Northridge depremi sonrasında kiriş-kolon birleşimlerinde gözlemlenen kırılma çeşitleri [8]

2.4 Northridge Sonrası Birleşimler

Yüksek süneklik kapasitelerine rağmen moment aktaran çelik çerçeve sistemlerde görülen beklenmeyen gevrek kırılmalar, bu sistemlerin davranışları konusunda yapılan çalışmaları arttırmıştır. FEMA (Federal Emergency Management Agency) tarafından kurulan “the SAC Steel Project” adındaki ekip, birleşim detaylarındaki gevrek kırılmaların sebeplerini önlemek ve yeni tavsiyeler üretmek için yoğun bir test programı başlatmıştır. Bu çalışmalarda birleşimi güçlendirmek adına, plastik mafsallı oluşan bölgenin birleşim bölgesinden uzaklaştırılarak, kolon – kiriş birleşiminde kiriş başlığında oluşan gerilmelerin azaltılması ve deformasyonların kontrol altında tutulması amaçlanmıştır [5], [6]. Ayrıca, kiriş başlığı ile kolon başlığını birbirine bağlayan küt kaynakların alt başlığa daha iyi uygulanabilmesi için, kaynak ulaşım deliğinin boyutları ve geometrisi konusunda da araştırmalar yapılmıştır [4], [12]. Burada geliştirilmiş olan birleşimler “ANSI/AISC 358-10 (Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications)” [7] isimli standartta ve “FEMA-350 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Building” [8] isimli raporda yer almıştır. Bu birleşimlerin üçü bulonlu, üçü kaynaklı olmak üzere altı tanesi “DBYBHY - Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik-2007”de [9] de aynen yer almaktadır. Bu birleşimler DBYBHY-2007’de şu şekilde belirtilmektedir:

- Takviyesiz alın levhalı bulonlu,
- Takviyeli alın levhalı bulonlu,
- Alın levhasız bulonlu,
- Kaynaklı,
- Ek başlık levhalı kaynaklı,
- Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı kolon-kiriş birleşimi.

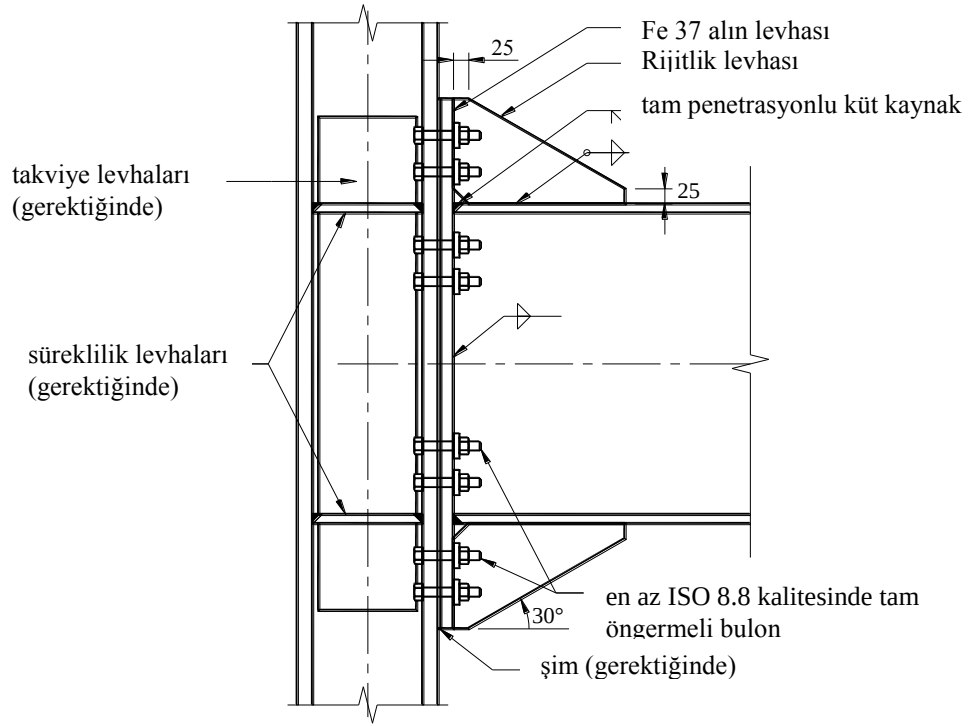
Bu birleşimler Şekil 2.6-2.11’de gösterilmiştir ve süneklik düzeyi yüksek çerçevelerin moment aktaran kolon – kiriş birleşimlerinde kullanılabilmesi için uygulama sınırları Çizelge 2.1-2.6’da verilmiştir.



Şekil 2. 6 Takviyesiz alın levhalı bulonlu birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 1 Takviyesiz alın levhalı bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9]

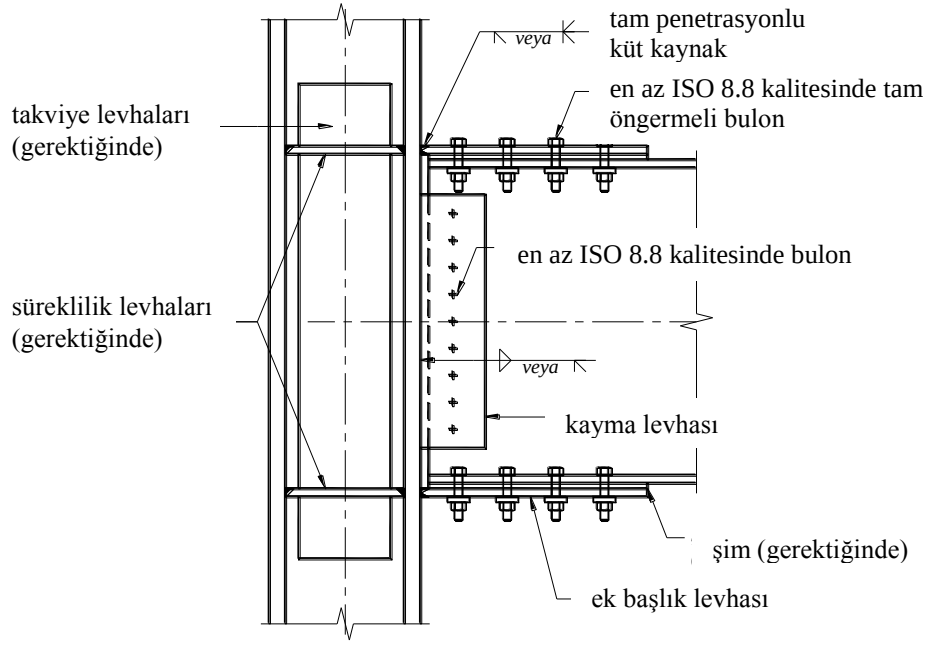
Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 750 mm
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 20 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Bulon sınıfı	8.8 veya 10.9
Bulon öngerme koşulları	Tam öngerme
Alın levhası malzeme sınıfı	Fe 37
Başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak



Şekil 2. 7 Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 2 Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9]

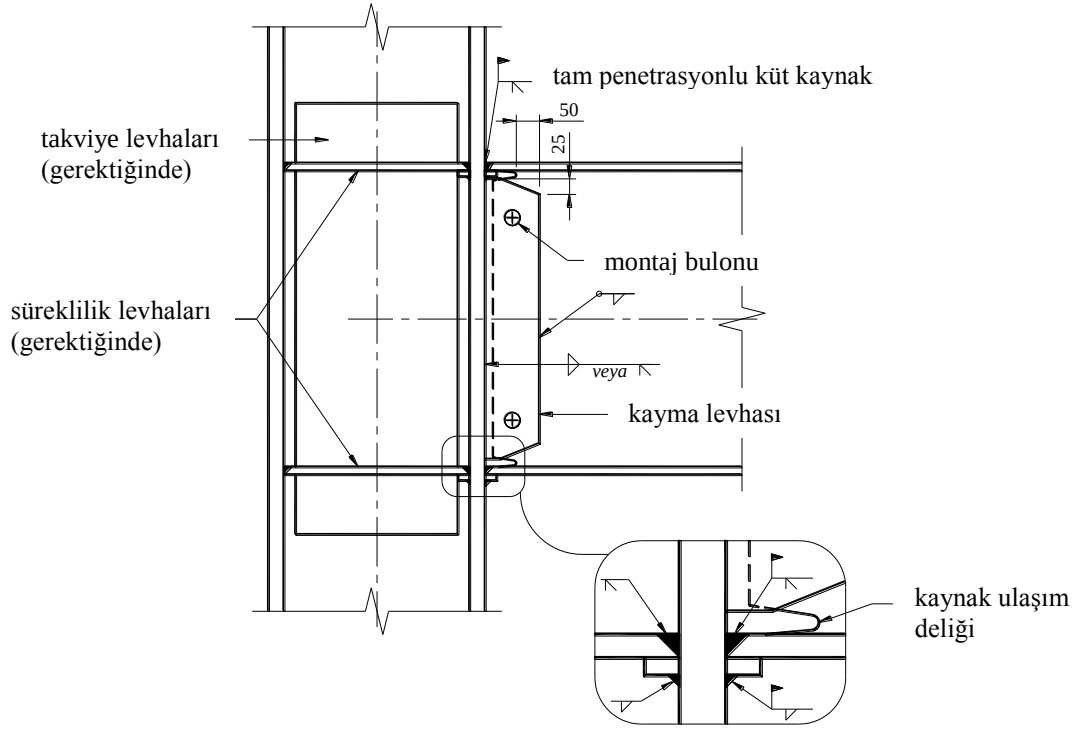
Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 1000 mm
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 25 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Bulon sınıfı	8.8 veya 10.9
Bulon öngerme koşulları	Tam öngerme
Alın levhası malzeme sınıfı	Fe 37
Başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak



Şekil 2. 8 Alın levhalısız bulonlu birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 3 Alın levhasız bulonlu birleşimin uygulama sınırları [9]

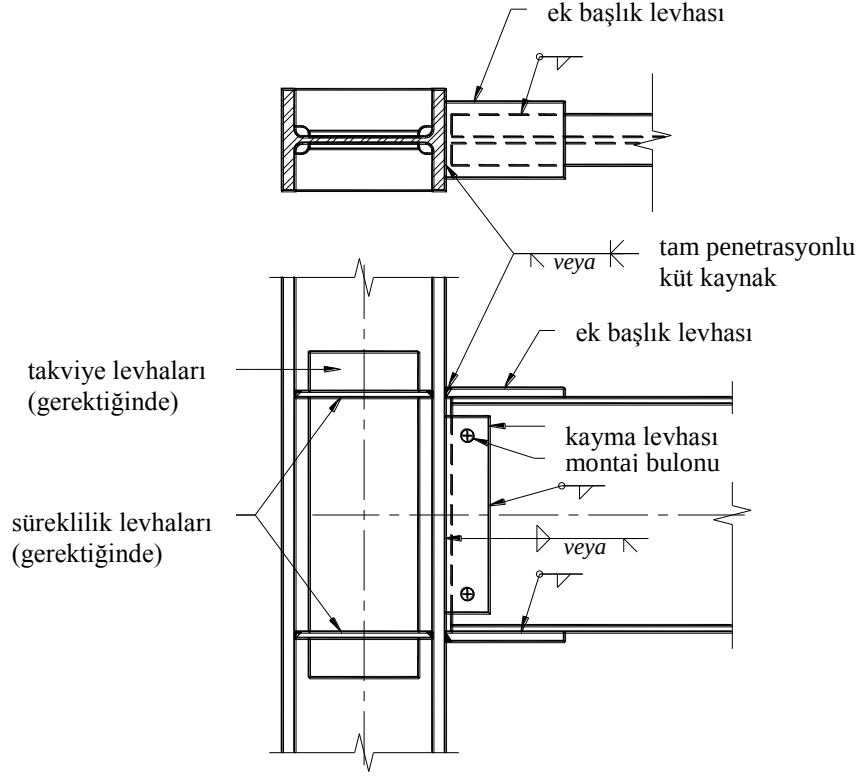
Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 800 mm
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 8
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 20 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Bulon sınıfı	8.8 veya 10.9
En büyük bulon boyutu	M 30
Başlık levhası bulonlarının öngerme koşulları	Tam öngerme
Ek başlık levhası malzeme sınıfı	Fe 37, Fe 52
Ek başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak



Şekil 2. 9 Kaynaklı birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 4 Kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]

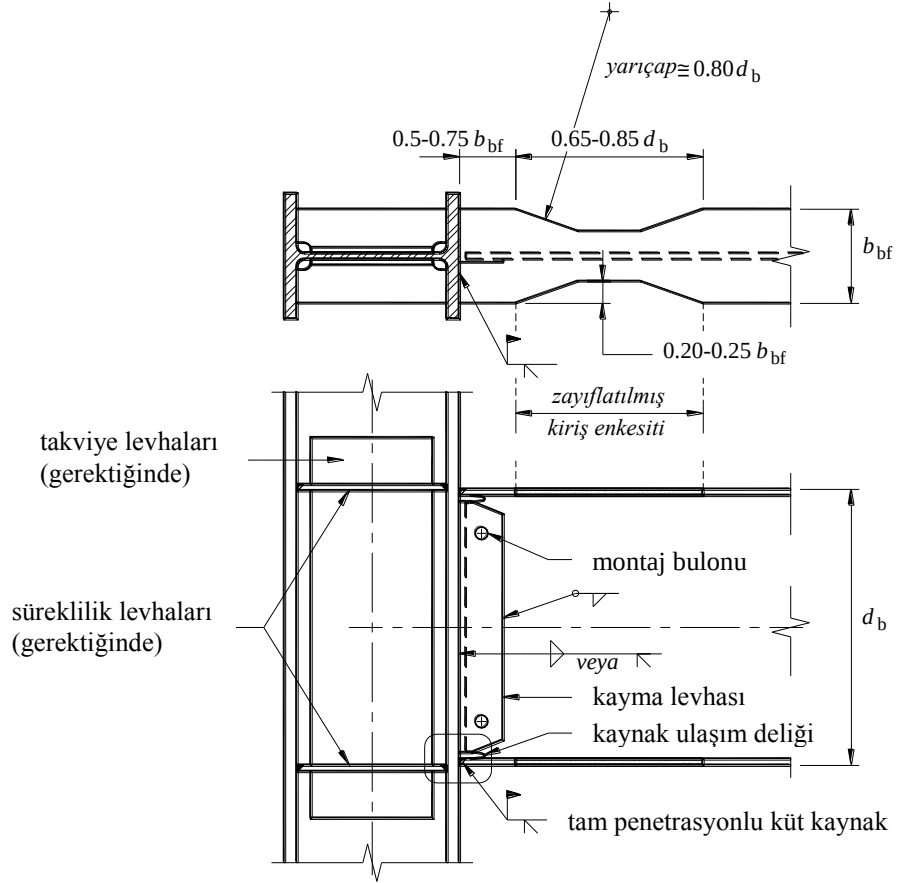
Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 1000 mm
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 25 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Kaynak ulaşım deliği	gerekli
Başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak



Şekil 2. 10 Ek başlık levhalı kaynaklı birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 5 Ek başlık levhalı kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]

Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 1000 mm
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 25 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Ek başlık levhası malzeme sınıfı	Fe 52
Ek başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak



Şekil 2. 11 Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşim detayı [9]

Çizelge 2. 6 Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşimin uygulama sınırları [9]

Birleşim Detayı Parametreleri	Uygulama Sınırları
Kiriş enkesit yüksekliği	≤ 1000 mm
Kiriş birim boy ağırlığı	≤ 450 kg/m
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7
Kiriş başlık kalınlığı	≤ 45 mm
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 600 mm
Kaynak ulaşım deliği	gerekli
Ek başlık levhası kaynağı	Tam penetrasyonlu küt kaynak

2.5 Plastik Mafsal Kavramı ve Enerji Tüketme

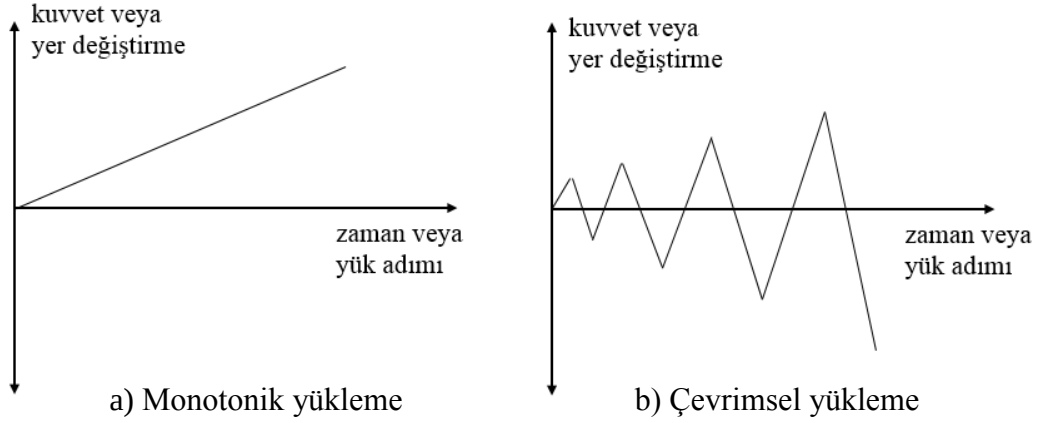
Bu birleşimlerin boyutlandırma yaklaşımında elastik ötesi yani plastik davranışa izin vermesi amaçlanmaktadır. Deprem hareketinin enerjisi bu plastik deformasyonla harcanır. Bu plastik deformasyonun yeterli süneklığe sahip taşıyıcı elemanların belli kesitlerinde yoğunlaşmasıyla plastik mafsal ortaya çıkmaktadır. Yapılarda plastik mafsalın öncelikle kirişlerde oluşması, en son kolonlarda oluşması istenir. Plastik mafsalın kirişte ya da kolonda meydana gelmesi ile oluşan yıkılma mekanizmaları birbirinden farklıdır. Plastik mafsalların kirişte oluşması, yumuşak kat mekanizmasını önler, binanın göçmesi için meydana gelmesi gereken plastik mafsal sayısını artırır. Yani kirişte meydana gelen mafsallaşma ile yapının yıkılması için daha çok sayıda mafsal gerekir. Buna karşılık, kolonda meydana gelen mafsallaşma ile yapının yıkılması daha az sayıda mafsal oluşması ile gerçekleşebilir. Plastik mafsalların kirişte meydana gelmesi ile yapının yıkılması için daha fazla mafsallaşma gerektiği için, yapı daha fazla deprem enerjisi sarf eder [13].

Deprem sırasında, depremden dolayı yapıya yüklenen enerji yapı içerisinde sönümlenir. Bu da yapının belirli bölgelerinde sünek davranış gösteren plastik deformasyonlarda olur. Süneklik, yapının enerji tüketme kapasitesinin bir ölçüsü olup, yapının yük taşıma kapasitesinde önemli ölçüde kayıp olmadan büyük şekil değiştirmeler yapabilmesidir. Plastik deformasyon sırasında tüketilen enerji, kuvvet – yer değiştirme eğrisinin elastik olmayan bölgelerinde kalan alan ile yani, plastik kuvvet ile plastik deformasyonun çarpımı ile elde edilir. Bu enerji histerik enerji olarak adlandırılır ve geri dönüşü olmayan, sarf edilmiş enerjidir [13].

2.6 Kolon – Kiriş Birleşimleri İçin Yapılan Bazı Çalışmalar

Çelik yapılarda kullanılan kolon – kiriş birleşimleri için çok fazla sayıda deneysel, sayısal ve analitik incelemeler yapılmıştır. Bu bölümde yakın zamanda (yaklaşık 10 - 15 yıl öncesine kadar) tez kapsamında analizleri yapılacak olan birleşimler için yapılan bazı çalışmalar özetlenmektedir. Bazı araştırmacılar deneysel veya sonlu eleman analizleri ile çalışma yaparken, bazı araştırmacılar da her ikisini tercih etmişlerdir. Birleşimlere uygulanan dış etki bakımından monotonik veya çevrimsel yüklemeyi tercih edenler gibi ikisini de tercih edenler de vardır. Monotonik yüklemelerde kiriş ucuna sadece bir yönde kuvvet uygulanırken, çevrimsel yüklemelerde ise kiriş ucuna periyodik olarak tekrarlanan

ve genellikle değeri gittikçe artan yer değiştirmeler uygulanmaktadır. Örnek bir monotonik ve çevrimsel yükleme Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 12 Monotonik ve çevrimsel yükleme örneği

2.6.1 Bulonlu Birleşimler İçin Yapılan Bazı Çalışmalar

Tsai ve Popov [14] üç adet alın levhali birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. İlk numune dört bulon sıralı ve takviyesiz olarak üretilmiş olup, bu numunenin bulonda kırılma ile göçtüğü görülmüştür. Sonrasında, ikinci numunede takviye levhası kullanılmış, üçüncü numunede ise daha yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Analizler sonucunda takviye levhalarının bulonlardaki kuvvet dağılımını iyileştirdiği, daha yüksek dayanımlı bulon kullanılmadan da bulondaki kırılmaların önlenebileceği görülmüştür.

Bahaari ve Sherbourne alın levhali birleşimlerin monotonik yükleme altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır [15], [16], [17], [18]. Çalışmalarında birleşimdeki alın levhası kalınlığının etkisini incelemiş olup, birleşimin toplam dönme değerine etki eden parametreler araştırılmıştır. İnce alın levhali birleşimlerde birleşimin toplam dönme değerine alın levhasının katkısı yaklaşık %60-70 iken, kalın alın levhali birleşimlerde bu oranın azaldığı görülmüştür [15]. Diğer çalışmalarında ise bu birleşimlerin bulonlarına öngerilme uygulanmış ve bunun etkisi araştırılırken [16], bir diğer çalışmalarında da kolon gövdesinde süreklilik levhali olmayan birleşimlerin analizi yapılarak bu levhaların etkisi incelenmiştir [17]. Sonrasında da sekiz bulon sıralı birleşimlerin analizlerini yapmışlardır [18].

Adey yüksek lisans tezinde [19], onbeş adet alın levhali birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmıştır. Analizlerinde kiriş boyutları, bulon yerleşimi, alın

levhası kalınlığı, kaynak tekniğı ve takviye levhasının bulunması parametrelerini değıştirmiş ve bunların etkisini incelemiştir. Ryan ise yüksek lisans tezinde [20] yine buna benzer bir çalışma yapmış ve kendi deneysel sonuçlarını sonlu eleman analizleriyle de desteklenmiştir.

Yorgun [21] üç farklı alın levhalı birleşim hazırlamış ve çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmıştır. Hazırlanan ilk birleşim geleneksel olarak hazırlanan alın levhalı birleşim iken, ikinci ve üçüncü birleşimlerde alın levhası ile kolon başlığı arasında kiriş profilinden kesilmiş bir I profili bulunmaktadır. Yeni yaklaşıma göre hazırlanan birleşimlerin daha fazla moment taşıdığı ve dönme kapasitelerinin daha fazla olduğı görölmüştür. Ayrıca bu birleşimlerde alın levhasının dönme kapasitesine olan katkısının daha fazla olduğı görölmüştür. Yorgun ve Bayramoğlu [22] benzer bir çalışmayı iki farklı alın levhalı birleşim için sunmuşlardır.

Sumner ve Murray [23] SAC Steel Project kapsamında alın levhalı birleşimlerin deneysel olarak çevrimsel yükleme altındaki analizlerini yapmışlardır. Takviyeli ve takviyesiz alın levhalı birleşimlerin deprem bölgelerinde kullanılabilecek uygun birleşim şekillerinden olduğı açıklanmıştır. Birleşimin kiriş başlıkları ve gövdesinde burkulma ile göçmesi için alın levhasının kirişten güçlü olması yani, kalın alın levhası kullanılması gerektiğini açıklamışlardır. Ayrıca, bulon malzemesi olarak ASTM A325 ya da A490 kullanmanın sistemin davranışını değıştirmediği görölmüştür. Sonrasında Sumner doktora tezinde [24] bu çalışmalarına sonlu eleman analizleri de ekleyerek bu birleşimler için yeni tasarım bağıntıları üzerinde çalışmıştır.

Schneider ve Teeraparbwong [25] sekiz adet bulonlu başlık levhalı (alın levhasız) birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Burada kolon ve kiriş profilleri, bulon malzemesi ve bulon sayısı etkisini incelemişlerdir. Her bir birleşimin yırtılma mekanizması ve moment – plastik dönme eğrileri elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bütün birleşimlerin en az %3 plastik dönme kapasitesine sahip oldukları görölmüştür.

Coelho vd. [26] sekiz adet alın levhalı birleşimin monotonik yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Alın levhası kalınlığı ve alın levhası elik sınıfının değışimini incelemişlerdir. Birleşimin moment kapasitesinin alın levhası kalınlığı ve akma gerilmesinin artmasıyla arttığı görölmüş fakat başlangıç dönme rijitliklerine çok fazla etki etmediğı görölmüştür.

Maggi vd. [27] altı adet alın levhalı bulonlu birleşimin monotonik yükleme altında sonlu eleman analizini yapmışlardır. Çalışmada alın levhası kalınlığı ve bulon çaplarını değiştirerek bu parametrelerin etkisini incelemişlerdir.

Shi vd. [28] beş adet alın levhalı birleşimin monotonik yükleme altında deneysel analizini yapmış ve buradan alın levhalı birleşimler için teorik olarak moment – dönme ilişkisini veren bağıntı geliştirmişlerdir.

Guo vd. [29] altı adet alın levhalı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Çalışmada alın levhası kalınlığı, takviye levhası ve süreklilik levhasının etkileri incelenmiştir. Takviye levhalarına sahip birleşimlerin daha fazla kuvvet taşıdığı ve enerji dağıtma kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmüştür.

Shi vd. [30] sekiz adet alın levhalı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Bu çalışmada alın levhası kalınlığı, bulon çapı, takviye levhası olması, süreklilik levhası olması ve alın levhası tipi (uzun, kısa) parametrelerini incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda, uzun alın levhası (kiriş başlıklarından taşan) kullanılmasını önermişlerdir. Sonraki çalışmalarında [31], aynı birleşimlerin monotonik yükleme altında hem deneysel hem de sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Her iki analizden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır.

Gerami vd. [32] alın levhalı ve T kesitli birleşimlerde bulon yerleşiminin etkisini çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizi ile incelemişlerdir. Her iki birleşimden beşer tane model hazırlamış olup, bulonların yatay ve düşey mesafelerinin değişmesinin sisteme olan etkisi üzerinde durulmuştur. Bu mesafelerin değişmesinin moment kapasitesine fazla bir etkisi olmamakla birlikte, sistemin çevrimsel yüklemeye elde edilen histerik eğrisine etki ettiği görülmüştür.

Mashaly vd. [33] alın levhalı birleşimler üzerinde monotonik ve çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizi ile parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada incelemiş oldukları parametreler kiriş, kolon, alın levhası, kolon gövdesi takviye levhası, süreklilik levhası, alın takviye levhası boyutları ile bulon çapı ve düzeni, çelik malzeme sınıfı ve bulon sınıfı ile farklı yükleme durumları olarak sıralanabilir. Diğer bir çalışmalarında da [34] bulonu modellemek için yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Bulon gövdesini modellemek için çubuk elemanlar, bulon başı ve somun için ise kabuk elemanlar kullanılmasını önermişlerdir.

Hatipoğlu [35] yüksek lisans tezinde alın levhalı bulonlu birleşimlerin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmıştır. Burada hazırlanan ilk numunede alın takviye levhası mevcutken, diğerlerinde bu levha koyulmadan, kiriş enkesitinde zayıflatılmaya gidilmiştir.

Eldemerdash vd. [36] alın levhalı birleşimlerin monotonik yükleme altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Alın levhalı birleşimlerdeki bulonların kuvvet dağılımını iyileştirme amacıyla kolon başlığı ile alın levhası arasına ince levhalar yerleştirmişlerdir. Analiz sonucunda basınç bölgesindeki bazı bulonların taşıdığı kuvvet değerinde azalma görülmüştür. Birleşimlerde bulonda hasar oluşmasını engelleyebilmek için bir çözüm olduğu söylenmektedir.

Baei vd. [37] alın levhalı birleşimlerin monotonik yükleme ile kirişin eksenel kuvvete de maruz kalması durumunu sonlu eleman analizi ile incelemiştir. Kirişe eksenel yük olarak basınç ve çekme durumlarını ayrı olarak uygulamışlar ve kirişte çekme kuvveti olmasının birleşimin moment kapasitesini azalttığı görülmüştür. Basınç kuvvetinin ise, moment kapasitesini arttırdığı fakat kirişte burkulmaları arttırarak birleşimin göçme mekanizmasına daha erken ulaşmasını sağladığı görülmüştür.

Abidelah vd. [38] sekiz adet alın levhalı birleşimin monotonik yükleme altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Alın takviye levhasının birleşimin moment kapasitesini arttırdığı fakat birleşimin sünekliliğini azalttığı görülmüştür.

Dessouki vd. [39] alın levhalı birleşimleri parametrik olarak incelemek için monotonik yükleme altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada incelenen parametre değişimleri kiriş derinliği, alın levhası kalınlığı, bulon çapı, bulonların birbirlerine ve kiriş başlığına uzaklıkları, alın takviye levhası olup olmaması olarak sıralanabilir. Analizler sonucunda alın levhasındaki gerilme dağılımları incelenmiş ve her bir durumdaki yırtılma çizgisi incelenmiştir. Bunun sonucunda yeni tasarım denklemleri ortaya sunulmuştur.

Wang vd. [40] alın levhalı birleşimler ile kaynaklı birleşimlerin çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. İmalatında özen gösterildiği takdirde, kaynaklı birleşim ile alın levhalı birleşimin yaklaşık olarak aynı moment kapasitesinde olduğunu söylemişlerdir.

Ismail vd. [41] alın levhalı birleşimlerde alın levhası kalınlığı, bulon çapı, kolonda süreklilik levhası olup olmaması, alın takviye levhasının açısı değişimlerini incelemek için [31]'de verilen modellemelerden faydalanılmıştır. Aynı modellemeleri [31] kullanarak Shaker ve Abd Elrahman [42] benzer parametreleri araştırmışlardır.

Taufik [43] alın levhalı birleşimlerin monotonik yükleme altında sonlu eleman analizini yapmıştır. Alın levhası kalınlığının artmasının ve daha yüksek dayanımlı malzeme kullanmanın birleşimin moment kapasitesini ve dönme rijitliğini arttırdığını belirtmiştir.

Saberi vd. [44] alın levhalı ve T kesitli birleşimlerde levha kalınlıklarının değişimini çevrimsel yükleme altında sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir. Toplamda yedi adet analiz yapılmış olup, üç tanesi T kesitli, üç tanesi takviyesiz alın levhalı ve bir tanesi de takviyeli alın levhalı birleşimdir. Yapılan çalışma sonucunda, T kesitli birleşimlerin levha kalınlığı değişimine daha hassas oldukları görülmüştür. Her iki birleşim türünde de levha kalınlığının azalmasıyla, maksimum momente daha yüksek dönme değerlerinde ulaşıldığı görülmüştür.

Prinz vd. [45] altı adet alın levhalı birleşimin monotonik yükleme altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Kolonda süreklilik levhaları kullanmadan bulonlarla birleşimi güçlendirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için, kolon başlığında kolon gövdesinin her iki tarafında iki sıra bulon kullanmışlardır.

Yılmaz ve Bekiroğlu [46] alın levhalı birleşimlerde malzeme değişimini incelemek için iki tanesi [31]'de verilen modellemelerden olmak üzere üç adet birleşimin iki farklı malzeme özellikleriyle monotonik yükleme altında sonlu eleman analizini yapmışlardır. Birleşimde kullanılan çeliğin akma ve kopma gerilmelerinin artmasının moment kapasitesini arttırdığı, fakat başlangıç dönme rijitliklerini değiştirmedeği görülmüştür.

2.6.2 Kaynaklı Birleşimler İçin Yapılan Bazı Çalışmalar

Han vd. [1] Northridge depremi sonrası hazırlanan kaynaklı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Üç farklı panel bölgesi dayanımı için analizler yapılmış olup, bunun değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak, farklı panel bölgesi dayanımları için analitik bir denklem geliştirilmiştir.

Hedayat ve Celikag [2] gövdede bulonlu kaynaklı birleşimler için yeni tasarım önerileri geliştirmişlerdir. Plastik mafsallı oluşumunu kolon yüzünden uzaklaştırmak için giriş gövdesine iki adet delik açılmış ve bu deliklerin farklı geometrileri hakkında sonlu

eleman analizleri yapılmıştır. Bu deliklerin geometrileri ile ilgili parametrik bir çalışma yapılmış olup, sonrasında tasarım adımları için denklemler geliştirilmiştir.

Ricles vd. [4] Northridge sonrası kaynaklı birleşimlerin çevrimsel yükleme altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Çalışmada kaynak ulaşım deliği geometrisi ve kayma levhası bağlantısı üzerinde çalışmış olup, şu anda yönetmeliklerdeki kaynak ulaşım deliği önerilmiştir. Ayrıca, kayma levhasının bağlantısı için de kolon başlığına küt kaynaklı, kiriş gövdesine köşe kaynaklı bağlantı önerilmektedir. Sonrasında bu konudaki çalışmalarını sürdürmüşlerdir [47].

Stojadinovic vd. [48] Northridge öncesi ve sonrası gövdeden bulonlu kaynaklı birleşimlerin çevrimsel yükleme altında deneysel analizlerini yapmışlardır. Northridge öncesi birleşimlerin pratikte plastik dönme kapasitesine sahip olmadıkları ve gevrek kırılma ile göçme mekanizmalarına ulaştıkları görülürken, Northridge sonrasında geliştirilen birleşimlerin analizlerinde ortalama 0,015 rad plastik dönme kapasitesi elde edilmiştir.

Chen vd. [49] iki adet gövdeden bulonlu kaynaklı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre her iki birleşim de kaynak ulaşım deliğinden başlayan çatlaklarla gevrek kırılma göstermiştir. Bu gevrek kırılmaların sebeplerini anlamak için bu birleşimlerin sonlu eleman analizleri yapılmış ve kaynak ulaşım deliğinde gerilme yoğunluğunun çok fazla olduğu görülmüştür. Bunu önlemek için bu birleşimlerde kiriş başlıklarına takviye levhası eklenmiş ve bu levhaların kaynak ulaşım deliğinde meydana gelen gerilme yoğunluğunu ve böylece gevrek kırılmayı önlediği görülmüştür.

Pachoumis vd. [50] iki adet zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı birleşimi farklı zayıflatma durumları bakımından incelemişlerdir. Çalışmalarını hem deneysel hem de sonlu eleman analizleri ile çevrimsel yükleme altında yapmışlardır.

Gholami vd. [51] ek başlık levhalı birleşimlerin çevrimsel yükleme altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Üç farklı birleşim hazırlayıp, ek başlık levhasının uzunluğu ve bu levhada alın dikişi olup olmaması durumlarını incelemişlerdir. Alın dikişinin yan dikişlerdeki plastik şekil değiştirmeyi azalttığı görülürken, ek başlık levhasının uzunluğunun artmasının taşınan moment değerini arttırdığı fakat plastik mafsallarda oluşan bölgedeki şekil değiştirmeleri de arttırdığını, böylece bu bölgede kırılmalara yol açabileceğini belirtmişlerdir.

Nia vd. [52] kutu kesitli kolona sahip kaynaklı birleşimlerin deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Analizler çevrimsel yükleme altında yapılmış olup, 0,04 radyan dönmeye kadar dayanımlarında bir azalma olmadığı görülmüştür.

Han vd. [53] dört farklı kaynaklı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Bu çalışmada kiriş derinliği ve panel bölgesinin rijitliğini incelemişlerdir. Derinliği fazla olan kirişlerin istenen performansı gösteremedikleri, yeterli plastik dönme kapasitelerine ulaşamadıkları görülmüştür.

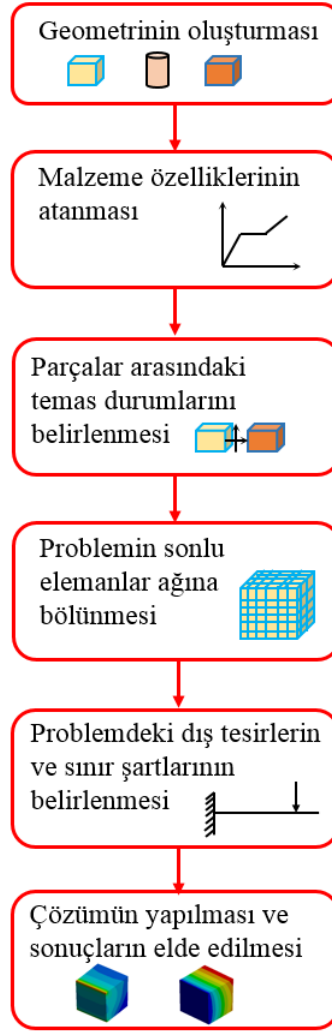
Literatürde yapılan bu çalışmalara bakıldığında, alın levhali bulonlu birleşimlerin deneysel ve sonlu eleman analizlerine sıklıkla rastlanılmaktadır. Bu birleşimler için bulon çapı, alın levhası kalınlığı gibi parametrelerin değişimini inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Bunun yanında bulonlu birleşimlerden alın levhasız bulonlu birleşimler hakkında yapılan çalışmaların sayısı çok kısıtlıdır. Kaynaklı birleşimlerden ise, çok fazla deneysel çalışmaya rastlanırken, sonlu eleman analizlerinin sayısı kısıtlıdır. Bunların yanında, farklı birleşim türlerini birbirleriyle kıyaslayan çalışmaların sayısı da azdır. Bu tez kapsamında altı farklı birleşim türü, sonlu eleman analizleri ile birbirleriyle karşılaştırılmakta olup, literatürde bu konudaki eksikliğin giderilmesi amaçlanmaktadır.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLEME YAKLAŞIMI

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), mühendislik alanlarındaki analizlerde en çok kullanılan sayısal yöntemlerden biridir. Yöntem, çözümü aranan problemi çok sayıda bir, iki veya üç boyutlu olabilen sonlu elemanlara bölerek bu elemanların matematik modelinin problemi temsil etmesi esasına dayanır. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla daha kullanılabilir hale gelmiştir. Bu yöntem kullanılarak çözümler yapan ticari veya eğitim amaçlı programlar yazılmıştır. Bu tez kapsamında analizleri yapılacak olan birleşimler, sonlu elemanlar programlarından biri olan ANSYS Workbench [54] kullanılarak incelenecektir.

Birçok parçadan oluşan bir problemin üç boyutlu sonlu elemalar analizi için yapılması gerekenler işlemler kısaca Şekil 3.1'deki akış diyagramında gösterilmektedir.

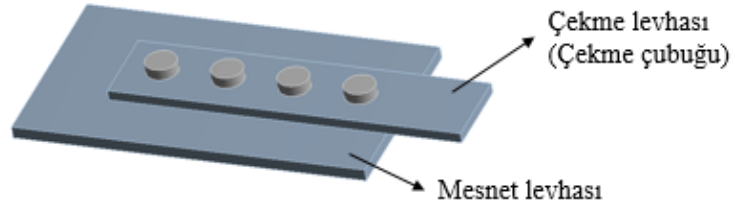
Burada anlatılan altı aşamanın her biri kendi içerisinde ayrı bir süreç olup, kısaca ayrı başlıklar halinde bir örnek üzerinde açıklanacaktır.



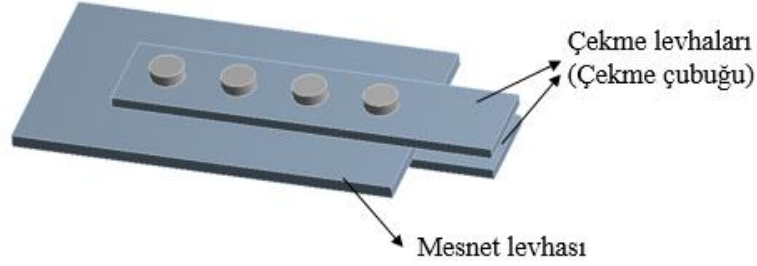
Şekil 3. 1 SEY ile çözüm için izlenecek sürecin gösterildiği akış diyagramı

3.1 Problem Geometrisinin Oluşturulması

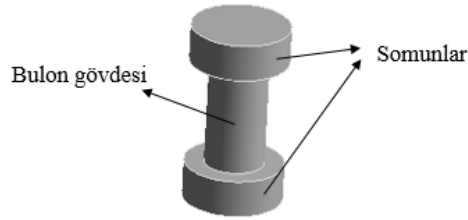
İncelenen problemin geometrisi oluşturulurken mümkün olduğu sürece basitleştirmeler kullanmak çözüm süresinin kısılmasına katkı sağlar. Problemi mümkün olduğu kadar sade ve sınırlı olarak modellemek dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. Örnek olarak Şekil 3.2’de bir adet levhadan meydana gelen (Örnek 1), Şekil 3.3’te iki adet levhadan meydana gelen (Örnek 2) bir çekme çubuğunun dört adet bulon ile mesnet levhasına birleşimi görülmektedir. Burada, çekme çubuğuna kuvvet etki ettiğinde, levhalardaki ve bulonlardaki gerilme dağılımı incelenecektir. Dikkate alınan örneklerdeki bulon Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 2 Örnek 1 adlı birleşim

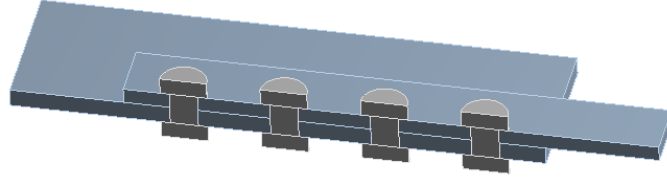


Şekil 3. 3 Örnek 2 adlı birleşim

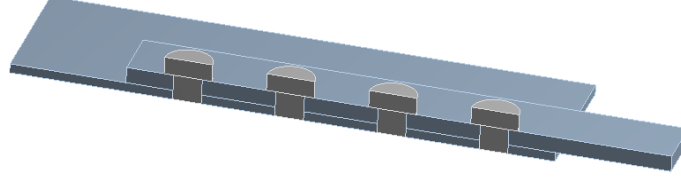


Şekil 3. 4 Dikkate alınan örneklerdeki bulon ve bulonun parçaları

Gerçek bir bileşimde bulonların somunları altıgen olup, altlarında pullar bulunmaktadır. Örnekler oluşturulurken basitleştirme amacıyla pullar ve bulonların dişleri dikkate alınmamıştır olup, somunlar silindir olarak modellenmiştir. Bu basitleştirmeler, problemin amacına katkısı çok az olacak ayrıntıların dikkate alınmamasını sağlamaktadır. Ayrıca, Şekil 3.2’de görülen Örnek 1 birleşimi, bulonların boyuna eksenleri doğrultusundaki düzleme göre simetrik olduğundan, sistemin sadece yarısına göre çözüm yapılabilir. Şekil 3.3’te görülen Örnek 2 birleşiminde ise, bu düzlemin yanı sıra bir de bulonların boyuna eksenlerine dik doğrultusundaki düzleme göre simetri durumu vardır. Bu durumda bu sistemin dörtte biri hesaba katılarak analiz yapılabilir. Şekil 3.5 ve 3.6’da sistem geometrilerinin indirgenmiş modelleri görülmektedir.



Şekil 3. 5 Örnek 1 adlı birleşimin indirgenmiş modeli



Şekil 3. 6 Örnek 2 adlı birleşimin indirgenmiş modeli

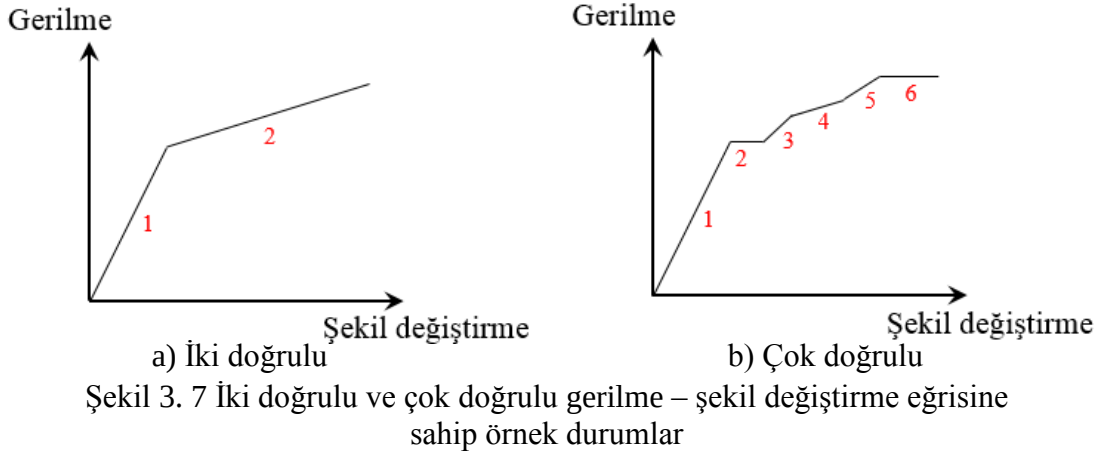
3.2 Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapı çeliğinin basit çekme deneyinde elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisi önceki bölümde açıklanmaktadır. Eğri, doğrusal bir elastik bölge, ardından dalgalı bir akma bölgesi ve sonrasında da eğrisel bir şekilde artan ve azalan pekleşme bölgesinden oluşmaktadır. Malzemede meydana gelen gerilme düzeyini belirlemek için etki eden kuvvet kesitin alanına bölünür. Çekme deneyi boyunca malzemenin kesitindeki küçülme göz önüne alınmazsa elde edilen eğri mühendislik eğrisi, kesitte küçülme göz önüne alınırsa elde edilen eğri gerçek eğridir. ANSYS Workbench programında malzemenin gerilme – şekil değiştirme eğrisi olarak gerçek eğri olarak dikkate alınmaktadır, yani girilen gerilme değerlerinde azalma olmamaktadır.

ANSYS Workbench programında doğrusal olmayan metal malzeme iki şekilde dikkate alınabilmektedir [54]:

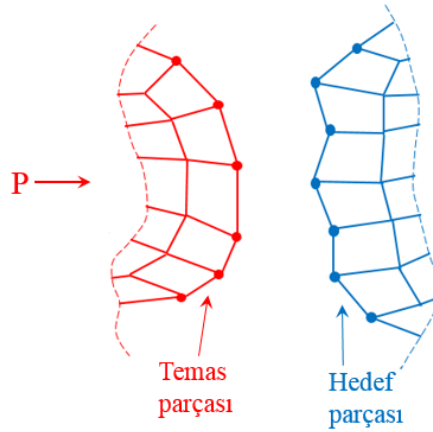
- Bilinear (İki doğrulu)
- Multilinear (Çok doğrulu)

İki doğrulu ve çok doğrulu gerilme eğrisine sahip malzemeler örnek olarak Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



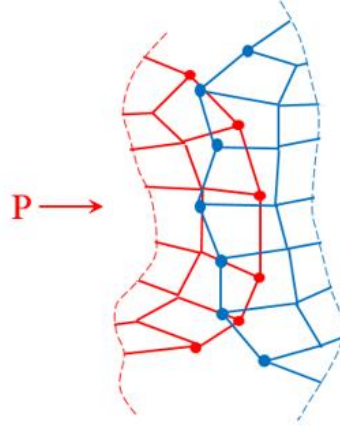
3.3 Temas Durumlarının Belirlenmesi

Problemde sistemi meydana getiren parçalar arasındaki temas durumları dikkate alınmaktadır. Bunun için parçalar arasına ilave olarak temas elemanları tanımlanmaktadır. Bu elemanların görevi birbirine etkileşimi olan iki parçaya ait sonlu elemanların düğüm noktaları arasında bir ilişki tanımlamaktır. Birbirine etkileşimi olan bu iki parçanın biri temas (contact) parçası, diğeri hedef (target) parçası olarak adlandırılmaktadır [54]. Şekil 3.8’de bu parçalar şematik olarak gösterilmektedir.

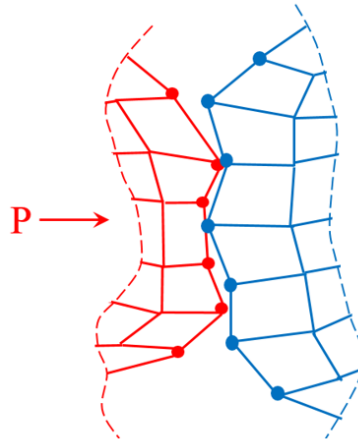


Şekil 3. 8 Temas ve hedef parçalarının şematik olarak gösterilmesi

Eğer bu parçalar arasına herhangi bir etkileşim tanımlanmazsa parçalar birbirlerini tanımayacağı için, Şekil 3.9’daki gibi parçalar birbirlerinin içine geçer. Bu istenen bir durum değildir. Bu yüzden parçalar arasındaki temas durumlarını dikkate alan temas elemanlarının tanımlanmasıyla, Şekil 3.10’daki gibi bir şekil değiştirme elde edilebilir.



Şekil 3. 9 Parçalar arasındaki etkileşimin dikkate alınmaması durumu

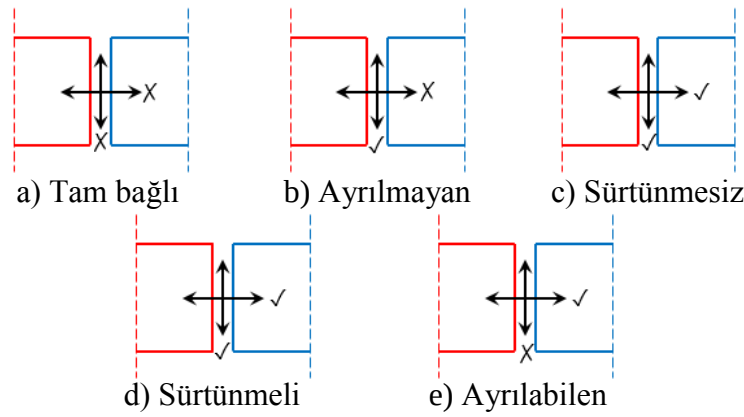


Şekil 3. 10 Parçalar arasındaki etkileşimin dikkate alınması durumu

ANSYS Workbench Sonlu Elemanlar analiz programında 5 farklı temas durumu göz önüne alınabilmektedir. Bunların isimleri ve davranış biçimleri aşağıda açıklanmış olup ayrıca şematik olarak Şekil 3.11’de gösterilmektedir [54].

- Tam bağlı temas (Bonded): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin normal ve teğet doğrultularında hareket etmeyecek şekilde yani tam bağlı olarak dikkate alınmaktadır.
- Ayrılmayan temas (No Separation): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin teğet doğrultusunda hareket edebilmektedir. Ancak, parçalar birbirlerinin normali doğrultusunda birbirlerinden ayrılmayacak şekilde dikkate alınmaktadır.
- Sürtünmesiz temas (Frictionless): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin hem teğet doğrultusunda sürtünmesiz olarak hem de normali doğrultusunda ayrılabilir şekilde dikkate alınmaktadır.

- d) Sürtünmeli temas (Frictional): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin normali doğrultusunda ayrılabilir, teğeti doğrultusunda ise belirlenen bir sürtünme katsayısına bağlı olarak hareket edebilecek şekilde dikkate alınmaktadır. Sürtünme katsayısı “0” olarak girildiğinde sürtünmesiz temas olarak dikkate alınmaktadır.
- e) Ayrılabilen temas (Rough): Bu temas türünde etkileşim içerisinde olan parçalar birbirlerinin normali doğrultusunda ayrılabilir. Ancak, parçalar birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareket edemeyecek şekilde dikkate alınmaktadır.

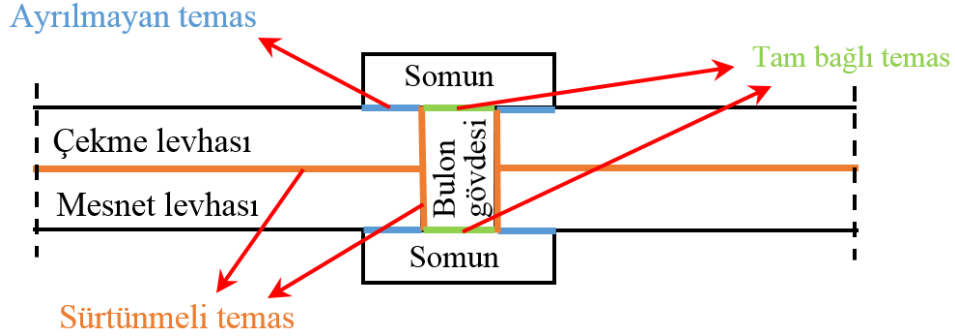


Şekil 3. 11 ANSYS Workbench programında dikkate alınabilen temas durumlarının şematik olarak gösterilmesi

Bu temas türlerinden Tam bağlı (Bonded) ve Ayrılmayan (No Separation) temas durumları için doğrusal analiz ile, diğerleri için ise doğrusal olmayan analiz ile çözüm yapılmaktadır. Bu durumda problemde doğrusal olmayan çözüm yapan temas türlerinin sayısı arttıkça, çözüm süresi daha fazla olmaktadır. Bu yüzden problemin türüne bağlı olarak, mümkün olduğunca doğrusal olarak çözüm yapan temas durumları seçmek analiz süresini azaltacaktır.

Dikkate alınan örnek birleşimler, bulon gövdesi, bulon somunu, çekme levhası, mesnet levhası gibi parçalardan oluşmaktadır. Bulon gövdesi ile bulon somunu kendi arasında hiçbir şekilde hareket etmeyeceğinden Tam bağlı (Bonded) temas durumu dikkate alınmaktadır. Çekme levhası ile mesnet levhası arasında Sürtünmeli (Frictional) temas türü dikkate alınmakta olup, sürtünme katsayısı 0,44'tür. Bulon gövdesi ile levhalar arasında da Sürtünmeli (Frictional) temas türü dikkate alınmaktadır. Buradaki sürtünme katsayısı 0,2'dir. Çekme levhası ile mesnet levhası birbirlerine göre teğetleri doğrultularında hareket edebilir ve normal doğrultularında ayrılabilirler. Aynı şekilde

bulon gövdesi ile levhaların delikleri çekme levhasındaki çekme kuvvetinden dolayı birbirlerinden ayrılabilirler. Bulon somunları ve levhalar birbirlerinin teğeti doğrultularında hareket edebilir; fakat normali doğrultularında ayrılmaları çok küçük olur veya hiç ayrılmazlar. Bu yüzden doğrusal olmayan çözüm yapan temas türünü daha fazla arttırmamak için bu ayrılma ihmal edilip, bu parçalar arasında Ayrılmayan (No Separation) temas durumu dikkate alınmaktadır. Örneklerde dikkate alınan temas türleri ayrıca Şekil 3.12’de şematik olarak gösterilmektedir.

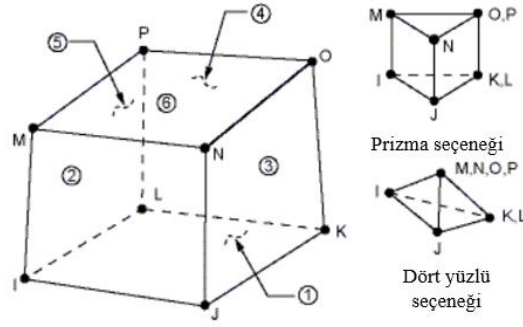


Şekil 3. 12 Örneklerde dikkate alınan temas türlerinin şekil üzerinde gösterilmesi

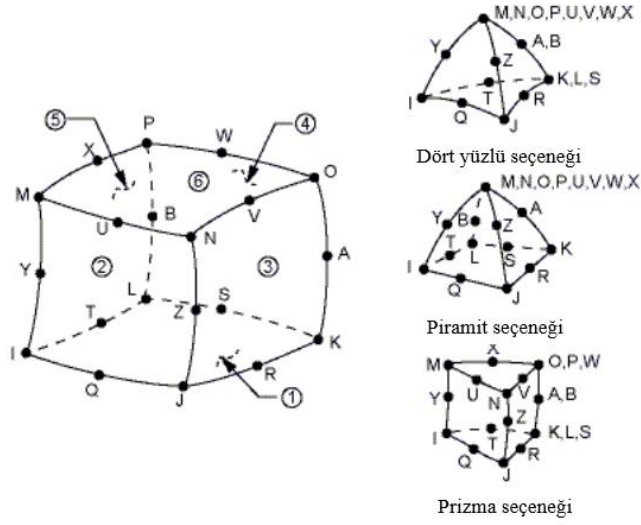
3.4 Sonlu Elemanlar Ağının Oluşturulması

Sonlu Elemanlar analizinde dikkate alınacak olan diğer bir süreç, problemin sonlu eleman ağını oluşturmaktır. ANSYS programında bu tez kapsamında incelenen problemler için sık kullanılan bazı üç boyutlu elemanlar şunlardır:

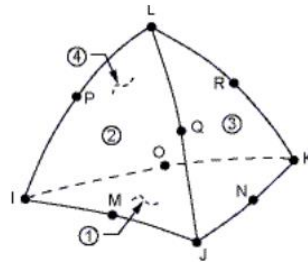
- SOLID185: Altı yüze ve sekiz düğüm noktasına sahip elemandır. Şekil 3.13’te gösterilmektedir.
- SOLID186: Altı yüze ve yirmi düğüm noktasına sahip elemandır. Şekil 3.14’te gösterilmektedir.
- SOLID187: Dört yüze ve on düğüm noktasına sahip elemandır. Şekil 3.15’te gösterilmektedir.



Şekil 3. 13 SOLID185 elemanı [54]



Şekil 3. 14 SOLID186 elemanı [54]



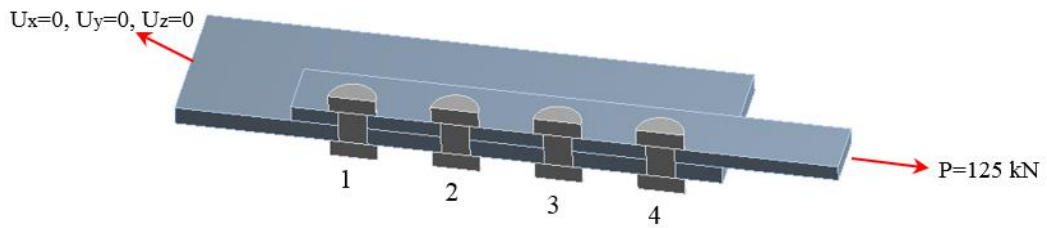
Şekil 3. 15 SOLID187 elemanı [54]

Altı yüzlü elemanların, dört yüzlü elemanlara göre bazı avantajları vardır. Dört yüzlü elemanların hareket kabiliyetleri daha sınırlıdır. Şekil 3.13 ve 3.14’den görüldüğü üzere, altı yüzlü elemanın bir yüzündeki dört düğüm noktası bir araya geldiğinde dört yüzlü eleman elde edilebilmektedir, yani altı yüzlü elemandan dört yüzlü eleman oluşturulabilir. Ayrıca sayısal doğruluk düşünüldüğünde, altı yüzlü eleman kullanılarak problem daha az sayıda sonlu elemana ayrılabilir. Bu da çözüm süresinin kısılmasını sağlar.

Problemi sonlu elemanlar ağına ayırırken dikkat edilmesi gereken hususlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Gerilme dağılımının önemli olduğu, geometrik süreksizliklerin olduğu yerler daha yoğun sonlu elemanlara bölünebilir.
- Problemin incelenecek olduğu yerler, diğer yerlere göre daha yoğun sonlu elemanlara bölünmelidir.
- Problemde doğrusal olmayan temasların varlığı, bazı durumlarda çözümü zorlaştırabilir ve analiz kesilebilir ve sonuç alınamayabilir. Bu durumda, bu temas bölgelerindeki sonlu elemanlar ağı, diğer bölgelerden daha yoğun olacak şekilde değiştirilebilir.
- Sonlu eleman modelinin sonlu eleman ağından kabul edilebilir derecede bağımsız sonuç üretmesi beklenmektedir. Bu yüzden problemde yakınsama araştırması yapıp, sonlu eleman ağı değiştikçe sonuçların nasıl değiştiği incelenmeli ve gerekirse problemin sonlu eleman ağı değiştirilmelidir. Problemdeki sonlu eleman sayısı arttıkça çözüm süresi uzayacağı için, problem için mümkün mertebe en ideal sonlu eleman ağı belirlenmelidir.

Bu hususlar dikkate alınan örnekler üzerinde açıklanacaktır. Birleşimlerin sonlu eleman ağları değiştirilerek bulonlar ve levhalar üzerindeki en büyük eş değer (von-Mises) gerilme değerleri incelenmiştir. Şekil 3.16'da örneklerin sınır şartları, dış kuvvetin yeri ve değeri ve bulon numaralandırmaları gösterilmiştir.



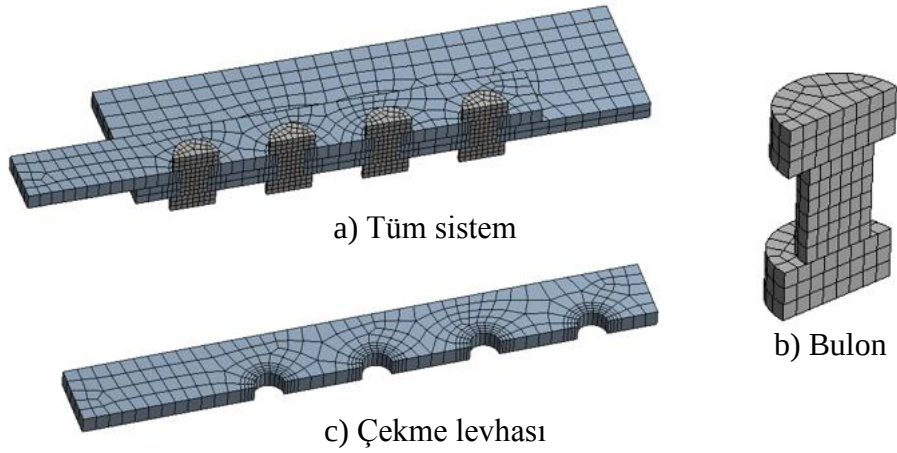
Şekil 3. 16 Örneklerin sınır şartları, dış kuvvetin yeri ve değeri ve bulon numaralandırmaları

Çizelge 3.1'de Örnek 1 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı durumları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile parçaların en büyük eş değer (von-Mises) gerilme değerleri verilmektedir. Şekil 3.17 ve 3.18'de en az ve en fazla sonlu eleman ağına sahip modellerin sonlu eleman ağları gösterilmektedir. Sonlu eleman ağı yoğunluğu, levhaların kalınlığı

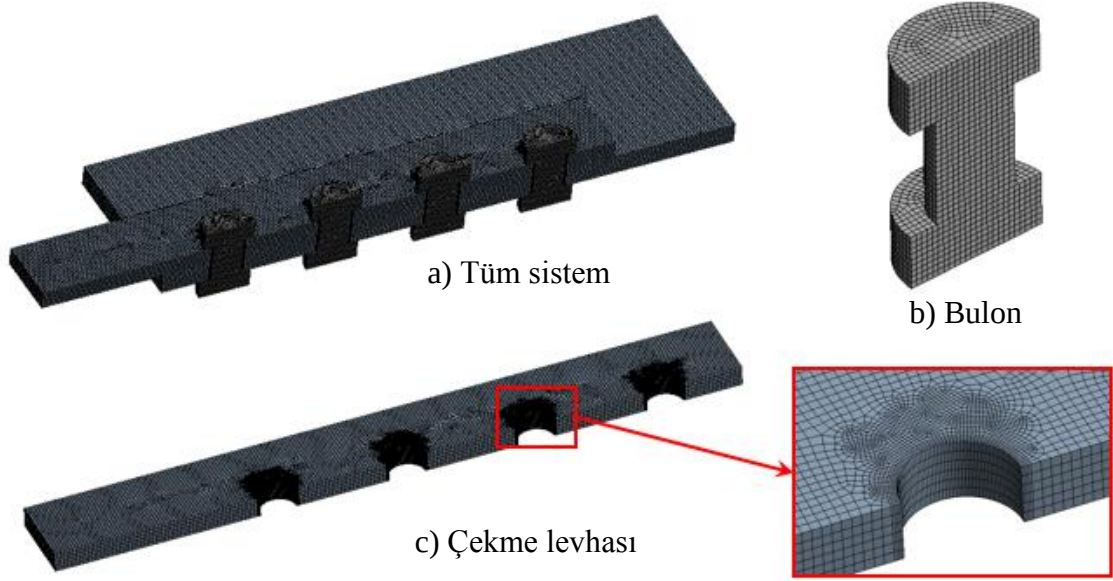
boyunca olan elemanların, levhaların yüzeyindeki elemanların, deliklerin çevrelerindeki elemanların ve bulonlardaki elemanların boyutları değiştirilerek ayarlanmaktadır. Bütün modellerde SOLID186 elemanı kullanılmaktadır.

Çizelge 3. 1 Örnek 1 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağı durumları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile parçaların en büyük eş değer gerilme değerleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	En büyük eş değer (von-Mises) gerilme değeri (MPa)					
			Mesnet levhası	Çekme levhası	Bulon numarası			
					1	2	3	4
1	2173	14313	495	433	846	584	361	392
2	6094	34502	429	443	869	419	306	340
3	11133	61186	437	425	884	461	358	394
4	22296	114426	537	415	887	389	284	333
5	37520	186775	561	612	894	386	266	317
6	69136	330862	426	404	920	420	299	324
7	117003	548243	445	469	945	409	296	324
8	194281	888469	428	473	938	446	326	369



Şekil 3. 17 Örnek 1 birleşiminin en az sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı



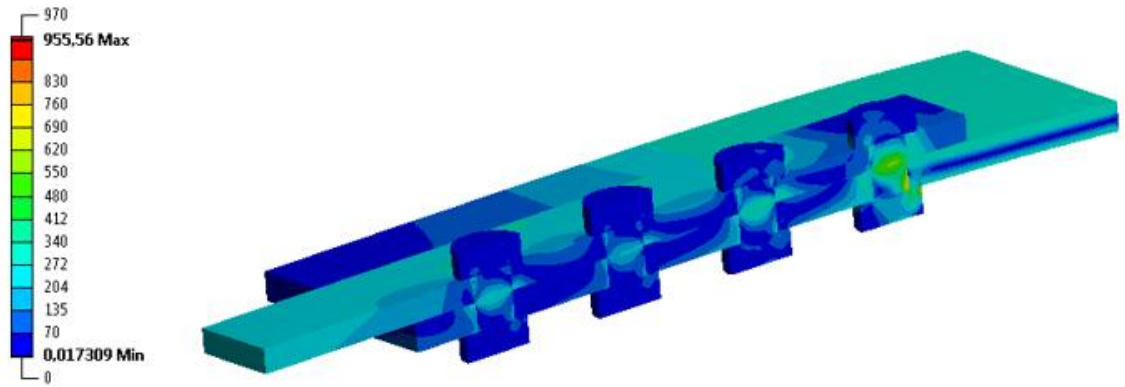
Şekil 3. 18  rnek 1 birleşiminin en fazla sonlu eleman a ına sahip modelin sonlu eleman a ı

Çizelge 3.1'den g r ld  u gibi, eleman sayısı de i tik e, parçalardaki gerilme değerleri değişmektedir. Eleman sayısı çok yüksek değerlere ulaştığı halde, gerilme değerlerinde bir yakınsama durumu görülmemektedir. Sistemde doğrusal olmayan temas durumlarının varlığı yakınsama problemi getirebilmektedir. Bu durumda, sistemdeki parçaların sonlu eleman a ının belirlenmesi aşamasında temas bölgelerinde sadece teması modelleyen ara elemanların da sıklığının ayarlanması gerekmektedir. Bu örnekteki yakınsama probleminden dolayı, doğrusal olmayan temas durumları mevcut olan bulon gövdesi ile levha delikleri arasında ve mesnet levhası ile çekme levhası arasında teması modelleyen ara elemanların sıklığı de i tirilmekte ve elde edilen değerler  izelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 2 Teması modelleyen ara elemanların sıklığının değiştirilmesiyle Örnek 1 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	En büyük eş değer (von-Mises) gerilme değeri (MPa)					
			Mesnet levhası	Çekme levhası	Bulon numarası			
					1	2	3	4
1	6140	33391	445	387	870	423	300	341
2	12698	64942	405	412	900	438	318	351
3	25156	122912	407	389	906	431	304	338
4	34250	165368	415	373	909	435	308	346
5	89656	407129	389	373	947	430	322	350
6	175296	779739	392	388	956	427	325	342

Çizelge 3.2’den görüldüğü üzere, 5. ve 6. modellerin parçalarındaki en büyük eş değer gerilme değerleri birbirine oldukça yakındır. Burada gerilme değerleri arasındaki değişim yaklaşık %4 olup yakınsama sağladığı kabul edilmektedir. Model 6 için sistemin eş değer gerilme dağılımı Şekil 3.19’da verilmektedir.



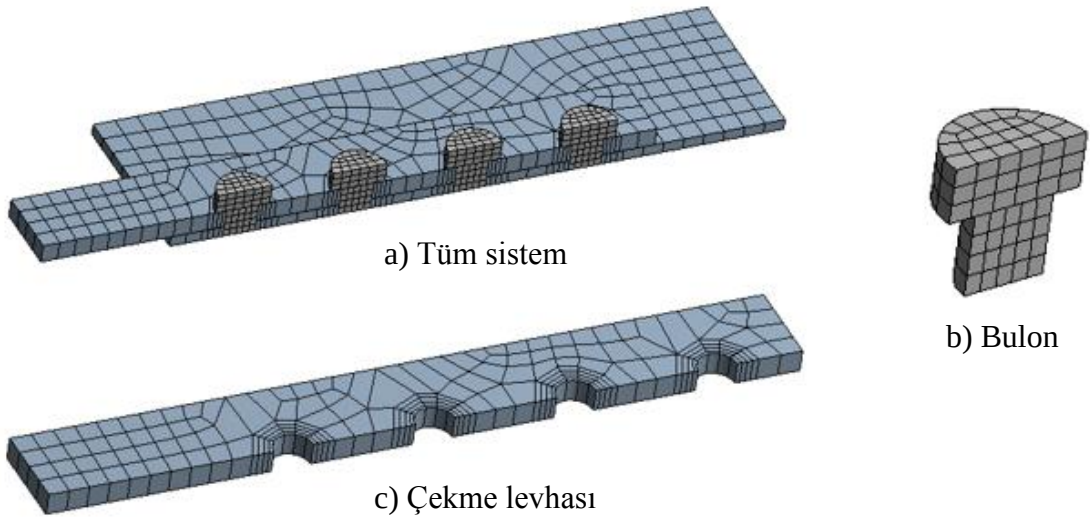
Şekil 3. 19 Örnek 1 birleşiminde Model 6 için eş değer gerilme dağılımı (MPa)

Buna benzer bir inceleme Örnek 2 birleşimi için de yapılmaktadır. Çizelge 3.3’te Örnek 2 birleşiminin teması modelleyen ara elemanların sıklığı ayarlanmadan sonlu eleman ağları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile parçaların en büyük eş değer (von-Mises)

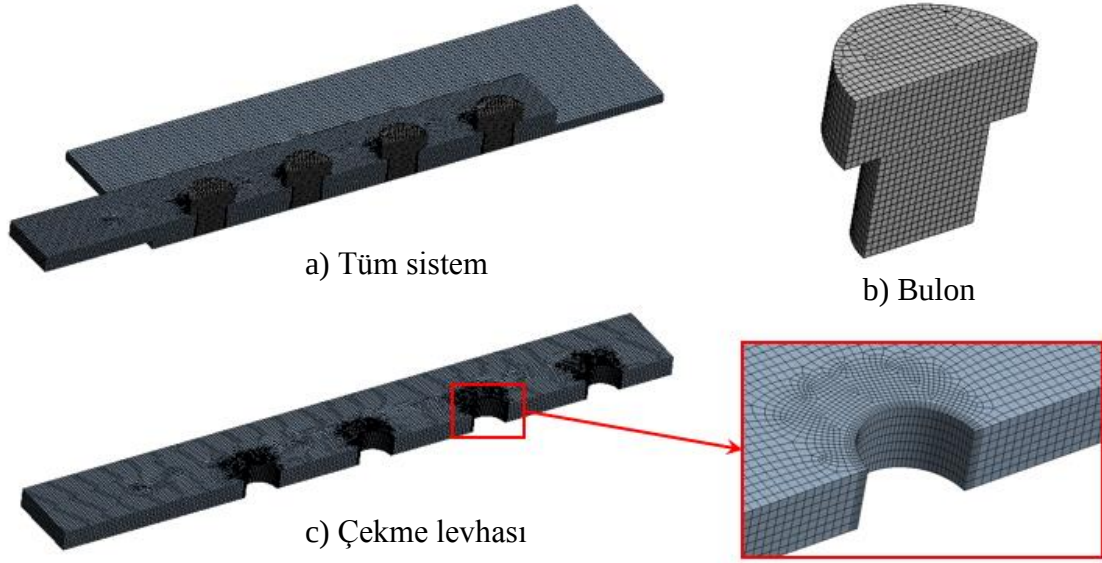
gerilme değerleri verilmektedir. Şekil 3.20 ve 3.21’de en az ve en fazla sonlu eleman ağına sahip modellerin sonlu eleman ağları gösterilmektedir.

Çizelge 3. 3 Örnek 2 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	En büyük eş değer (von-Mises) gerilme değeri (MPa)					
			Mesnet levhası	Çekme levhası	Bulon numarası			
					1	2	3	4
1	854	6434	430	454	542	472	493	567
2	1847	13248	392	421	584	524	575	655
3	5636	33194	376	384	517	419	439	507
4	10707	59015	380	383	510	407	427	493
5	25212	128033	380	381	543	461	479	555
6	31211	158044	395	373	550	467	486	566
7	51164	247751	418	377	520	381	414	493
8	90932	430610	455	459	527	445	467	537
9	137336	635350	368	374	523	404	423	495



Şekil 3. 20 Örnek 2 birleşiminin en az sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı



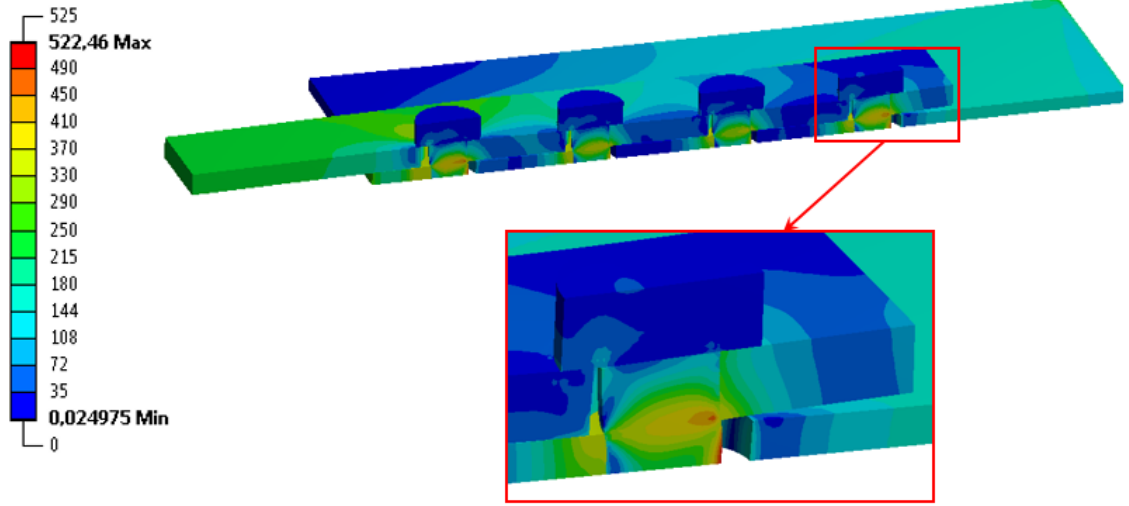
Şekil 3. 21 Örnek 2 birleşiminin en fazla sonlu eleman ağına sahip modelin sonlu eleman ağı

Çizelge 3.3'ten görüldüğü üzere, gerilme değerleri yakınsamamaktadır. Bu örnekte de sonlu eleman ağı sıklaştırmasında doğrusal olmayan temas durumları arasına teması modelleyen ara elemanların sıklığı değiştirilmekte ve elde edilen değerler Çizelge 3.4'de verilmektedir.

Çizelge 3. 4 Teması modelleyen ara elemanların sıklığının değiştirilmesiyle Örnek 2 birleşiminin değiştirilen sonlu eleman ağları için eleman ve düğüm noktası sayıları ile en büyük eş değer gerilme değerleri

Model	Eleman sayısı	Düğüm noktası sayısı	En büyük eş değer (von-Mises) gerilme değeri (MPa)					
			Mesnet levhası	Çekme levhası	Bulon numarası			
					1	2	3	4
1	1893	12532	391	394	520	391	420	495
2	4816	27546	376	381	529	392	423	505
3	11092	58306	376	382	520	407	427	498
4	15415	79857	379	375	512	385	406	483
5	33684	163942	378	374	519	407	425	495
6	48276	232492	381	372	521	405	424	492
7	77990	365073	395	372	521	381	414	492

Çizelge 3.4’de görüldüğü üzere, gerilme değerlerinde yaklaşık %6 farkla yakınsama sağlanmaktadır. Model 7 için sistemin eş değer gerilme dağılımı Şekil 3.22’de verilmektedir.



Şekil 3. 22 Örnek 2 birleşiminde Model 7 için eş değer gerilme dağılımı (MPa)

SONLU ELEMAN MODELLEMELERİNİN DOĞRULANMASI

Sonlu elemanlar modellerinin doğrulanması amacıyla, literatürden [31] monotonik yükleme altında deneysel ve sonlu elemanlar analizleri ile incelenen sekiz adet alın levhalı bulonlu kolon – kiriş birleşimlerinin iki adedi seçilmektedir. Tezin bu bölümünde seçilen örnekler sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek sonuçları literatürdeki deneysel ve sonlu elemanlar sonuçlarıyla moment-dönme eğrileri, yük taşıma kapasiteleri ve göçme modları bakımından karşılaştırılmaktadır.

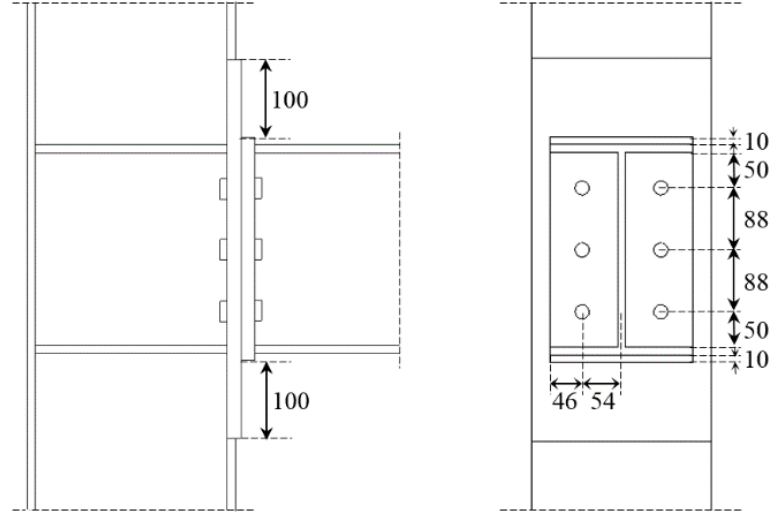
4.1 Birleşimlerin Analize Hazırlanması

4.1.1 Birleşimlerin Geometrik Detayları

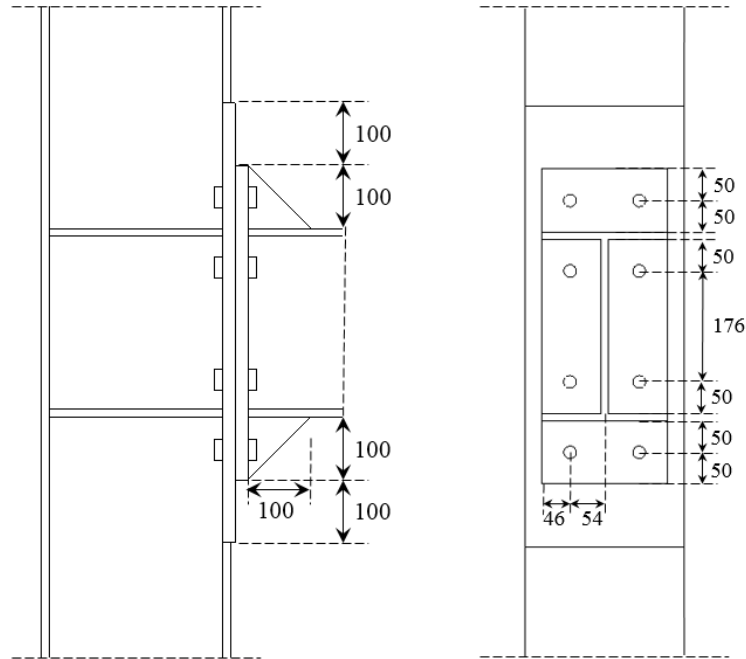
Birleşimlerdeki kolon ve kiriş profilleri, alın levhası kalınlığı, bulon çapı, kolon ve kiriş uzunlukları gibi veriler literatürdeki çalışmadan alınmaktadır. Kolon ve kiriş için yapma profiller kullanılmış olup, boyutları Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Birleşimlerde M20 bulon kullanılmaktadır. Ayrıca kolon başlığı alın levhasının başlangıç ve bitiş noktasının 100 mm uzağından itibaren kesilmiş olup, buradaki boşluğa 20 mm kalınlığında kolon başlık levhası yerleştirilmektedir. Konsol kiriş ucuna yakın yerdeki yükleme noktasının kolon yüzüne olan uzaklığı 1,2 m’dir. Kiriş gövdesinde yükleme noktasının altındaki levhanın kalınlığı 20 mm olup, kiriş ve kolon gövdelerindeki diğer tüm levha kalınlıkları 12 mm’dir. Birleşimlerin detayları Örnek 1 için Şekil 4.1’de ve Örnek 2 için Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Birleşimlerin boyutları ve mesnet şartları Örnek 2 için Şekil 4.3’de verilmektedir. Diğer birleşimin de boyutları Şekil 4.3’deki gibidir. Şekil 4.3’de görülen mesnet şartına ilave olarak yükleme noktası da düzlem dışına doğru hareket etmeyecek şekilde mesnetlenmektedir. Geometrik modellemede kaynaklar dikkate alınmamaktadır.

Çizelge 4. 1 Kolon ve kiriş kesitinin boyuları (mm) [31]

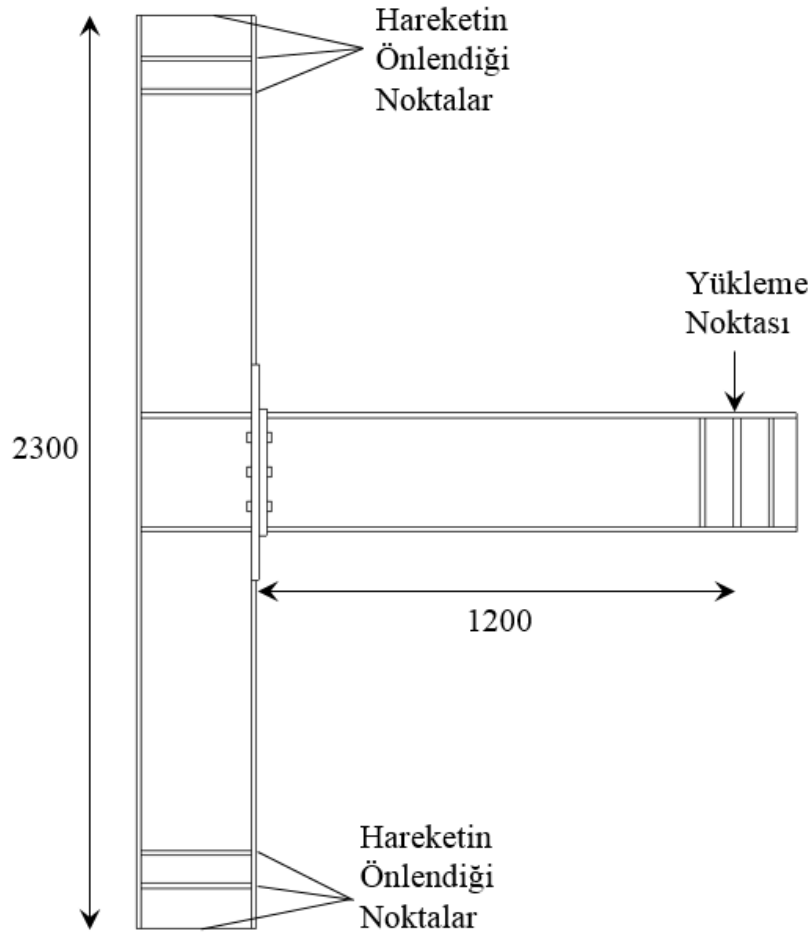
Kesit	Kesit Yüksekliği	Gövde kalınlığı	Başlık genişliği	Başlık kalınlığı
Kiriş	300	8	200	12
Kolon	300	8	250	12



Şekil 4. 1 Örnek 1 birleşiminin detayları



Şekil 4. 2 Örnek 2 birleşiminin detayları



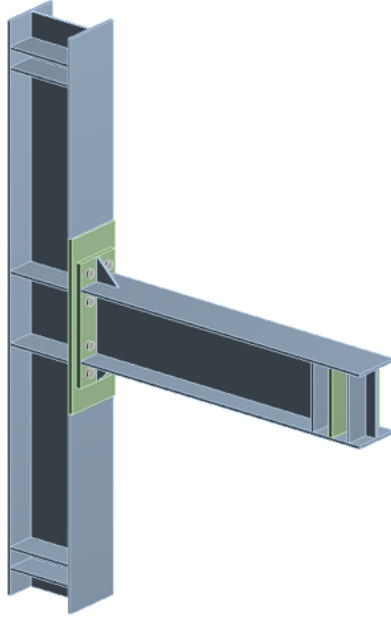
Şekil 4. 3 Birleşimlerin boyutları ve mesnet şartları (Örnek 2 üzerinde gösterilmektedir)

4.1.2 Sonlu Eleman Modelleri

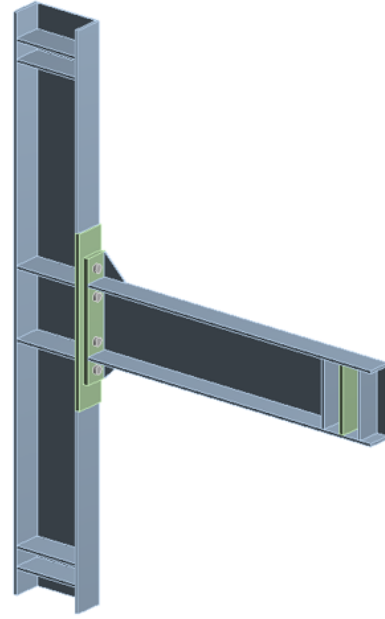
Geometrik şekiller kiriş ve kolon gövde düzlemlerine göre simetrik olduğu için literatürden alınan çalışmada olduğu gibi burada da analiz süresini azaltabilmek amacıyla sistemin yarısı dikkate alınarak çözüm yapılacaktır. Şekil 4.4’de Örnek 2’nin tam ve yarım geometrik şekilleri gösterilmektedir.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken literatürdeki çalışmada dört yüzlü elemanlar kullanılırken, burada mümkün olduğu sürece altı yüzlü elemanlar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar ağında kullanılan eleman üç boyutlu, yirmi düğüm noktalı, bir noktasında altı serbestlik derecesine sahip olan “SOLID186” elemanıdır. Şekil 4.5’te literatürde yapılan çalışmanın sonlu elemanlar ağı, Şekil 4.6’da bu çalışmadaki Örnek 1 birleşiminin, Şekil 4.7’de Örnek 2 birleşiminin sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir. Şekil 4.8’de ise bu çalışmada modellenen örneklerdeki bulonların sonlu elemanlar ağı gösterilmektedir. Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken bulonlar ve delik çevreleri gibi

gerilme dağılımının önemli olduğu yerler daha küçük elemanlarla modellenmektedir. Çizelge 4.2’de her bir birleşimdeki eleman ve düğüm noktası sayıları verilmektedir.

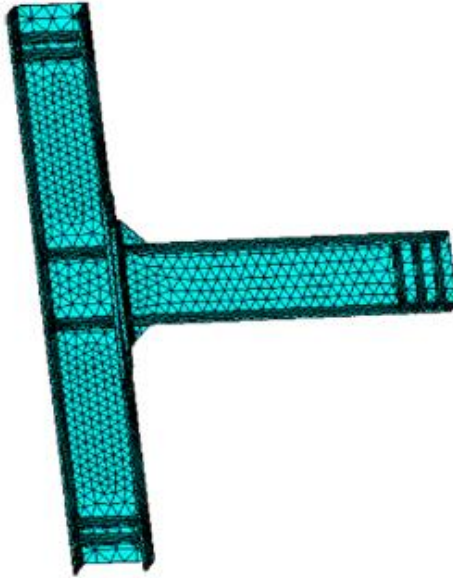


a) Tam model

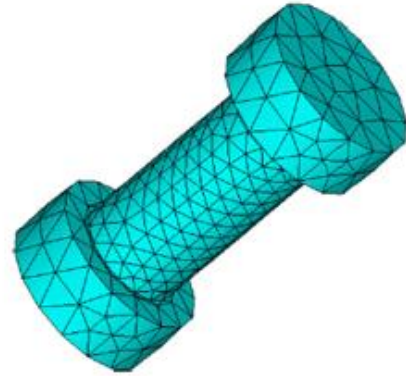


b) Yarım model

Şekil 4. 4 Birleşimlerin tam ve yarım geometrik şekilleri (Örnek 2 üzerinden gösterilmektedir)

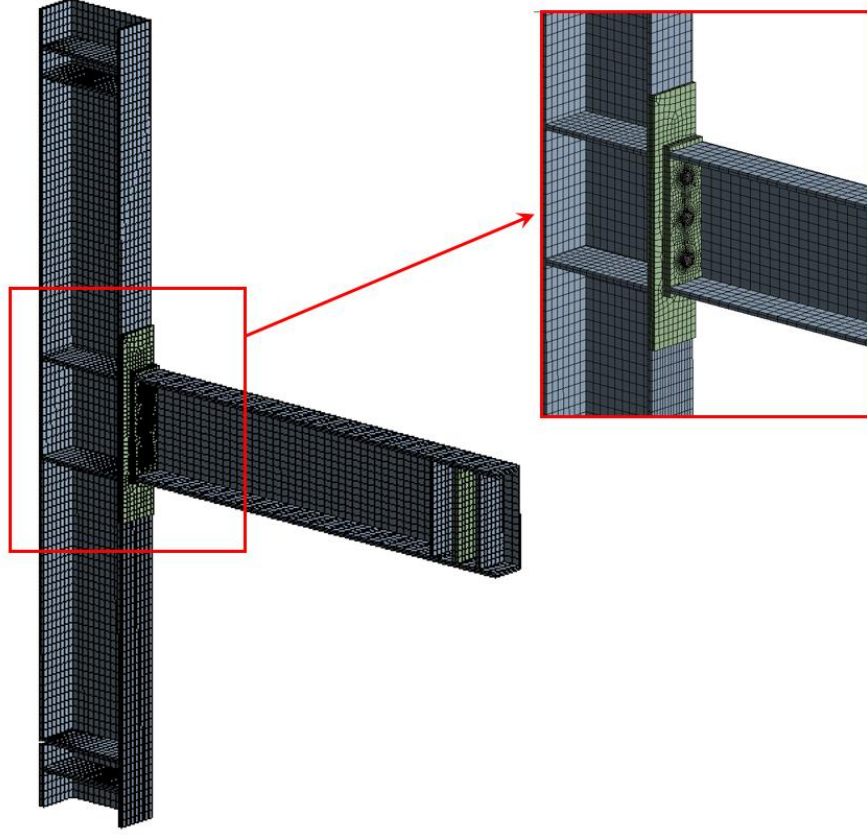


a) Birleşimde

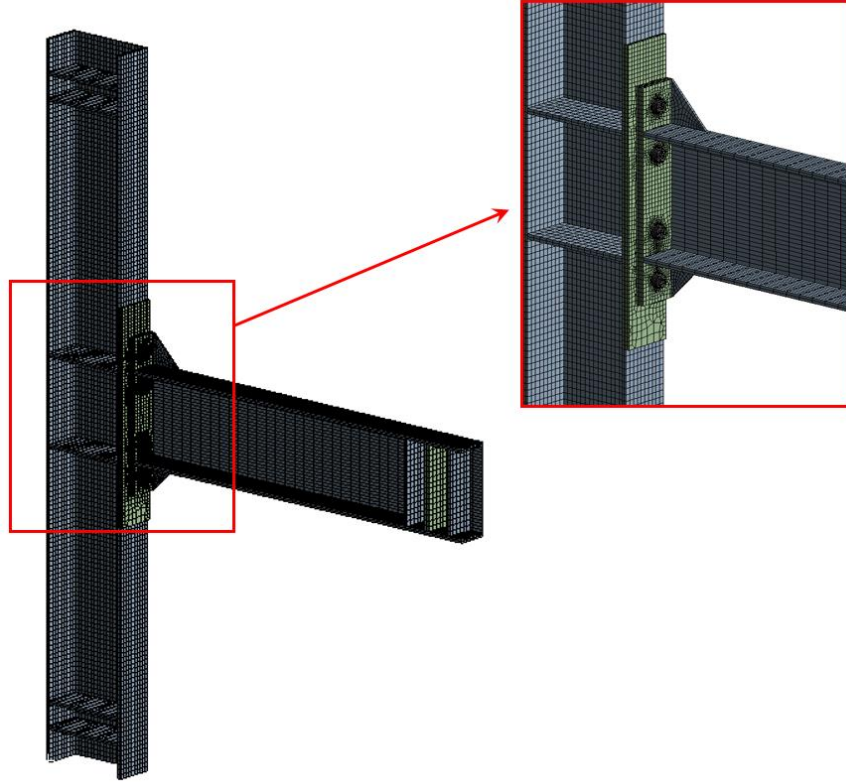


b) Bulonda

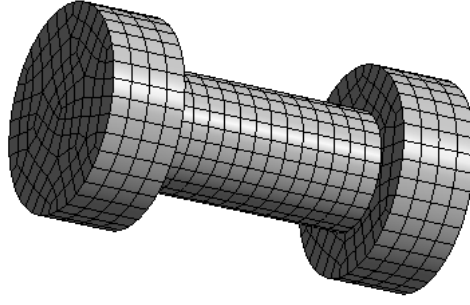
Şekil 4. 5 Literatürden alınan çalışmadaki sonlu elemanlar ağları [31]



Şekil 4. 6 Örnek 1 birleşiminin sonlu eleman ağı



Şekil 4. 7 Örnek 2 birleşiminin sonlu eleman ağı



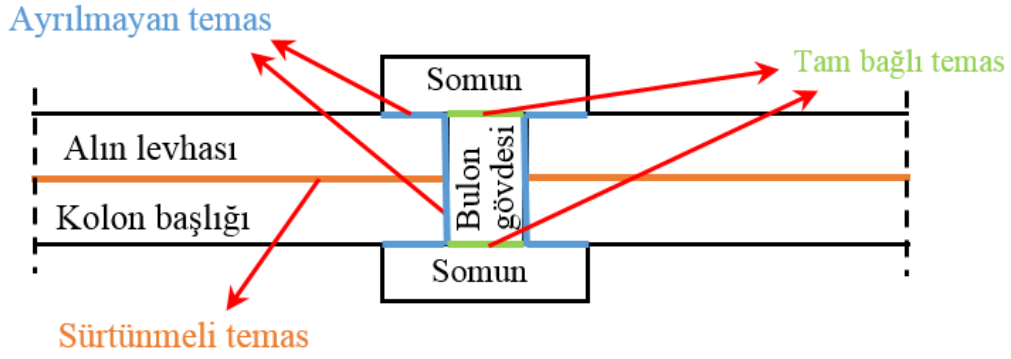
Şekil 4. 8 Birleşimlerdeki bulonların sonlu eleman ağı

Çizelge 4. 2 Birleşimlerdeki eleman ve düğüm noktası sayıları

	Örnek 1	Örnek 2
Eleman sayısı	27057	37498
Düğüm noktası sayısı	145342	196472

4.1.3 Temas Özellikleri

Bulonlu kolon – kiriş birleşimleri; kolon, kiriş, alın levhası, bulonlar, somunlar, rijitlik levhaları gibi parçalardan meydana gelmektedir. Bu parçaların birbirleriyle etkileşimleri mevcuttur. Alın levhası ile kolon başlık levhası arasında sürtünmeli (Frictional) temas durumu göz önüne alınmakta olup, sürtünme katsayısı 0,44'tür. Bulon gövdesi ile levhaların delikleri arasındaki temas durumu da Ayrılmayan (No Separation) temas durumu olarak göz önüne alınmaktadır. Burada bulonların delikten ayrılması küçük miktarda olacağından ihmal edilmektedir. Bulon somunları ile levhalar arasındaki temas durumları da Ayrılmayan (No Separation) temas durumu olarak dikkate alınmaktadır. Bu etkileşimler dışında kalan diğer temas bölgeleri kaynaklı olarak birleşmekte olup, tam bağlı (Bonded) olarak dikkate alınmaktadır. Dikkate alınan temas durumları Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 9 Temas durumlarının bir şekil üzerinde açıklanması

4.1.4 Malzeme Özellikleri

Malzeme özellikleri literatürden alınan çalışmadaki gibi alınmaktadır. Bulonlar yüksek mukavemetli olarak dikkate alınmakta olup, gerilme – şekil değiştirme değerleri Çizelge 4.3’de verilmektedir. Diğer çelik malzemeler ideal elasto-plastik olarak alınmaktadır. Kalınlığı 16 mm’den büyük olan levhalar için akma gerilmesi ve elastisite modülü sırasıyla 363 MPa ve 204227 MPa’dır. Diğer levhalar için ise akma gerilmesi ve elastisite modülü sırasıyla 391 MPa ve 190707 MPa’dır. Bütün malzemeler için poisson oranı 0,3 olarak alınmaktadır [31].

Çizelge 4. 3 Yüksek mukavemetli bulonun gerilme – şekil değiştirme değerleri [31]

Gerilme (MPa)	0	990	1160	1160
Şekil değiştirme (%)	0	0.483	13.6	15

4.1.5 Yükleme

Her bir birleşim 2 adımda yüklenmektedir. Birinci yükleme adımında sadece bulonlara 155 kN’luk öngerilme kuvveti etki ettirilmektedir. Bu öngerilme kuvvetinin değeri ilgili çalışmadan alınmaktadır [31]. İkinci yükleme adımında ise kiriş üzerindeki yükleme noktasına yerçekimi yönünde monotonik olarak yer değiştirme yükü uygulanmaktadır.

4.1.6 Analiz Ayarları

Birleşimlerin analizleri; doğrusal olmayan malzeme, doğrusal olmayan geometri değişimi ve doğrusal veya doğrusal olmayan temas durumlarına göre yapılmaktadır. Bu durumda, her bir yükleme adımı en az 25 alt adıma bölünmektedir. Böylelikle, doğrusal olmayan analizden dolayı yükler tek seferde yüklenmek yerine adım adım yüklenmektedir.

4.2 İrdeleme ve Değerlendirme

Bu bölümün amacı yapılan analiz sonuçları ile literatürdeki sonuçlarını karşılaştırıp benzer sonuçları elde etmektir. Çizelge 4.4’de bu çalışmadan ve literatürden alınan çalışmadan elde edilen kuvvet taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de bu çalışmadan ve literatürden alınan çalışmadan elde edilen moment – dönme ve moment – kayma dönmesi eğrileri gösterilmektedir.

Moment ve dönme değerlerini hesaplama yöntemi literatürden alınan çalışmanın yazarlarının başka bir çalışmasından [28] alınmıştır. Birleşimlerin dönme değeri (ϕ), kayma dönmesi (ϕ_s) ve boşluk dönmesi (ϕ_{ep}) değerlerinin toplanmasıyla bulunmaktadır. Kayma ve boşluk dönmeleri sırasıyla (4.1) ve (4.2) eşitliği ile bulunmaktadır.

$$\phi_s = \Delta/h_t \quad (4.1)$$

$$\phi_{ep} = \delta/h_t \quad (4.2)$$

Burada:

Δ =Kolon başlık levhasındaki kiriş alt ve üst başlıklarının orta nokta hizalarındaki yer değiştirme farkları.

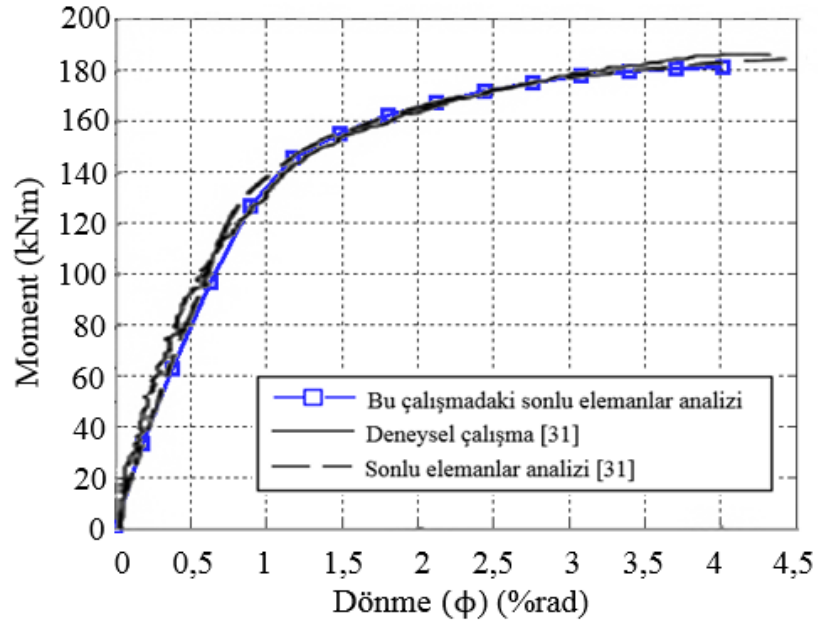
δ =Kolon başlık levhası ve alın levhası arasında kiriş üst başlığının orta nokta hizasındaki boşluk.

h_t = Kiriş alt ve üst başlıklarının orta noktaları arasındaki mesafe.

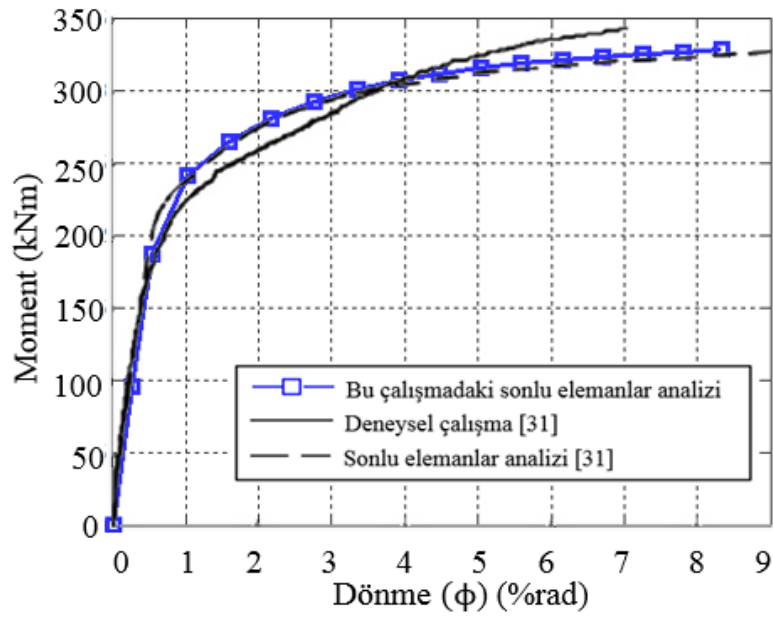
Moment değeri ise, yükleme noktasındaki kuvvet değeri ile yükleme noktasının kolon yüzüne olan uzaklığının çarpımı ile elde edilmektedir.

Çizelge 4. 4 Yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması (kN)

	DeneySEL çalışma [31] (A)	Sonlu elemanlar [31] (B)	Sonlu elemanlar (Bu çalışma) (C)	(C)/(A)	(C)/(B)
Örnek 1	155,3	156,2	150,63	0,97	0,96
Örnek 2	286,4	276,8	273,12	0,95	0,99

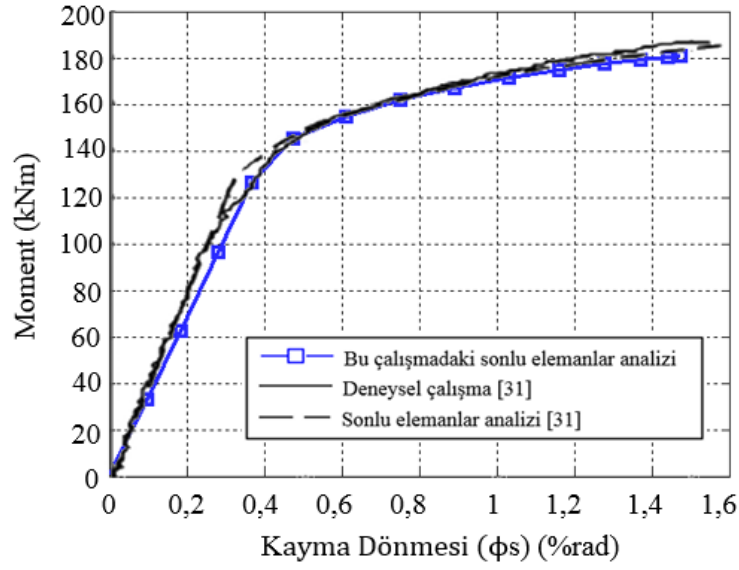


a) Örnek 1

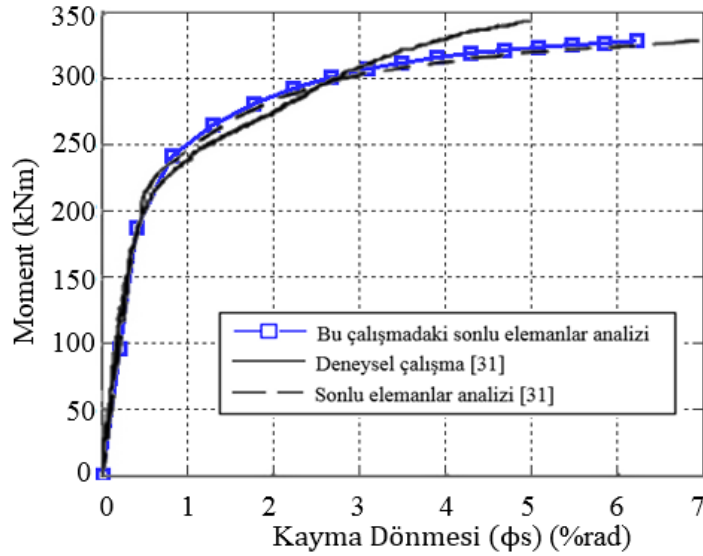


b) Örnek 2

Şekil 4. 10 Bu çalışmadaki ve literatürden alınan çalışmadaki moment – dönme eğrilerinin karşılaştırılması



a) Örnek 1



b) Örnek 2

Şekil 4. 11 Bu çalışmadaki ve literatürden alınan çalışmadaki moment – kayma dönmesi eğrilerinin karşılaştırılması

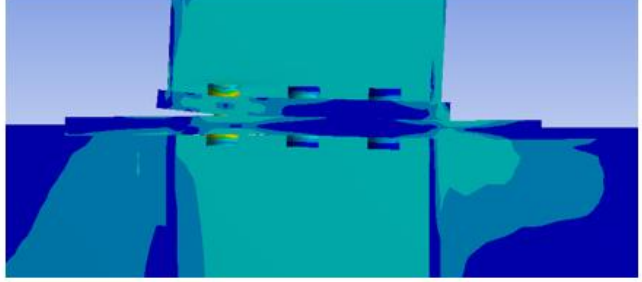
Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’den görüldüğü üzere, Örnek 2 için eğrilerin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan bölgelerinde sonuçlar birbirlerine oldukça yakındır. Örnek 1 için doğrusal olmayan bölgede oldukça yakın sonuçlar bulunmuş olup, doğrusal bölgede, özellikle moment – kayma dönmesi eğrisinde, küçük farklılıklar vardır.

Şekil 4.12’de Örnek 1 için bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizi ve literatürden alınan çalışmadaki deneysel çalışma sonucu elde edilen göçme modu görülmektedir. Burada

birleşim, bulonun taşıma kapasitesine ulaşması sonucunda yükü taşıyamaz duruma gelmektedir.



a) Deneysel çalışma [31]



b) Bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizi

Şekil 4. 12 Örnek 1 birleşiminin göçme modu bakımından karşılaştırılması

Bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizleri ile literatürden alınan çalışmadaki deneysel ve/veya sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen birleşimlerin yük taşıma kapasiteleri moment – dönme, moment – kayma dönmesi, göçme modu karşılaştırmalarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Sadece Örnek 1 için moment – dönme ve moment – kayma dönmesi eğrilerinin doğrusal kısmında ufak uyumsuzluklar görülmektedir. Bunun nedeninin sonlu eleman ağının yoğunluğu, sonlu eleman tipi, parçalar arasındaki temas durumu tipi gibi nedenler olabileceği düşünülmektedir.

DBYBHY-2007'DE BELİRTİLEN MOMENT AKTARAN ÇELİK BİRLEŞİMLERİN ANALİZİ

5.1 Birleşimlerin Analize Hazırlanması

5.1.1 Birleşimlerin Geometrik Detayları

Bu tez kapsamında, DBYBHY-2007'de belirlenen 6 adet moment aktaran çelik kolon – kiriş birleşimlerinin modellemeleri yapılmaktadır. Birleşimler aynı malzeme özellikleri, kesitler, kiriş açıklıkları kullanılarak FEMA-350'ye göre boyutlandırılmaktadır. Birleşimlerdeki kolon için 2,5 m uzunluğunda HE240B profil, kiriş için ise 1,4 m uzunluğunda IPE270 profil kullanılmaktadır. Konsol kiriş üzerindeki yükleme noktasının kolon yüzüne olan uzaklığı 1,2 m olarak alınmaktadır. Birleşimlerdeki kolon ve kiriş uzunlukları ile sınır şartları Şekil 5.1'de gösterilmektedir.

Takviyesiz alın levhalı bulonlu (TSALB) birleşim, kiriş başlıkları ve gövdesine kaynak ile, kolon başlığına 8 adet M20 bulon ile bağlanan 30 mm kalınlığında alın levhasından oluşmaktadır.

Takviyeli alın levhalı bulonlu (TALB) birleşim, kiriş başlıkları ve gövdesine kaynak ile, kolon başlığına 16 adet M16 bulon ile bağlanan 40 mm kalınlığında alın levhasından ve kiriş gövdesinin hizası itibarıyla kirişin altındaki ve üstündeki takviye levhalarından oluşmaktadır.

Alın levhasız bulonlu (ALB) birleşim, kiriş başlığına 12 adet M12 bulon ile, kolon başlığına kaynak ile bağlanan 2 adet başlık levhası ve kiriş gövdesine 3 adet M16 bulon ile, kolon başlığına kaynak ile bağlanan gövde levhasından oluşmaktadır.

Kaynaklı birleşimde kiriş başlıkları kolon başlığına kaynak ile birleştirilmektedir. Kiriş gövdesinde 8 mm kalınlığında bir kayma levhası kullanılmaktadır.

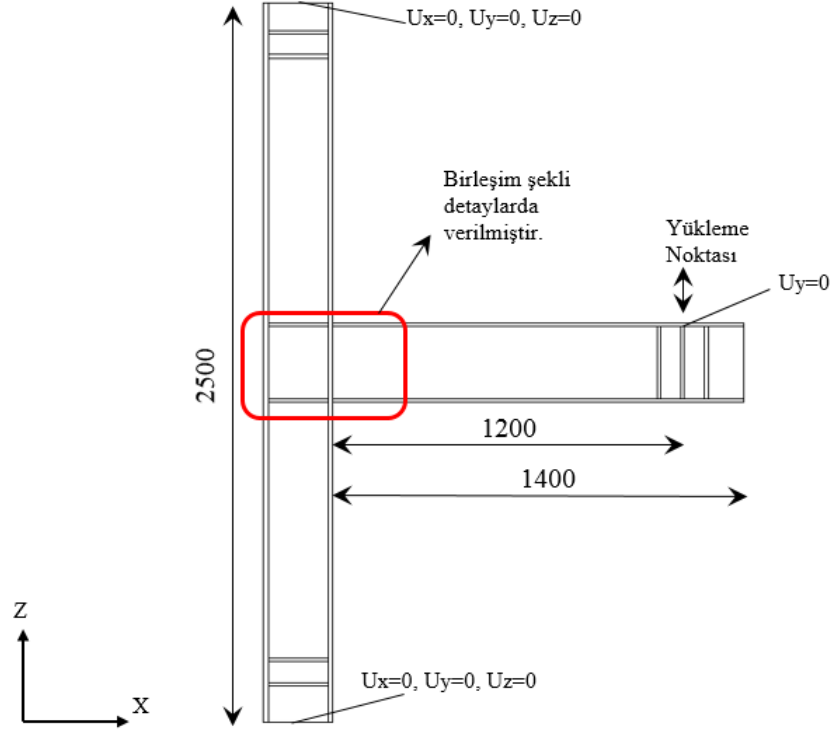
Ek başlık levhali kaynaklı (EBLK) birleşimde kiriş başlıkları ve gövdesi kolon başlığına levhalar ile bağlanmaktadır. Kullanılan başlık levhaları 14 mm, gövde levhası ise 8 mm kalınlığındadır.

Zayıflatılmış kiriş enkesiti kaynaklı (ZKEK) birleşimin detayı kaynaklı birleşim detayı gibidir. Bu birleşimde kiriş başlıkları her iki yandan kolon yüzüne belirli bir uzaklıktan zayıflatılmaktadır.

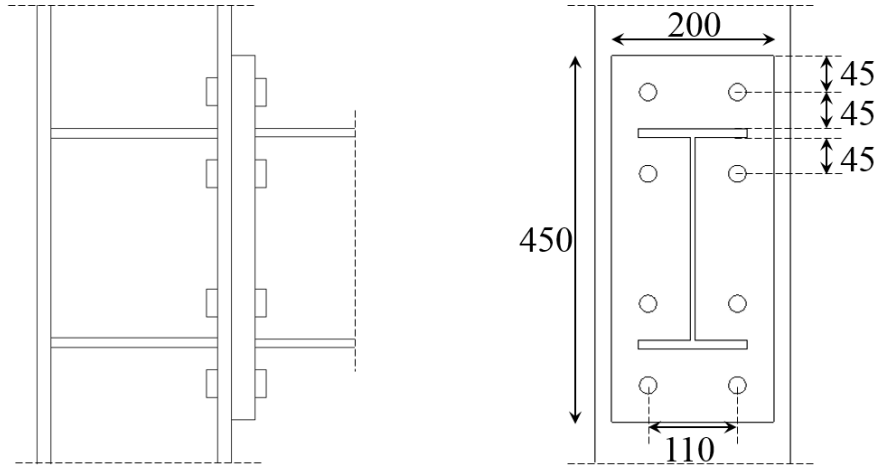
Alın levhali birleşimler dışındaki birleşimlerde kiriş gövdesi ile kolon başlığı arasındaki boşluk 10 mm alınmaktadır. Kolon ve kiriş gövdelerinde kullanılan levhaların kalınlıkları 12 mm olarak alınmaktadır. Birleşimlerin detayları Şekil 5.2 – Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Kaynaklı ve ZKEK birleşimlerinde kullanılan kaynak ulaşım deliğinin detayı Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

Sonlu elemanlar modellerini basitleştirebilmek için, somunlar silindirik biçimde modellenmiş olup somunların altındaki pullar dikkate alınmamaktadır. Ayrıca kolon ve kiriş profillerinin de boyun kısımlarındaki eğrisel geçişler dikkate alınmadan başlıklar ve gövde kısımları dikdörtgen olarak modellenmektedir.

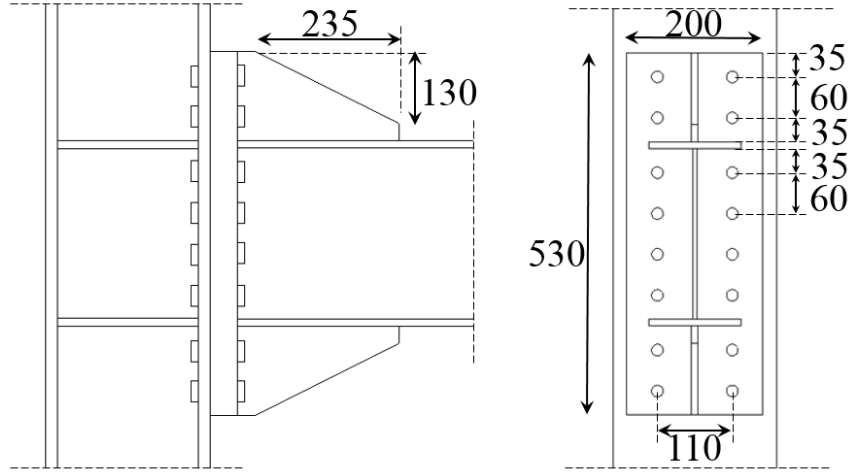
ALB birleşimin FEMA-350’de belirtildiği tasarım sürecinde kolon başlık hizasında, belirli yük taşıma kaybı mekanizmaları başlangıcına karşı gelen moment değeri (M_g), kolon başlık hizasında, kiriş başlığının akmasının başlangıcına karşı gelen moment değerinin (M_{yf}) 1,2 katı olmalıdır. Burada, kontrol edilen yük kaybı mekanizmaları şunlardır: Bulonların makaslanma suretiyle kesilmesi, birleşim levhası faydalı kesit yırtılması, kiriş başlığı faydalı kesit yırtılması, bulon deliklerindeki kiriş boyuna eksenî doğrultusundaki genişleme. Bu kontrollerden kiriş başlığı faydalı kesit yırtılması kontrolünde moment değeri $M_g=217,91$ kNm olmakta, buna karşılık M_{yf} değerinin 1,2 katı ise 211,59 kNm bulunmaktadır. Buradaki hata oranı %1,03 olup bu oranın çok küçük olduğu ve ihmal edilebilir olduğu kabul edilmektedir.



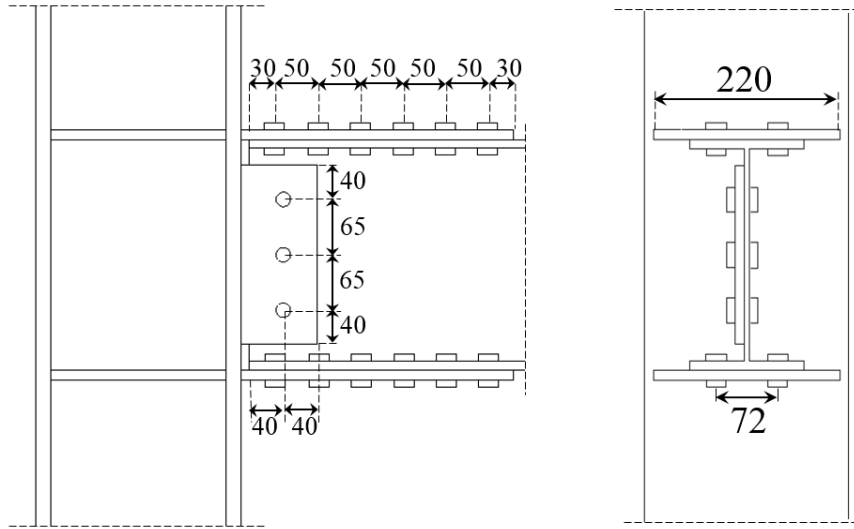
Şekil 5. 1 Birleşimlerdeki kolon ve kiriş uzunlukları ile sınır şartları



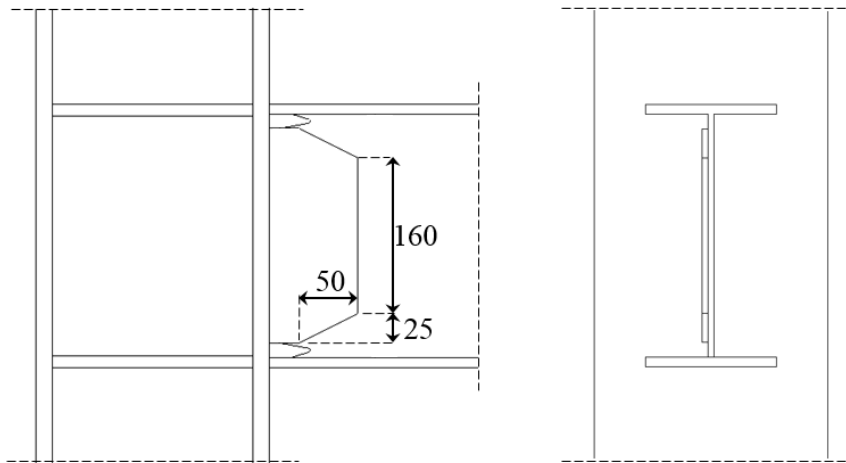
Şekil 5. 2 TSALB birleşim detayı



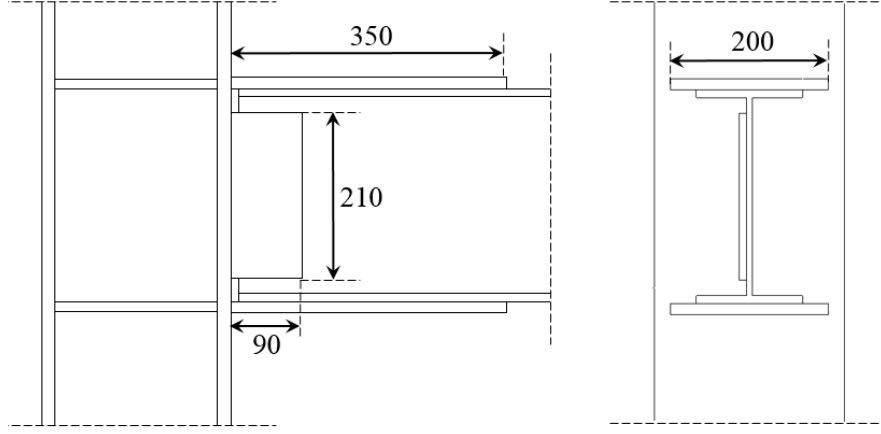
Şekil 5. 3 TALB birleşim detayı



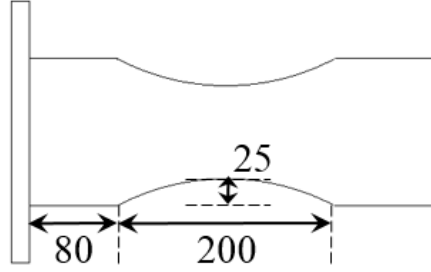
Şekil 5. 4 ALB birleşim detayı



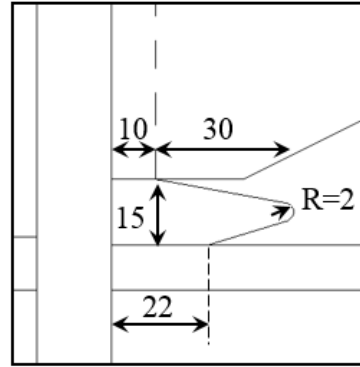
Şekil 5. 5 Kaynaklı birleşim detayı



Şekil 5. 6 EBLK birleşim detayı



Şekil 5. 7 ZKEK birleşimin kiriş detayı

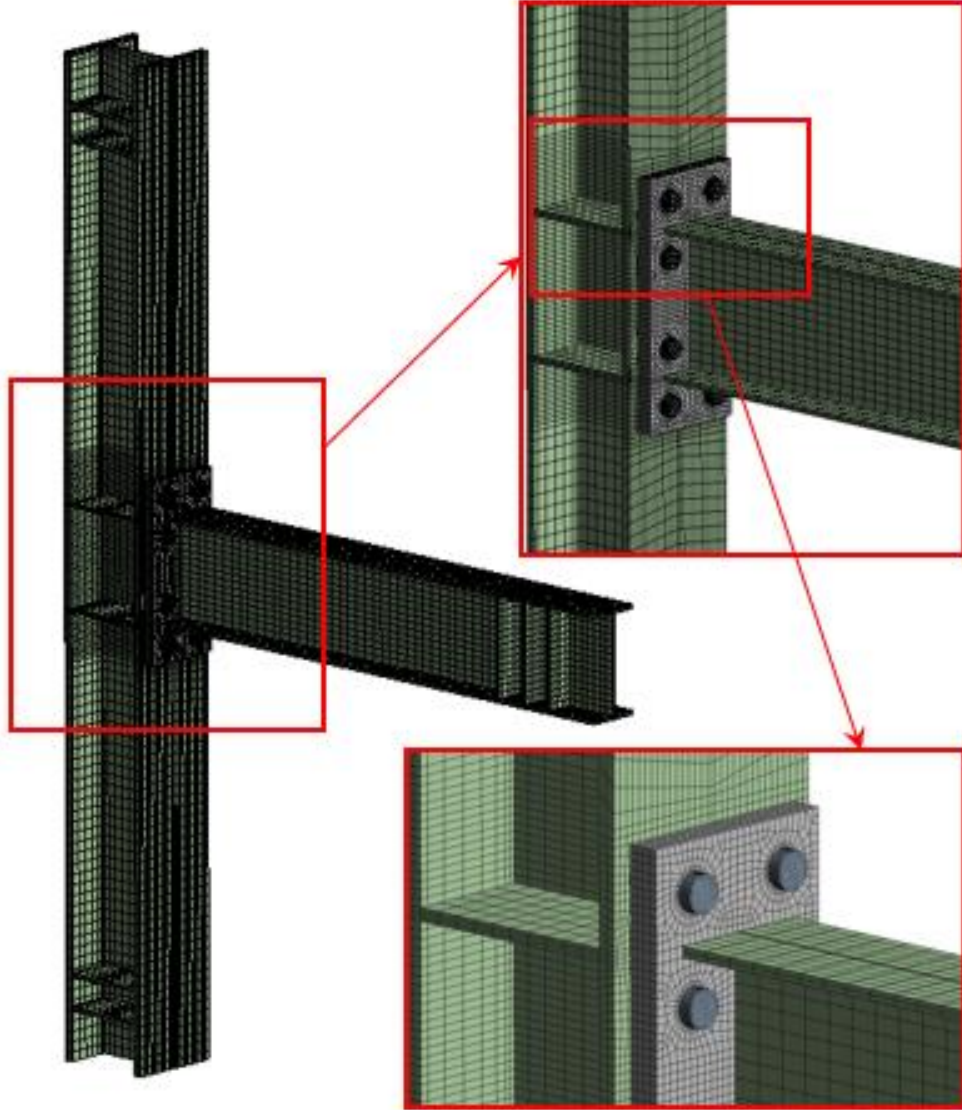


Şekil 5. 8 Kaynaklı ve ZKEK birleşimlerin kaynak ulaşım deliği detayı

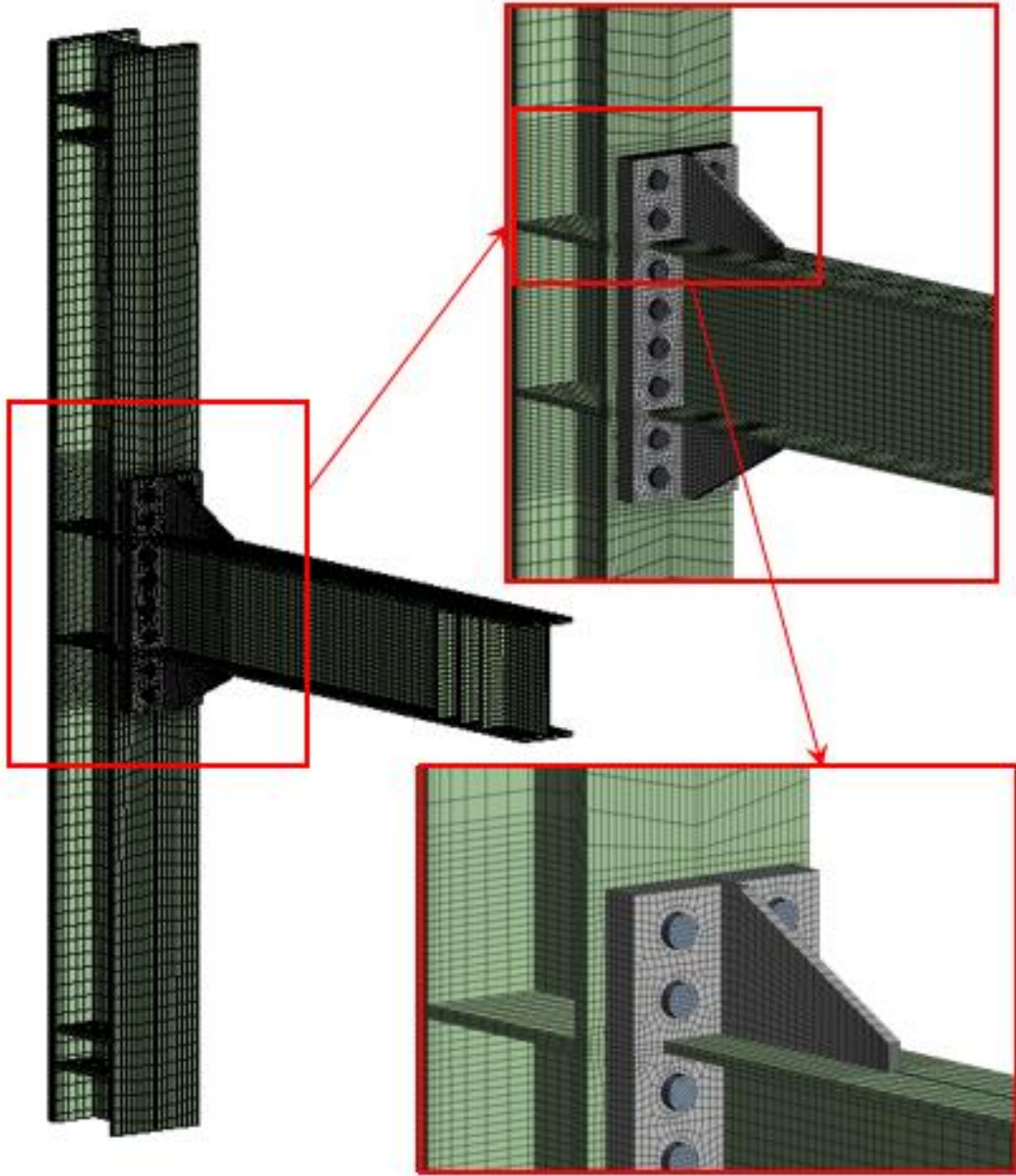
5.1.2 Sonlu Eleman Modelleri

Daha önceki bölümlerde olduğu gibi burada da mümkün olduğunca 6 yüzlü bir eleman olan “SOLID186” elemanı kullanılmaktadır. Gerilme dağılımının önemli olduğu bulon, delik çevreleri gibi bölgelerde daha hassas sonuç elde edebilmek için daha küçük boyutlu elemanlar kullanılmaktadır. Sonlu eleman ağı yoğunluğunu arttırmak daha hassas sonuçlar elde edilmesini sağlamasına rağmen analiz süresi uzamaktadır. Bunun için en ideal sonlu eleman ağı yoğunluğu araştırılmaktadır. Her bir birleşim için monotonik

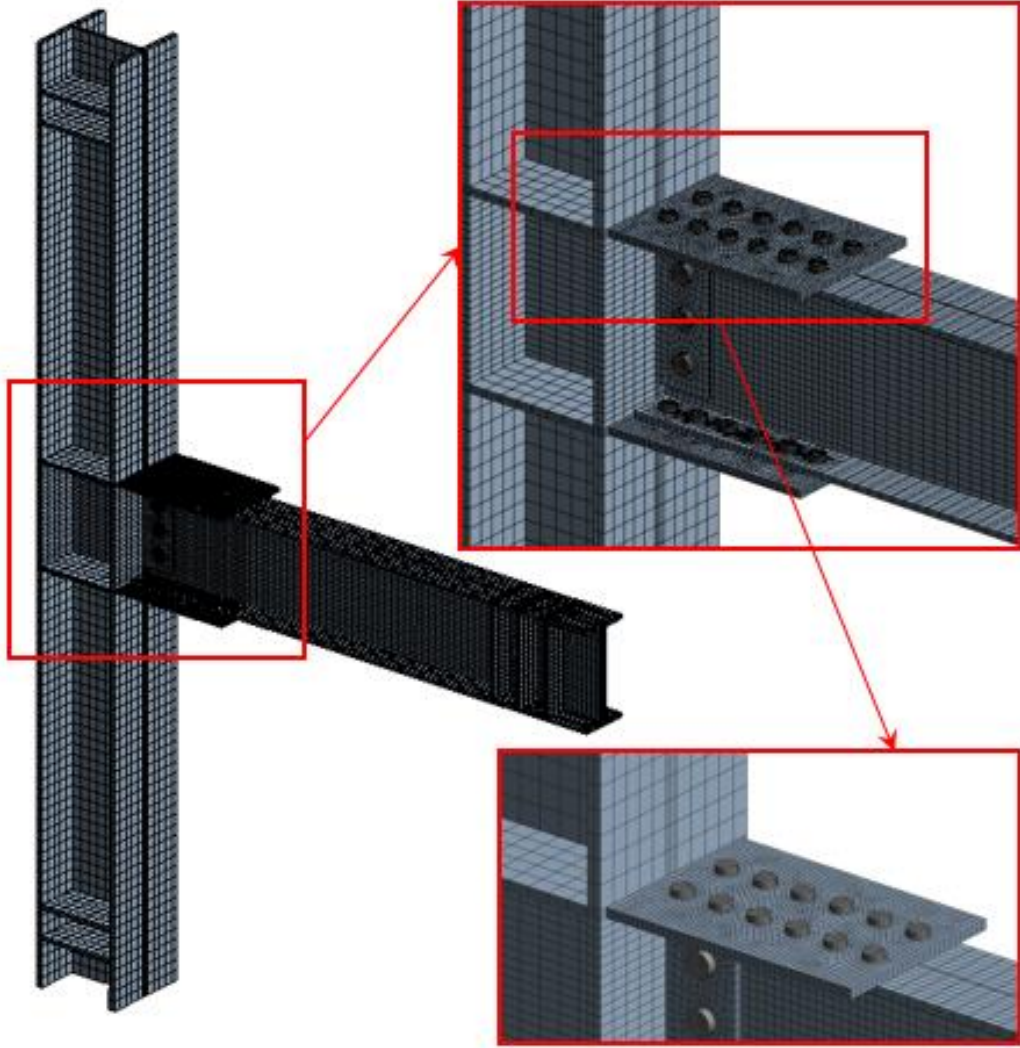
yüklemeye altında en az 3 kez sonlu eleman ağı yoğunluğu değiştirilerek analizler tekrarlanmakta ve sonrasında birleşimlerdeki parçalarda eş değer (von-Mises) gerilme değerlerine bakılmaktadır. Tekrarlanan analizlerdeki parçaların eş değer gerilme değerleri bir önceki analize göre yaklaşık %5 değişmişse, bu sonlu eleman ağının yeterli olduğu kabul edilmektedir. Sonlu eleman ağı yoğunluğunu değiştirmek için parçaların kalınlığı ve/veya uzunluğu boyunca olan eleman sayıları, deliklerin çevrelerindeki ağı yoğunlukları ve doğrusal olmayan temas durumları arasındaki teması modelleyen ara elemanların sıklığı ayarlanmaktadır. Monotonik yüklemeye altında elde edilen sonlu eleman ağı yoğunlukları, çevrimsel yüklemeye altındaki analizlerde de aynen kullanılmıştır. Birleşimlerin sonlu eleman ağları Şekil 5.9 – Şekil 5.14’de gösterilmektedir. Ayrıca Çizelge 5.1’de birleşimlerdeki eleman ve düğüm noktası sayıları verilmektedir.



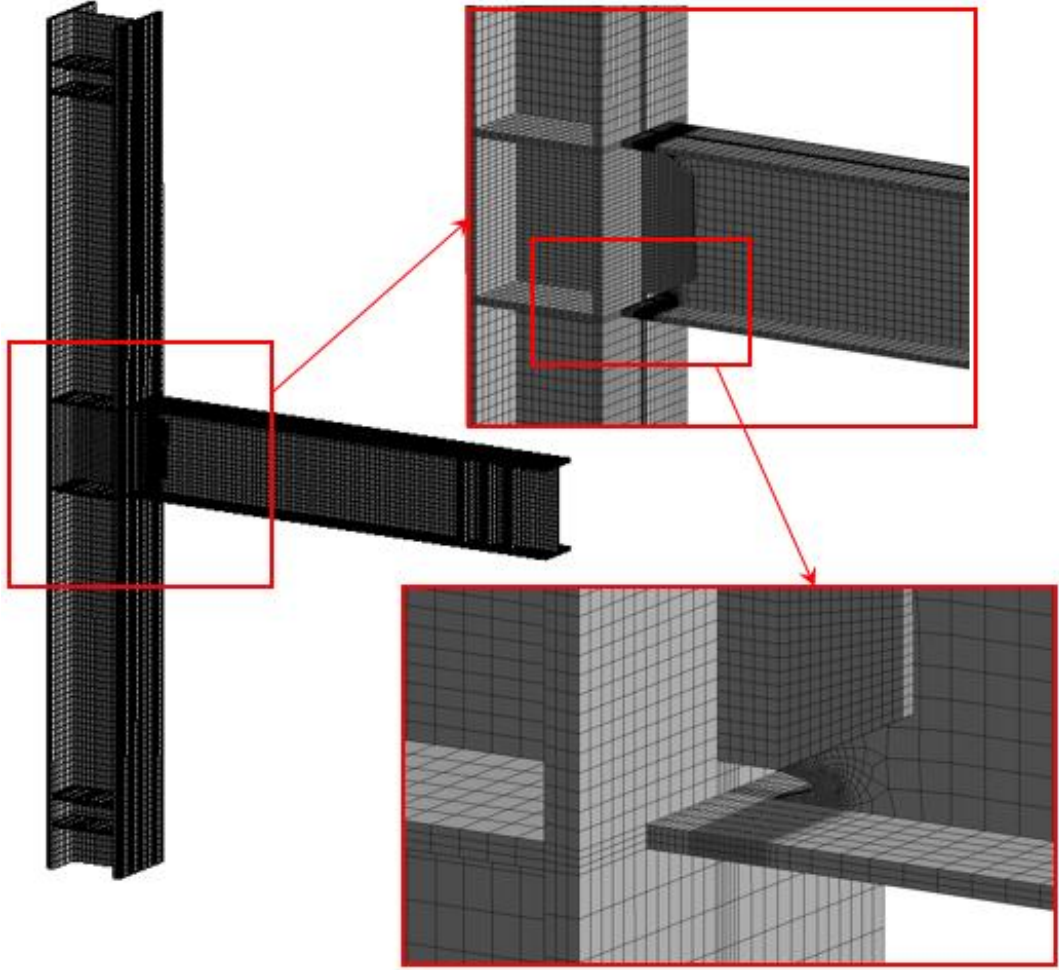
Şekil 5. 9 TSALB birleşimin sonlu eleman ağı



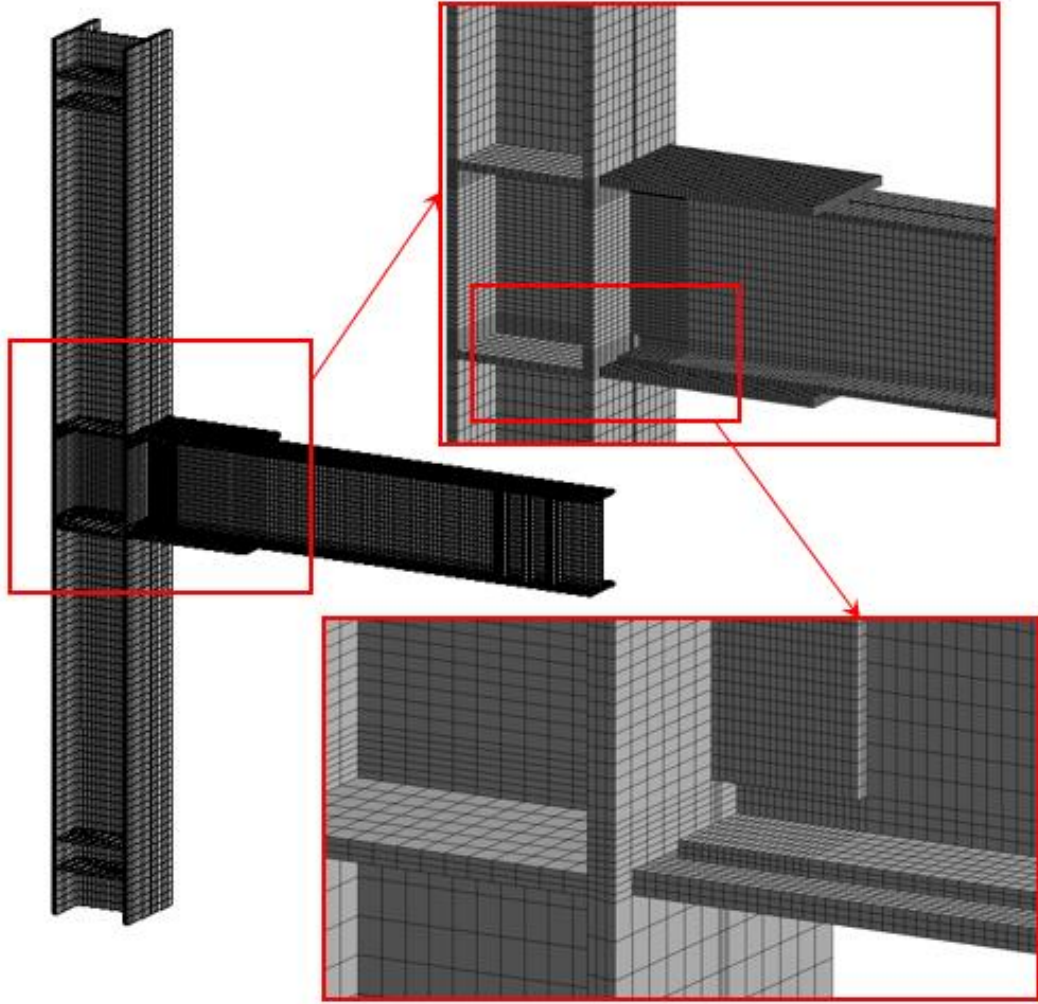
Şekil 5. 10 TALB birleşimin sonlu eleman ağı



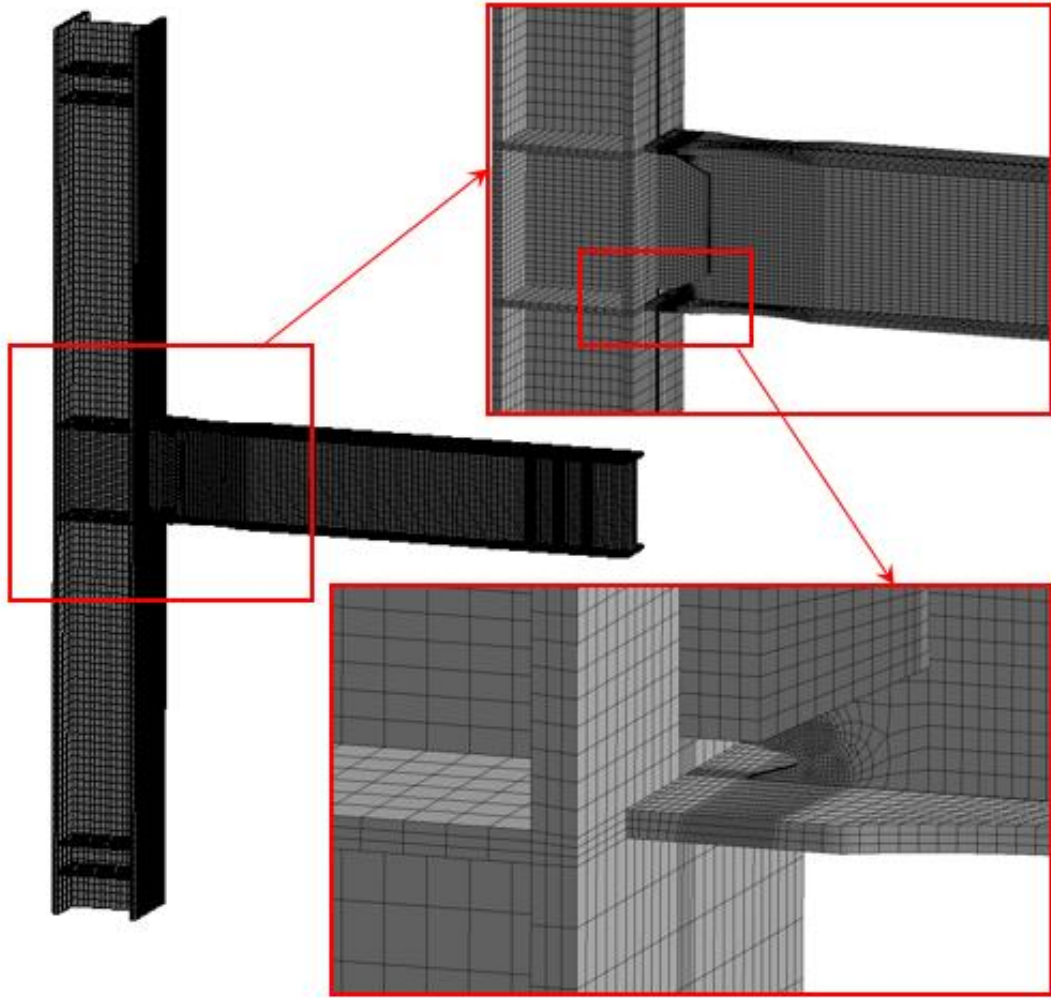
Şekil 5. 11 ALB birleşimin sonlu eleman ağı



Şekil 5. 12 Kaynaklı birleşimin sonlu eleman ağı



Şekil 5. 13 EBLK birleşimin sonlu eleman ağı



Şekil 5. 14 ZKEK birleşimin sonlu eleman ağı

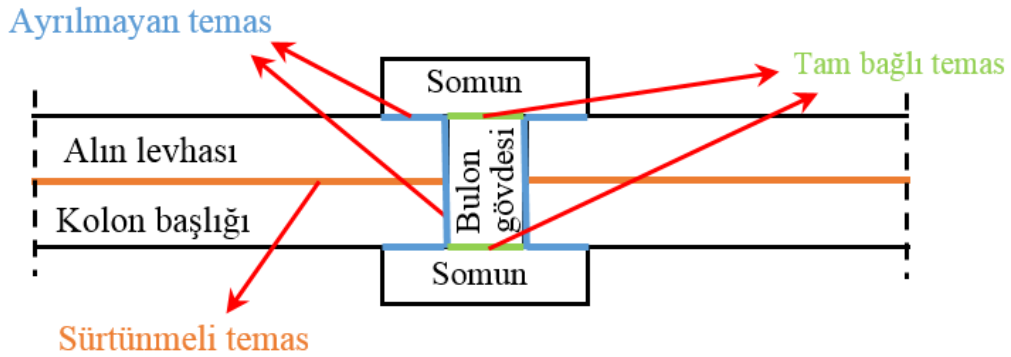
Çizelge 5. 1 Birleşimlerin sonlu eleman modellerindeki eleman ve düğüm noktası sayıları

Birleşim	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
TSALB	53832	288723
TALB	73392	384848
ALB	85809	411522
Kaynaklı	59154	296077
EBLK	55734	289864
ZKEK	61160	307549

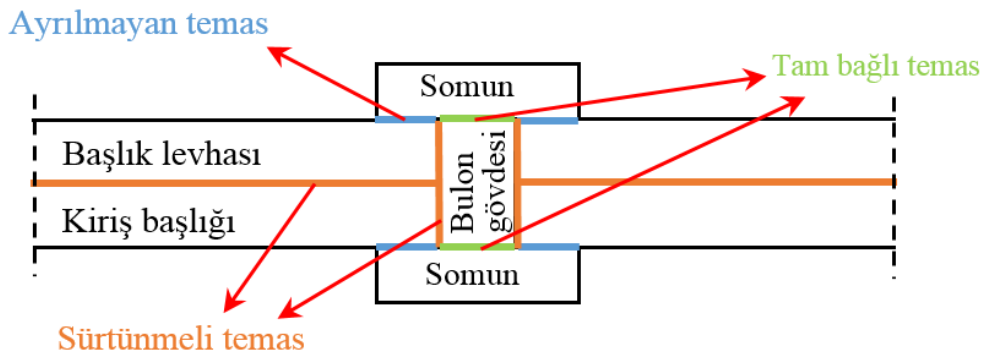
5.1.3 Temas Özellikleri

Kolon – kiriş birleşimleri kolon, kiriş, levha, (varsa) bulon gibi parçalardan meydana gelmektedir. Bu parçaların birbirlerine etkileşimleri söz konusudur. Bu etkileşimleri dikkate almak için, doğrusal veya doğrusal olmayan temas özellikleri, gerçeğe en uygun şekilde dikkate alınmaya çalışılmaktadır.

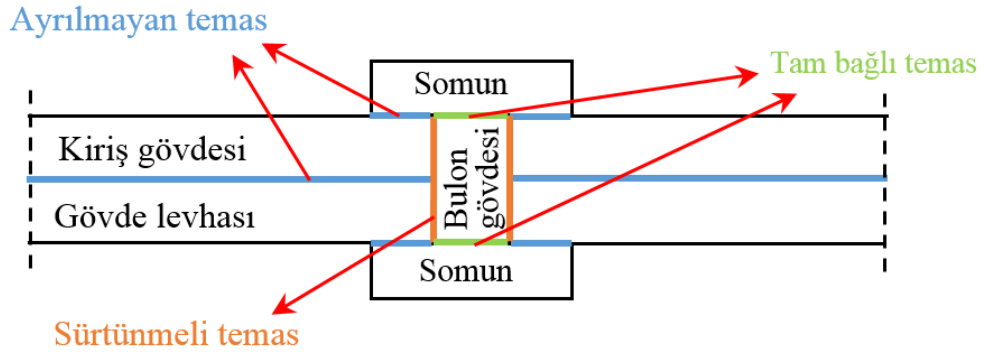
Alın levhali birleşimlerin temas özellikleri bir önceki bölümdeki gibi alınmaktadır. Alın levhasız birleşimde, bulonlar kiriş başlıklarında ve gövdesinde olması ve bu bulonların da eksenlerine dik doğrultularında kuvvete maruz kalmalarından ötürü, bu bulonlar deliklerinden ayrılabilir. Bu yüzden, bu birleşimdeki bulonlar ile delikler arasındaki temas durumları, parçaların normali doğrultusunda ayrılabilirler şeklinde dikkate alınmaktadır. Bulonlu birleşimlerin temas özellikleri Şekil 5.15 – Şekil 5.17’de gösterilmektedir. Alın levhali birleşimlerdeki kolon başlığı ile alın levhası arasındaki ve alın levhasız birleşimdeki başlık levhası ile kiriş başlığı arasındaki sürtünme katsayısı 0,44 olarak, alın levhasız birleşimde bulon gövdesi ile delikler arasındaki sürtünme katsayısı 0,2 olarak dikkate alınmaktadır. Kaynaklı birleşimlerde parçalar arasındaki bütün temas durumları Tam bağlı (Bonded) temas olarak dikkate alınmaktadır.



Şekil 5. 15 Alın levhali birleşimlerin temas özellikleri



Şekil 5. 16 Alın levhasız birleşimin başlıklarındaki temas özellikleri



Şekil 5. 17 Alın levhasız birleşimin gövdesindeki temas özellikleri

5.1.4 Yükleme

Birleşimler hem monotonik hem de çevrimsel yükleme altında analiz edilmektedir. Monotonik yükleme için konsol kiriş üzerindeki yükleme noktasına düşey doğrultuda yer çekimi yönünde 150 mm'lik yer değiştirme uygulanmaktadır. Çevrimsel yükleme için aynı noktaya Şekil 5.18'de gösterilen FEMA-350'den alınan 72 adımlık bir yükleme protokolü uygulanmaktadır. Çizelge 5.2'de ise uygulanması gereken kat öteleme açısı için kiriş yükleme noktasından uygulanan yer değiştirme değerleri verilmektedir.

Bulonlu birleşimlerde, bu yüklemelerden önce bulonlara öngerilme yükü uygulanmaktadır. Bu durumda, bulonlu birleşimler için monotonik yükleme 2 adımdan, çevrimsel yükleme 73 adımdan meydana gelirken, kaynaklı birleşimler için monotonik yükleme 1 adım, çevrimsel yükleme 72 adımdan meydana gelmektedir. Bulonlu birleşimlerde öngerilme değerleri M20 bulon için 160 kN, M16 bulon için 100 kN, M12 bulon için 50 kN olarak alınmaktadır [13]. Alın levhasız birleşimin gövde bulonlarında öngerilme yükü bulunmamaktadır.

5.1.5 Malzeme Özellikleri

Birleşimlerde FEMA-350’de belirlenmiş olan izin verilen malzemeler kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar analizlerinde doğrusal olmayan malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Kullanılan malzemeler ve gerilme – şekil değiştirme değerleri Çizelge 5.3’te verilmektedir. Bütün malzemeler için poisson oranı 0,3 olarak alınmaktadır. Monotonik yükleme analizlerinde izotropik pekleşme, çevrimsel yükleme analizlerinde ise kinematik pekleşme kuralları uygulanmaktadır [55].

Çizelge 5. 3 Kullanılan malzemeler ile gerilme ve şekil değiştirme değerleri [32]

Malzeme	Kullanıldığı Parça	Gerilme (MPa)	Şekil Değiştirme
ASTM A490	Bulon	794	0,00386
		1035	0,0135
		1035	0,0309
		1048	0,2
ASTM A36	Alın levhası ve alın levhası takviye levhası	262	0,001276
		262	0,01403
		476	0,153
ASTM A572 50 Sınıfı	Diğer parçalar	361	0,00178
		361	0,0196
		488	0,2134

5.1.6 Analiz Ayarları

Birleşimlerin analizleri doğrusal olmayan malzeme, doğrusal olmayan geometri değişimi ve kaynaklı birleşimler için sadece doğrusal, bulonlu birleşimler için doğrusal veya doğrusal olmayan temas özelliklerine göre yapılmaktadır. Bu durumda, her bir yükleme adımı en az 25 alt adıma bölünmektedir. Böylece, doğrusal olmayan analizden dolayı yükler tek seferde yüklenmek yerine adım adım yüklenmektedir.

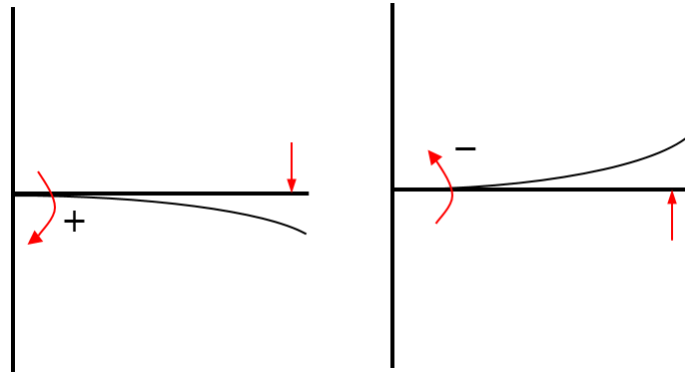
5.2 Sonlu Eleman Çözümlemelerinin İncelenmesi

Modellemeleri yapılan birleşimlerin analizleri monotonik ve çevrimsel yükleme altında ANSYS Workbench Sonlu Elemanlar analiz programı yardımı ile yapılmaktadır [55]. Analiz sonucunda birleşimlerin değerlendirilmesinde hasar durumları, eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları, kiriş üzerindeki yükleme noktasına etki eden yük değerleri, kuvvet - yer değiştirme eğrileri, moment – dönme eğrileri, başlangıç dönme rijitlikleri, enerji tüketme kapasiteleri, rijitlik azalım eğrileri ve bulonlu birleşimlerde bulonlardaki en büyük eş değer (von-Mises) gerilme değerleri kullanılmaktadır. Analizleri yapılan bulonlu ve kaynaklı birleşimler önce kendi aralarında incelenerek, bu karşılaştırmalarda öne çıkan birleşimler daha sonra birbirleriyle karşılaştırılmaktadır.

5.2.1 Sonuçların Elde Edilmesi

5.2.1.1 Moment ve Dönme Değerlerinin Hesaplanması

Birleşimler monotonik yükleme altında sadece aşağı yönde bir kuvvete maruz kalmaktadır. Çevrimsel yükleme altında ise önce yukarı yönde, sonra aşağı yönde kuvvete maruz kalmaktadır. Moment ve dönme değerlerinin elde edilmesinde kuvvetin aşağı yönde etki etmesi durumu pozitif, yukarı yönde etki etmesi durumunda negatif olduğu kabul edilmektedir. Pozitif ve negatif yönler Şekil 5.19’da gösterilmektedir.



Şekil 5. 19 Moment ve dönme hesabında pozitif ve negatif yönler

Birleşimlerin taşıdığı moment değerleri, kiriş yükleme noktası üzerindeki kuvvet değeri ile bu noktanın kolon yüzüne çarpımı ile elde edilmektedir. Birleşimlerdeki dönme değerleri ise, yükleme noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesinin, bu noktanın kolon eksenine uzaklığına bölünmesi ile elde edilmektedir [25].

5.2.1.2 Tüketilen Enerji Miktarının Hesaplanması

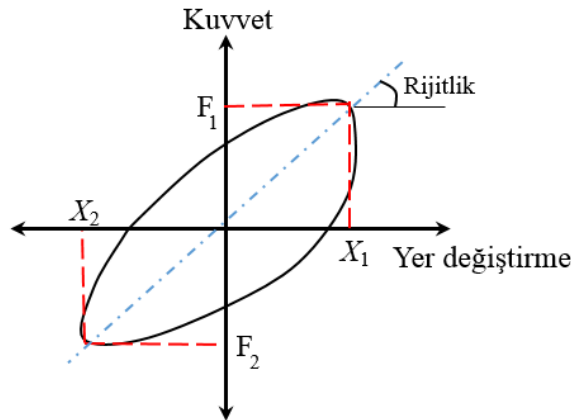
Çevrimsel yükleme uygulanan birleşimlerin tükettiği enerji miktarları Kuvvet – Yer Değiştirme eğrisinin kapladığı alan ile hesaplanmaktadır. Analizin başından sonuna kadar her bir çevrim için bu eğrilerin kapladığı alan hesaplanmaktadır. İlgili çevrimde birleşimin tükettiği toplam enerji miktarını bulmak için ilgili çevrimin ve ondan önceki çevrimlerin alanları toplanmaktadır. Birleşimlerin analizin başından sonuna kadar ve göçme mekanizması oluşuncaya kadar olan tüketilen enerji miktarları her dönme değeri için hesaplanmış olup, grafik üzerinde gösterilmektedir.

5.2.1.3 Başlangıç Dönme Rijitliklerinin Hesaplanması

Birleşimlerin başlangıç dönme rijitlikleri, birleşimin akmaya başladığı andaki moment değerinin dönme değerine bölünmesi ile elde edilmektedir [32].

5.2.1.4 Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Çevrimsel yükleme altındaki birleşimlerin rijitliklerinde ilerleyen her çevrimde azalma olmaktadır. Her bir birleşim analiz başlangıcından sonuna kadar rijitlik azalım grafiği çizdirilmektedir. Bir tam çevrimdeki rijitlik değeri, ilgili çevrimde birleşimin taşıdığı yük değerinin, yükleme noktası düşey yer değiştirme değerine bölünmesiyle elde edilmektedir [35]. Bu durum Şekil 5.20’de gösterilmekte olup, rijitlik bağıntısı Eşitlik (5.1)’de verilmektedir [35].



Şekil 5. 20 Birleşimlerin rijitliklerinin belirlenmesi

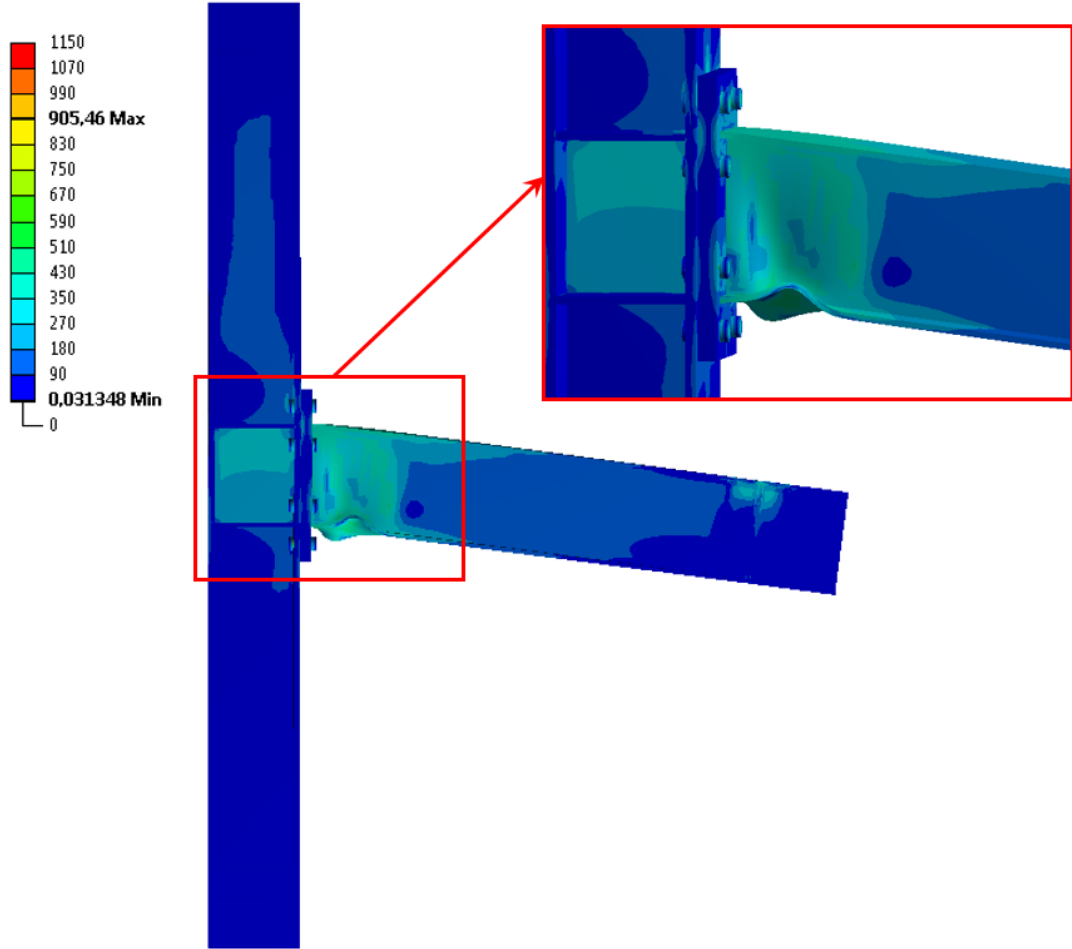
$$Rijitlik = \frac{|F_1| + |F_2|}{|X_1| + |X_2|} \quad (5.1)$$

5.2.2 Bulonlu Birleşimler

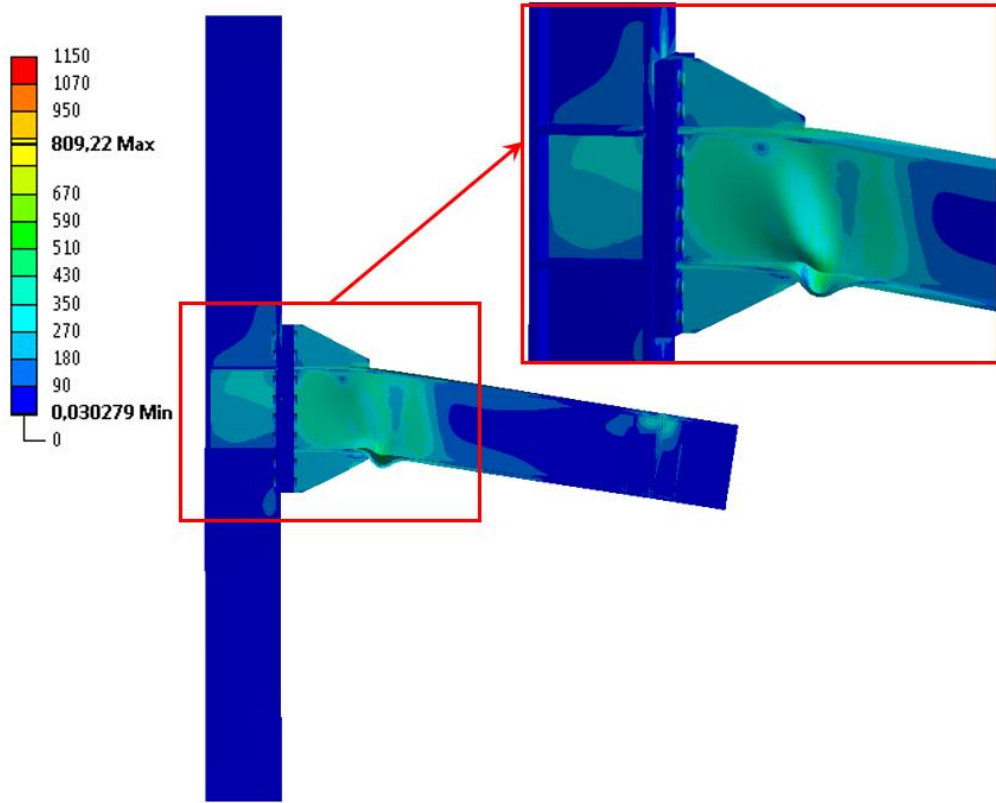
Bu bölümde takviyesiz alın levhalı bulonlu (TSALB) birleşim örneği, takviyeli alın levhalı bulonlu (TALB) birleşim örneği ve alın levhasız bulonlu (ALB) birleşim örneği analizlerinden elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

5.2.2.1 Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri

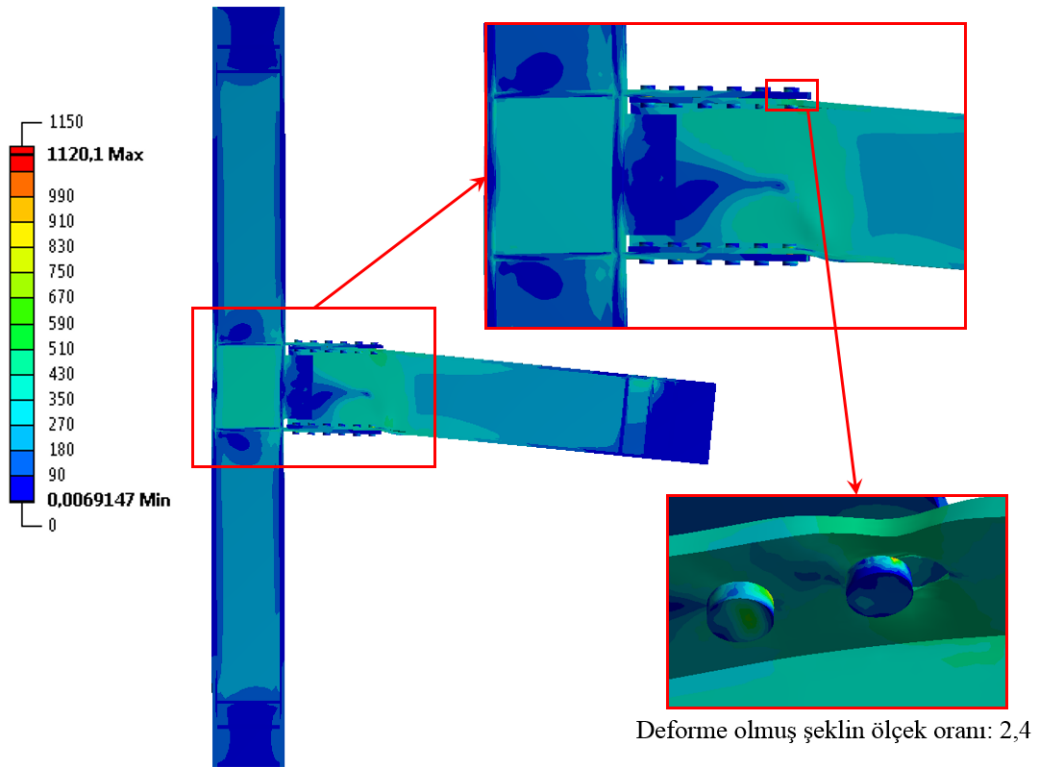
Her bir birleşimin monotonik ve çevrimsel yükleme altında analizi yapılmaktadır. Monotonik yüklemede kiriş üzerindeki yükleme noktasına yer çekimi yönünde 150 mm'lik yer değiştirme uygulanmaktadır. TSALB ve TALB birleşim örnekleri bu yer değiştirme değerine kadar ulaşabilirken, ALB birleşim örneği 102 mm yer değiştirme değerine ulaştığı anda yükü taşıyamaz duruma gelmektedir. Çevrimsel yükleme analizinde yükleme noktasına uygulanan yetmiş iki adımlık yüklemenin en büyük yer değiştirme değeri 92,4 mm'dir. TSALB ve TALB birleşim örnekleri bu çevrimsel yüklemeyi tamamlayabilirken, ALB birleşim örneği yüklemenin elli dokuzuncu adımında yükü taşıyamaz duruma gelmektedir. TSALB ve TALB birleşim örneklerinde hasar durumları birleşimden uzakta, kiriş başlıkları ve gövdesinde burkulma ile meydana gelirken, ALB birleşim örneğinde kolon yüzünden en uzakta olan bulon sırasındaki kiriş başlığında yırtılma ile meydana gelmektedir. Şekil 5.21 – Şekil 5.23'te birleşimlerin monotonik yükleme altında, Şekil 5.24 – Şekil 5.26'da çevrimsel yükleme altında deforme olmuş şekilleri üzerinden eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları gösterilmektedir.



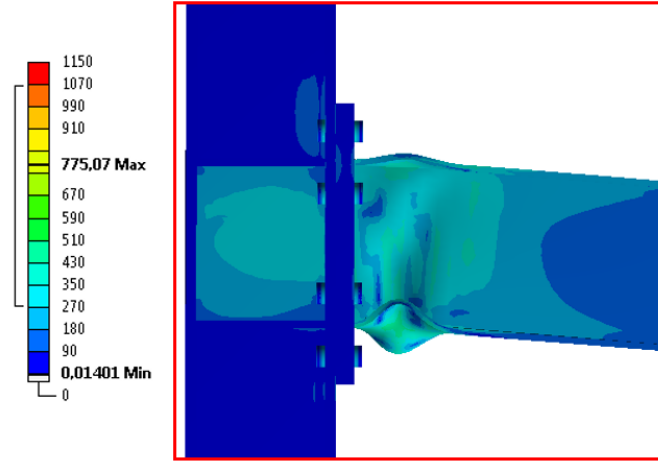
Şekil 5. 21 TSALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



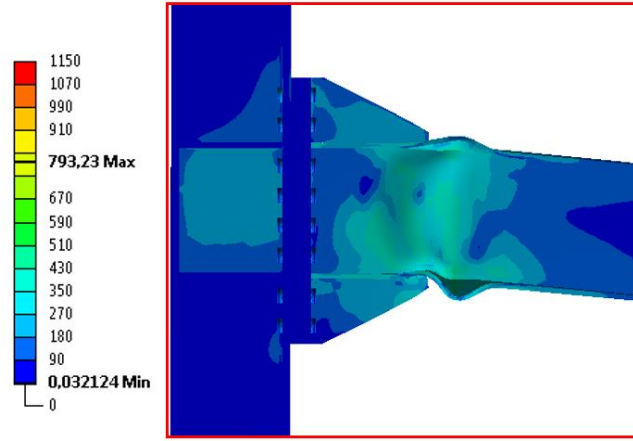
Şekil 5. 22 TALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



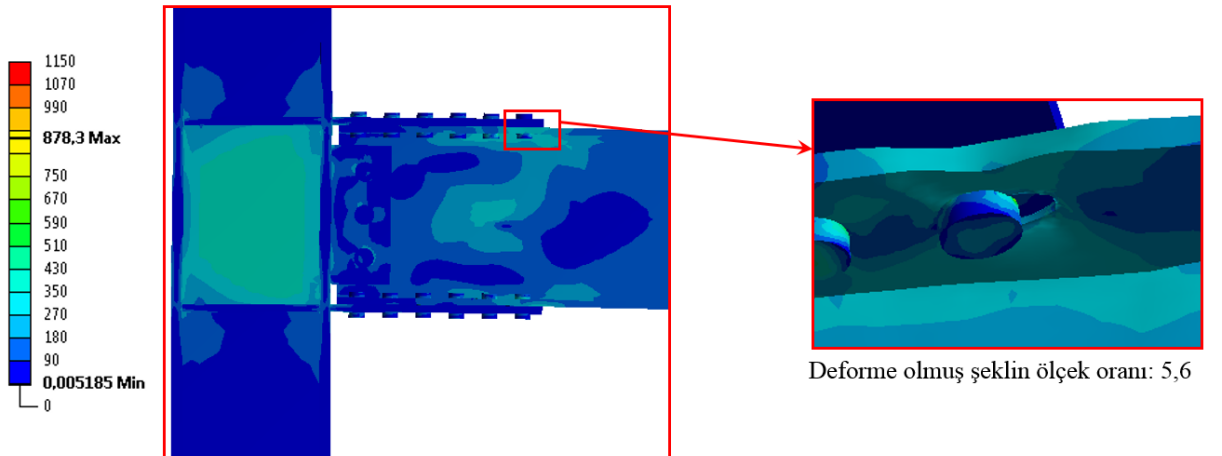
Şekil 5. 23 ALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



Şekil 5. 24 TSALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



Şekil 5. 25 TALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları

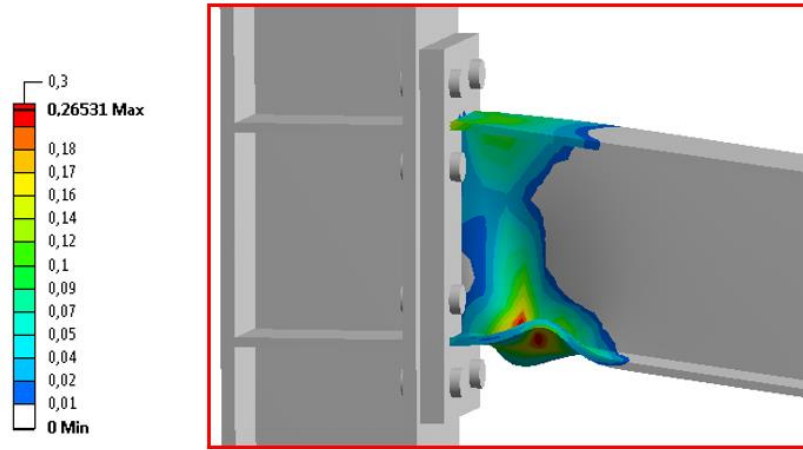


Şekil 5. 26 ALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları

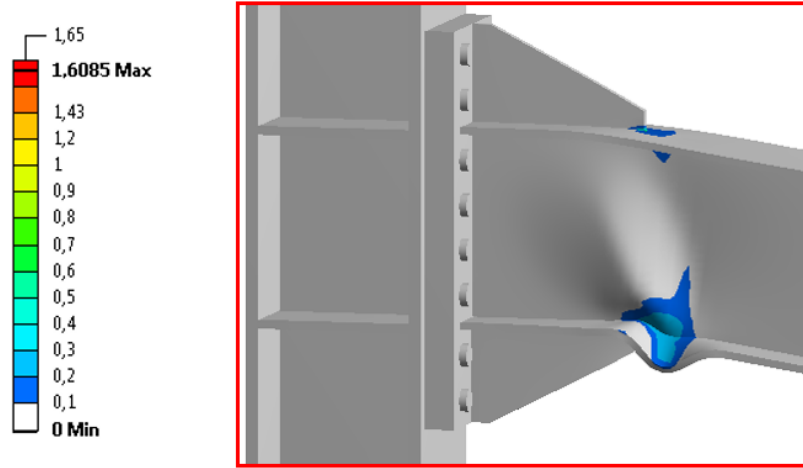
Şekil 5.21 – Şekil 5.23’te görüldüğü üzere, monotonik yükleme altında hasar ve plastik mafsall oluşma yerleri, TSALB birleşim örneğinde kiriş üzerinde alın levhasından yaklaşık 90 mm uzakta, TALB birleşim örneğinde alın levhası takviye levhasının bittiği yerde, ALB birleşim örneğinde son bulon sırasında meydana gelmektedir. Şekil 5.24 – Şekil 5.26’da görüldüğü üzere, çevrimsel yükleme altında ise TSALB birleşim örneğinde alın levhasından yaklaşık 75 mm uzakta, diğer birleşim örneklerinde monotonik yükleme altında meydana gelen yerde oluşmaktadır.

TSALB ve TALB birleşim örneklerinde monotonik yükleme altında kiriş başlıkları ve gövdesinde meydana gelen burkulmanın, çevrimsel yükleme altında meydana gelen burkulmadan daha az olduğu görülmektedir. Fakat ALB birleşim örneğinde bu durumun tam tersi görülmektedir.

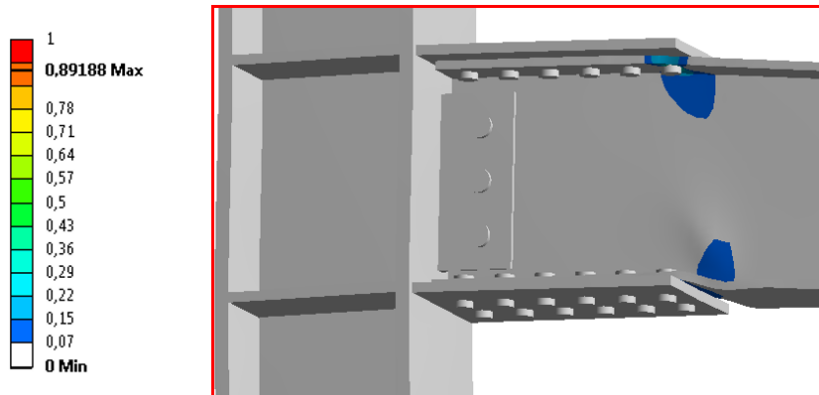
Birleşimlerdeki hasar durumunun incelenmesi ve plastik mafsall oluştuğu bölgenin tespiti için kullanılan bir diğer araç da eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımlarının incelenmesidir. Bu dağılımlar monotonik yükleme için Şekil 5.27 – Şekil 29’da, çevrimsel yükleme için Şekil 5.30 – Şekil 5.32’de gösterilmektedir. TSALB birleşim örneğinde bu dağılımda monotonik yükleme altında kiriş başlıklarından kiriş gövdesinin yaklaşık olarak ortasına kadar yaklaşık olarak doğrusal bir azalma görülürken, aynı birleşimde çevrimsel yükleme altında böyle bir durum görülmemektedir. Her iki yükleme altında TALB birleşim örneğinde bu dağılım daha çok takviye levhasının bittiği yerde görülürken, ALB birleşim örneğinde ise, kırılmanın olduğu yerde yani, kiriş üzerinde son bulon sırasında görülmektedir.



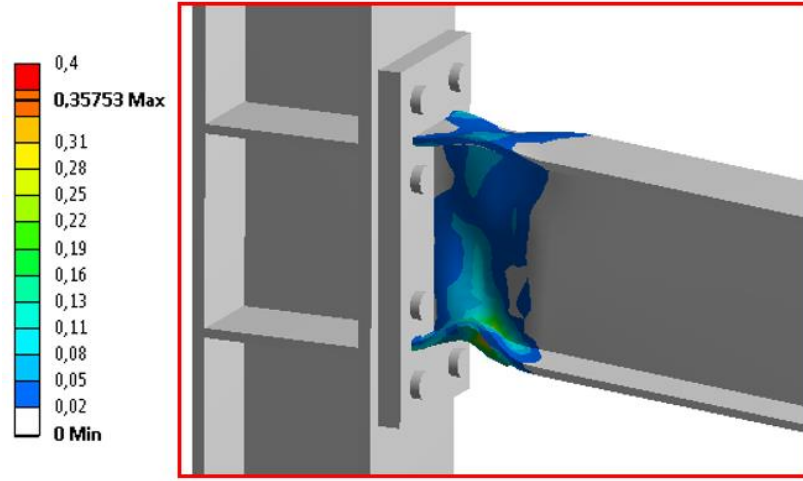
Şekil 5. 27 TSALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



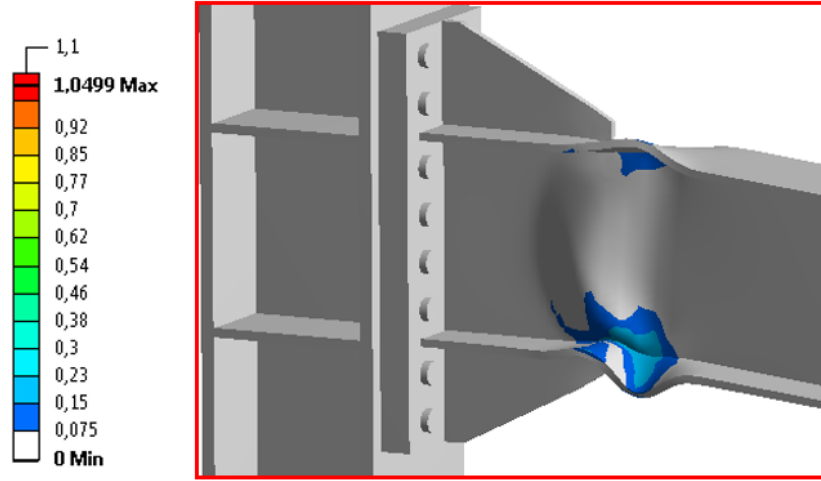
Şekil 5. 28 TALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



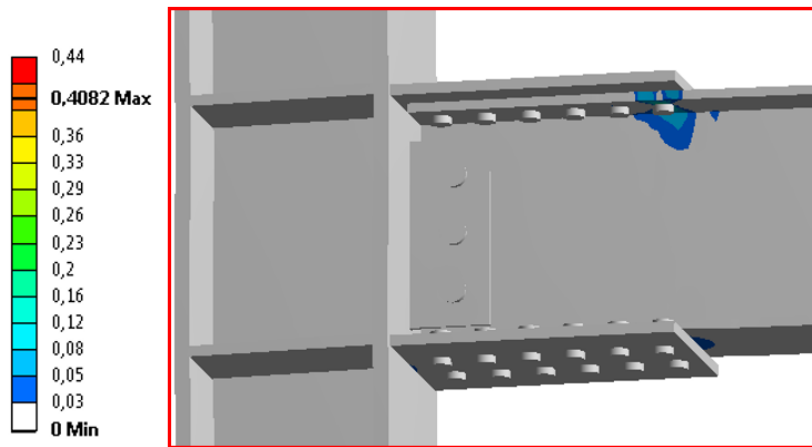
Şekil 5. 29 ALB birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



Şekil 5. 30 TSALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



Şekil 5. 31 TALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



Şekil 5. 32 ALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları

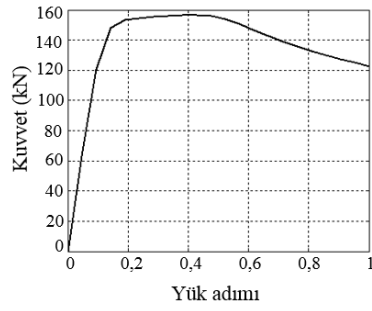
5.2.2.2 Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri

Birleşimlerin analizi için kiriş üzerine uygulanan yer değiştirme değerlerinin, aynı yerdeki tepki kuvvetleri monotonik yükleme için Şekil 5.33'te ve çevrimsel yükleme için Şekil 5.34'de gösterilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere, alın levhalı birleşim örneklerinde belli bir yük adımından sonra taşınan kuvvette azalma görülürken, ALB birleşim örneğinde, birleşim yük taşıyamaz duruma gelene kadar bir azalma görülmemektedir. Çevrimsel yükleme altında alın levhalı birleşim örneklerinde aynı yük adımında (56. adım) kuvvet taşıma değerinde azalma görülmüştür.

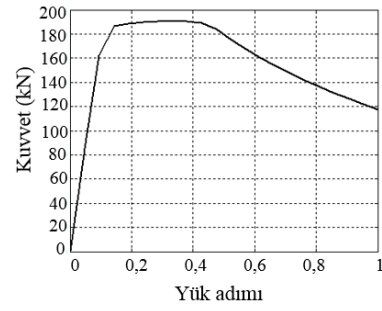
Birleşim örneklerinin taşıdığı kuvvet – yer değiştirme (yükleme noktasının) eğrileri ve bu eğrilerden elde edilmiş olan moment – dönme eğrileri her iki yükleme altındaki durumları için TSALB birleşim için Şekil 5.35'de, TALB birleşim için Şekil 5.36'da, ALB birleşim için Şekil 5.37'de verilmektedir.

FEMA-350'ye göre birleşimde herhangi bir göçme gözlemlenmese de eğer bir çevrimde elde edilen maksimum moment değeri, sistemin moment kapasitesinin %80'inin altına düşüyorsa, sistemde göçme meydana geldiği kabul edilmektedir. Alın levhalı birleşimler çevrimsel yükleme altında uygulanan 0,07 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini tamamlamış olsalar da, taşınan moment değerleri sistemin moment kapasitesinin %80'inin altına düşmektedir. Alın levhalı birleşimlerde bu durumun görüldüğü yerler, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'daki moment – dönme eğrilerinde kırmızı işaret ile gösterilmektedir. Ayrıca, Çizelge 5.4'de alın levhalı birleşim örneklerinin çevrimsel yükleme altında moment taşıma kapasitelerine ulaştığı andan sonra analiz sonlanana kadar her çevrimde elde edilen maksimum moment değerleri verilmektedir. TSALB birleşim örneğinde, analizin 0,05 radyan pozitif dönme değerinin ilk çevriminde moment taşıma kapasitesinin %80'inin altına düştüğü görülmektedir. TALB birleşim örneğinde ise, analizin 0,04 radyan negatif dönme değerinin ikinci çevriminde moment taşıma kapasitesinin %80'inin altına düştüğü görülmektedir. Söz konusu her iki birleşimde de sistemin moment kapasitesine 0,03 radyan dönme değerinde ulaşılmaktadır. Bu durumda TSABL birleşim örneğinin maksimum moment kapasitesine ulaştıktan 0,02 radyan dönme değerinden sonra, TALB birleşim örneğinin ise maksimum moment kapasitesine ulaştıktan 0,01 radyan dönme değerinden sonra göçme mekanizmalarına ulaştıkları görülmektedir. ALB birleşim örneğinde momentin düştüğü görülmezken, 0,04 radyan

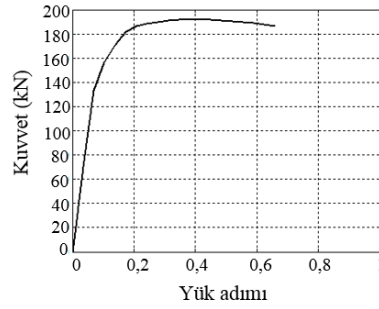
dönme değerinin ilk çevriminde kiriş başlığında yırtılma ile göçme mekanizması meydana gelmektedir.



a) TSALB birleşim

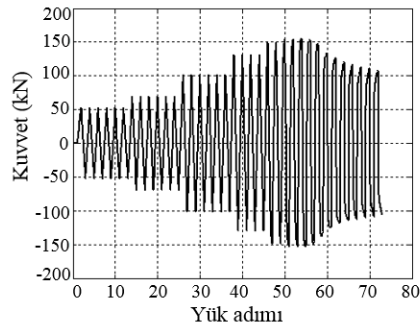


b) TALB birleşim

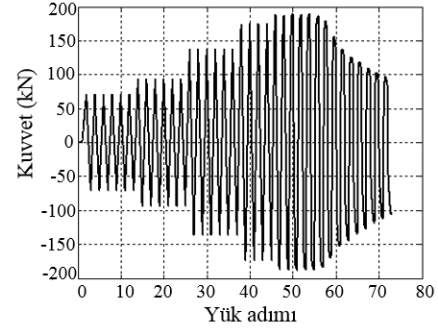


c) ALB birleşim

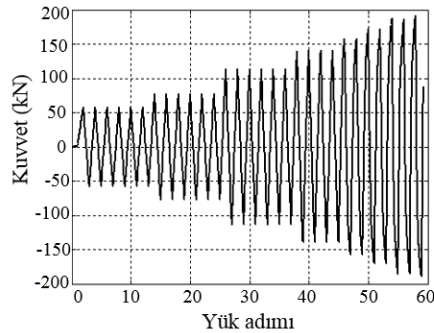
Şekil 5. 33 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulanan kuvvet



a) TSALB birleşim

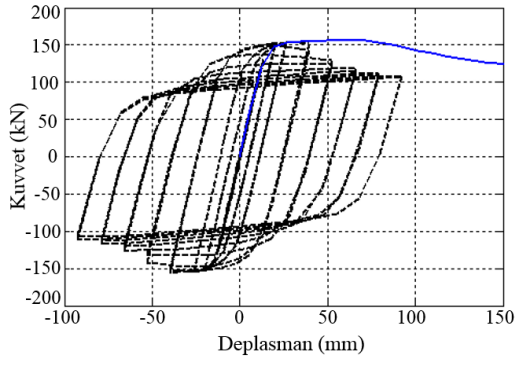


b) TALB birleşim

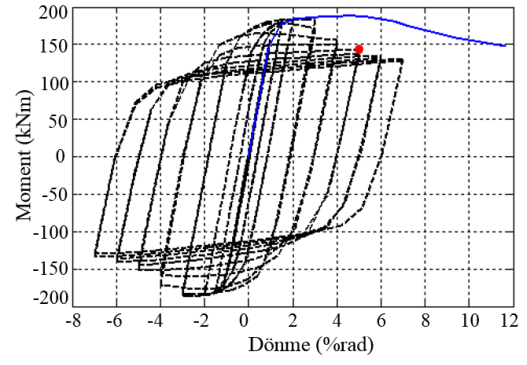


c) ALB birleşim

Şekil 5. 34 Çevrimsel yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulana kuvvet

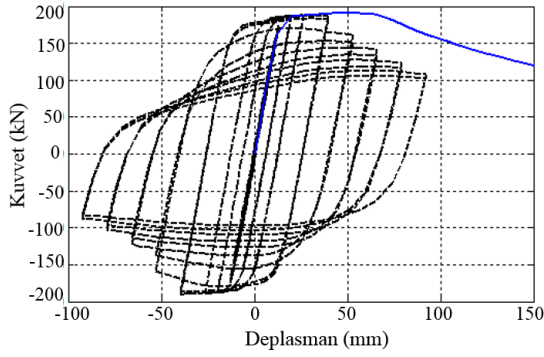


a) Kuvvet – yer değiştirme

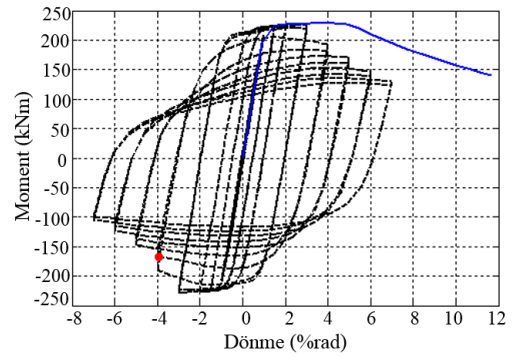


b) Moment – dönme

Şekil 5. 35 TSALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri

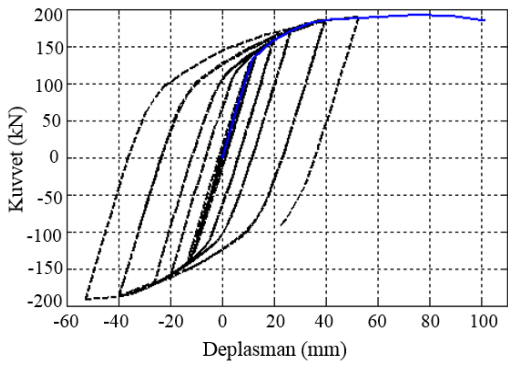


a) Kuvvet – yer değiştirme

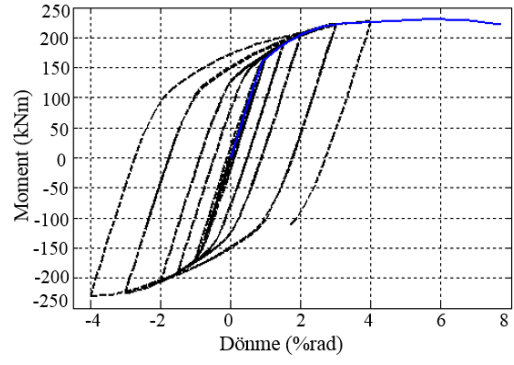


b) Moment – dönme

Şekil 5. 36 TALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri



a) Kuvvet – yer değiştirme



b) Moment – dönme

Şekil 5. 37 ALB birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri

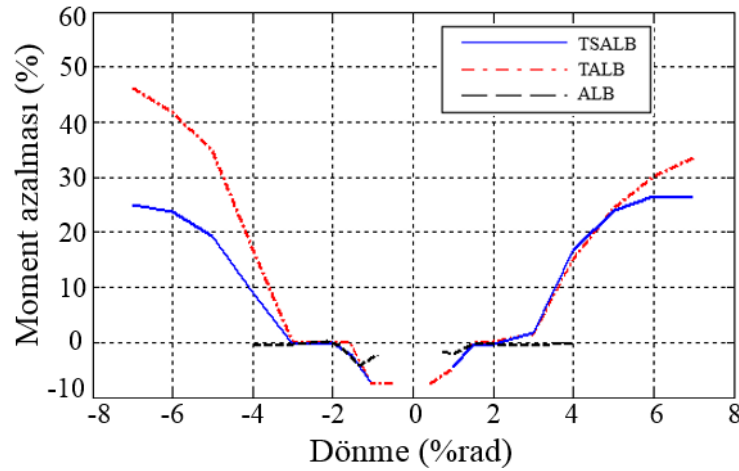
Çizelge 5. 4 Alın levhalı birleşimlerde çevrimsel yükleme altında maksimum moment kapasitesine ulaştıktan sonra, her çevrimde okunan maksimum moment değerleri

Dönme	TSALB birleşim		TALB birleşim	
	M _{maks} (kNm)	%(M _{maks} /M _{taş})	M _{maks} (kNm)	%(M _{maks} /M _{taş})
-0,03	187,2*	100	228,3*	100
0,03	182,8	97,34	224,8	98,47
-0,03	184,2	98,4	223	97,68
0,03	172	91,88	218,6	95,75
-0,04	170,9	91,3	190,2	83,31
0,04	156,1	91,39	193,6	84,8
-0,04	159,2	85,04	165,4	72,45^t
0,04	150	80,13	181,8	79,63
-0,05	151,6	80,66	147,3	64,52
0,05	142,8	76,28^t	170,5	74,46
-0,05	144,5	77,19	136,9	59,96
0,05	138	73,72	160	70,08
-0,06	141	75,32	123,2	54,96
0,06	135,7	72,49	147,6	64,65
-0,06	136,3	72,65	115	50,37
0,06	132,2	70,62	139,4	61,06
-0,07	133,4	71,26	104,7	45,86
0,07	130,8	69,87	129,5	56,72
-0,07	129,2	69,02	99,03	43,38
0,07	128	68,38	123,2	53,96

*Birleşimin moment taşıma kapasitesi,

^tÇevrimdeki maksimum momentin, moment taşıma kapasitesinin %80'inin altına düştüğü ilk çevrim.

Birleşimlerin moment – dönme eğrilerine bakıldığında, alın levhali birleşimlerde belli bir dönme değerinden sonra, aynı dönme değeri için monotonik ve çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Bu eğrilerin doğrusal olmayan bölgesinde aynı dönme değeri için monotonik yükleme altında taşınan moment değerinin, çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerinden daha fazla olduğu görülürken, ALB birleşimde analiz süresince böyle bir durum görülmemektedir. Alın levhali birleşimlerde gözlemlenen moment taşıma değerlerindeki azalmanın daha iyi anlaşılması için Şekil 5.38’de bu azalma miktarı yüzde olarak gösterilmektedir. Monotonik yükleme altında sadece yer çekimi yönünde analiz yapıldığı için, ters yöndeki çevrimsel yükleme ile monotonik yükleme arasındaki moment taşıma değeri azalımı eğrisinin elde edilmesinde, yer çekimi yönündeki monotonik yükleme analizi sonuçları kullanılmaktadır.



Şekil 5. 38 Birleşimlerde her dönme için çevrimsel ve monotonik yükleme altında meydana gelen maksimum moment farkları

Şekil 5.38’den görüldüğü üzere, monotonik ve çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerleri arasında en fazla fark TALB birleşim örneğinde görülmektedir. Dönme değeri negatif değerini aldığı anda bu fark daha fazla olup yaklaşık %47’ye dayanırken, dönmenin pozitif değerinde yaklaşık %34 olmaktadır. TSALB birleşim örneğinde ise, bu durumun tam tersi görülmektedir. Dönmenin pozitif değerinde moment taşıma değerindeki azalma %27’ye ulaşırken, negatif değerinde %25’e ulaşmaktadır. Her üç birleşim örneğinde de dönmenin %-2 ile %2 arasında olduğu durumda, moment taşıma değerindeki azalmanın negatif yani, çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerinin, monotonik yükleme altında taşınan moment değerinden fazla olduğu görülmektedir.

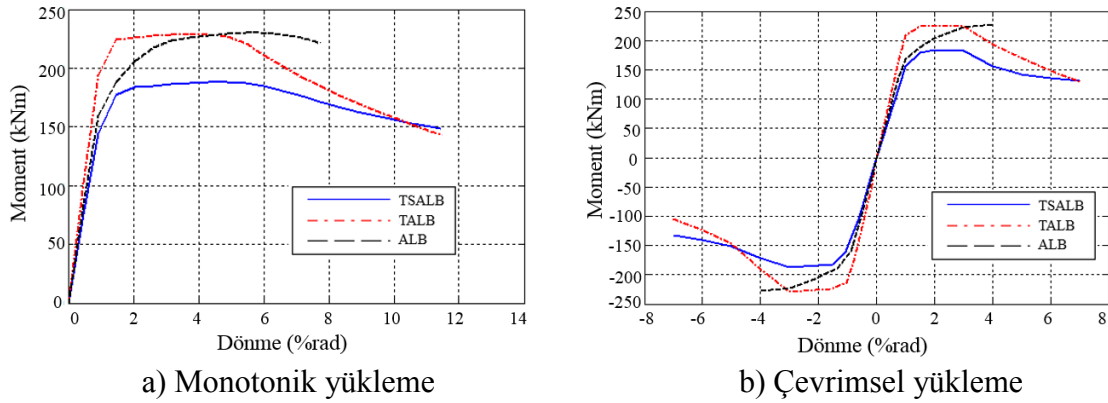
Çizelge 5.5'te her üç birleşimin monotonik ve çevrimsel yükleme altında ulaşabildikleri maksimum moment değerleri verilmektedir. Moment taşıma kapasitelerine bakıldığında, birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasitelerinin aynı olduğu söylenebilir. Birleşimlerin birbirleriyle karşılaştırılmasında ise, TALB ve ALB birleşim örneklerinin moment taşıma kapasitelerinin yaklaşık olarak aynı olduğu görülürken, TSALB birleşim örneğinin moment taşıma kapasitesinin diğer bulonlu birleşim örneklerinin yaklaşık %82'si kadar olduğu görülmektedir. Monotonik yükleme altında TSALB ve TALB birleşim örnekleri uygulanan 150 mm'lik yer değiştirme değerine (dönme değeri %11,4) kadar ulaşabilirken, ALB birleşim örneği 102 mm'lik yer değiştirme değerine (dönme değeri %7,7) kadar ulaşabilmektedir. Çevrimsel yükleme altında ise, TSALB ve TALB birleşim örnekleri uygulanan 72 adımlık çevrimi tamamlayıp %7 dönme değerine ulaşabildiği halde, TSALB birleşim örneğinin %5 dönme değerinin ilk çevriminde, TALB birleşim örneğinin ise %4 dönme değerinin ikinci çevriminde göçme durumuna geldiği kabul edilmektedir. ALB birleşim örneği ise %4 dönme değerinde yükü taşıyamaz duruma gelmekte ve bu dönme değerinin çevrimlerini tamamlayamamaktadır.

Çizelge 5. 5 Birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasiteleri

Birleşim	Maksimum moment (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
TSALB	188,1	187,2
TALB	228,7	228,3
ALB	230,1	230,1

Birleşimlerin performanslarını birbirleriyle daha iyi karşılaştırabilmek için Şekil 5.39'da birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki moment – dönme eğrilerinden elde edilen dayanım zarfları verilmektedir. Monotonik yükleme altında başlangıçta taşıdığı moment değerine göre birleşimler büyükten küçüğe TALB, ALB ve TSALB birleşim örnekleri olarak sıralanmaktadır. Yaklaşık %4 dönme değerinden sonra, ALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değeri, TALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerine ulaşmakta ve bu

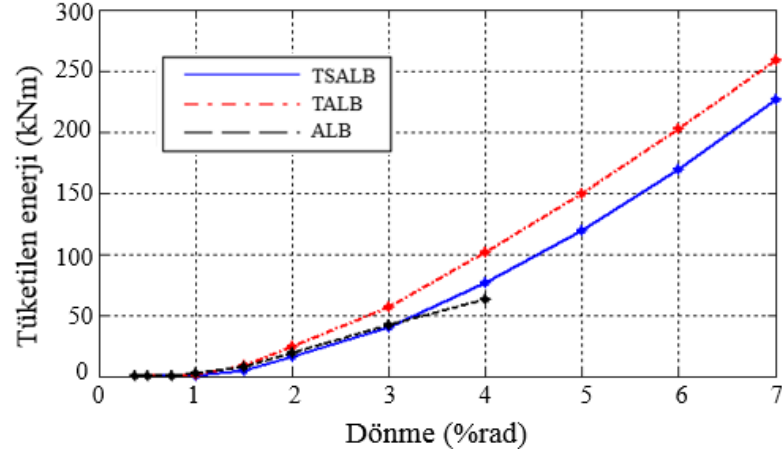
dönme değerinden sonra yaklaşık olarak aynı seviyede ilerlemektedir. Bu dönme değerinden sonra TALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinde hızlı bir azalma görülmekte ve yaklaşık olarak %10 dönme değerinden sonra TSALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinin de altına düştüğü görülmektedir. Çevrimsel yükleme altında da başlangıçta taşıdığı moment değerine göre birleşimler büyükten küçüğe TALB, ALB ve TSALB birleşim örnekleri olarak sıralanmaktadır. Dönme değerinin yaklaşık olarak %3 ve %3 olduğu anda ALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinin, TALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerine ulaştığı görülmektedir. Bu dönme değerinden sonra, ALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinin kırılmanın meydana geldiği %4 dönme değerine kadar yaklaşık olarak aynı seviyede olduğu görülürken, TALB birleşim örneğinin taşıdığı moment değeri azalmaya başlamaktadır. Dönmenin pozitif olduğu durumda yaklaşık %7 dönme değerinde TALB ve TSALB birleşim örneklerinin moment taşıma değerleri eşitlenmektedir. Fakat dönmenin negatif olduğu durumda yaklaşık %5 dönme değerinde bu eşitlik gerçekleşirken, bu dönme değerinden sonra TSALB birleşim örneğinin TALB birleşim örneğinden daha fazla moment taşıdığı görülmektedir.



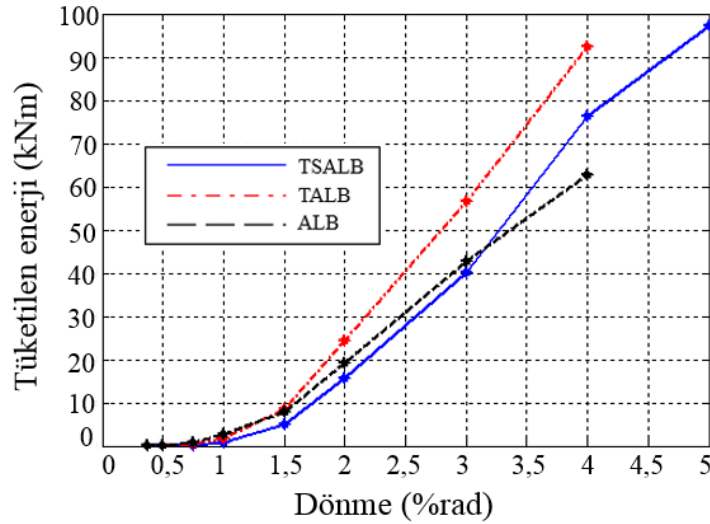
Şekil 5. 39 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları

Çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin alanı ile elde edilen birleşimlerin tüketilen enerji değerlerinin analizin başlangıcından bitimine kadar değişimini incelemek amacıyla Şekil 5.40’da her üç birleşimin tüketilen enerji – dönme eğrileri verilmektedir. Şekil 5.41’de ise, alın levhalı birleşimlerde göçme mekanizması olduğu kabul edilen, TSALB birleşim örneği için %5 radyan dönmenin ilk çevrimine kadar, TALB birleşim örneği için %4 radyan dönmenin ikinci çevrimine kadar hesaplanan tüketilen enerji – dönme eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.40’a göre, TALB

birleşim örneğinin enerji tüketme kapasitesi, diğer birleşimlerin enerji tüketme kapasitesinden daha fazladır. Şekil 5.41’deki eğrilerden ise TSALB birleşim örneğinin enerji tüketme kapasitesinin az farkla TALB birleşim örneğinden daha fazla olduğu görülmektedir. %3 dönme değerine kadar TSALB ve ALB birleşim örneklerinin tüketilen enerji değerleri yaklaşık olarak aynı seviyelerdeyken, ALB birleşim örneği %4 dönme değerinin çevrimlerini tamamlayamadığı için bu birleşimin tüketilen enerji değerinde azalma görülmektedir.



Şekil 5. 40 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri



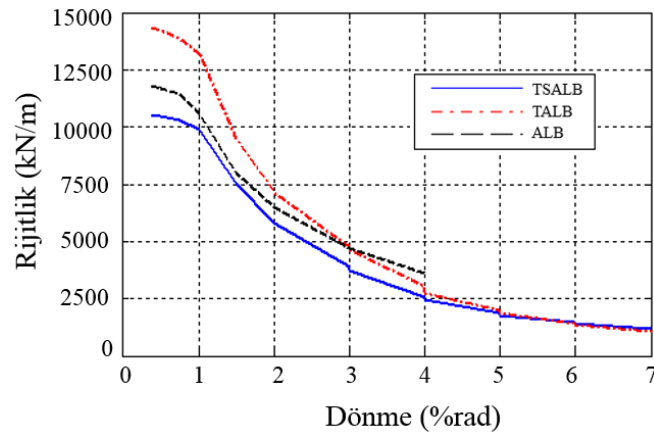
Şekil 5. 41 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri

Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve moment – dönme eğrisinden elde edilen başlangıç dönme rijitlikleri Çizelge 5.6’da verilmektedir. Başlangıç dönme rijitlikliği en büyük olan birleşim TALB birleşim örneği olurken, en küçük başlangıç dönme rijitliğine sahip olan birleşimin TSALB birleşim olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 6 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri

Birleşim	Enerji tüketme kapasitesi (Analiz sonuna kadar) (kNm)	Enerji tüketme kapasitesi (Göçme oluşana kadar) (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
TSALB	227	97,35	16457
TALB	258,36	92,51	22451
ALB	62,8	62,8	18485

Birleşimlerin çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değiştirme eğrilerinden elde edilen rijitlik değerlerinin dönme ile ilişkileri Şekil 5.42’de gösterilmektedir. Birleşimlere uygulanan çevrim sayısının artmasıyla rijitlik değerlerinde azalma görülmektedir. Başlangıçta en büyük rijitliğe sahip olan birleşim TALB birleşim örneği olurken, %3 dönme değerinden sonra bu birleşimin rijitliği ALB birleşim örneğinin rijitliğinin altına düştüğü ve %6 dönme değerinden sonra da TSALB birleşim örneğinin rijitliğinin altına düştüğü görülmektedir.

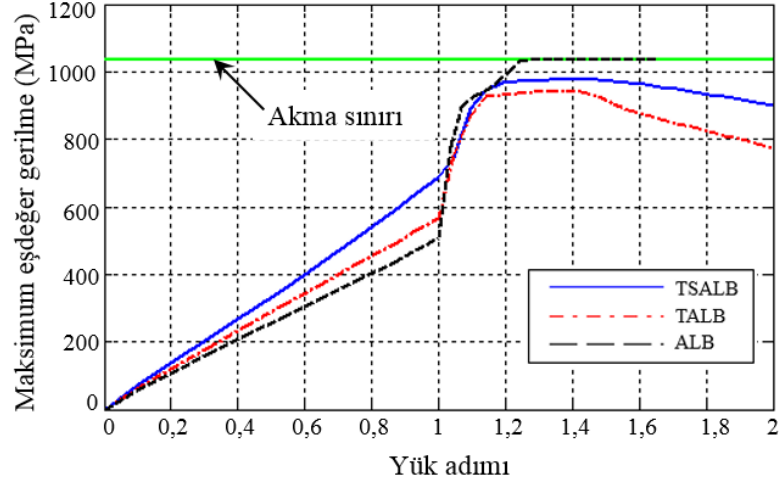


Şekil 5. 42 Birleşimlerin analiz süresince rijitlik – dönme eğrileri

5.2.2.3 Bulonlardaki Maksimum Eşdeğer (von-Mises) Gerilme Değerleri

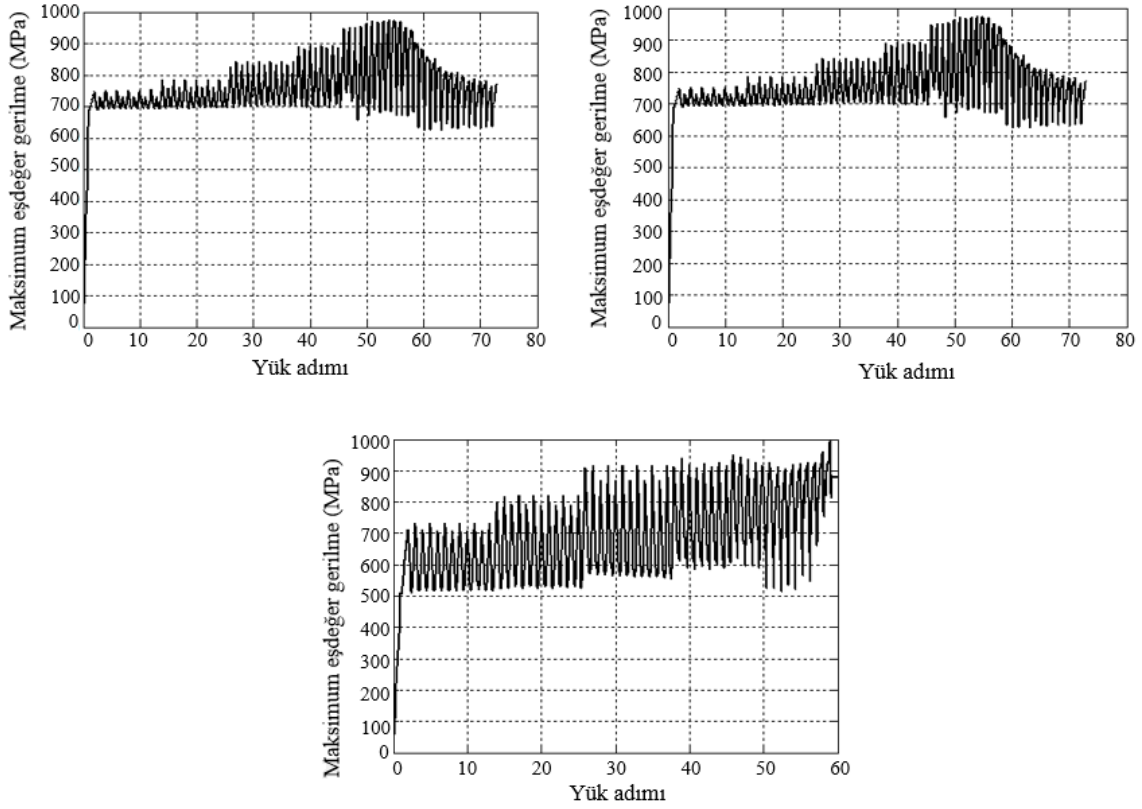
Birleşimlerin genel kapasitelerini değerlendirmek adına, bulonların performansları da değerlendirilmektedir. Burada, birleşimlerdeki bulonlar tek tek değerlendirilmek yerine, bulon grubunun tamamı bir arada değerlendirilmektedir. TSALB birleşim örneğinin bulon grubu 8 adet öngerilmeli M20, TALB birleşim örneğinin bulon grubu on altı adet öngerilmeli M16, ALB birleşim örneğinin bulon grubu yirmi dört adet öngerilmeli M12 bulonlarını kapsamaktadır. ALB birleşimde gövde bulonları öngerilmeli olmadığından

bulon grubuna dahil edilmemektedir. Şekil 5.43'te monotonik yükleme altında ve Şekil 5.44'de çevrimsel yükleme altında analiz süresince birleşimlerin bulon gruplarındaki maksimum eş değer (von-Mises) gerilme değerleri verilmektedir. Yük adımında 1 değerine kadar olan kısım bulonlardaki öngerilme yüklemesi adımını göstermektedir.



Şekil 5. 43 Monotonik yükleme altında analiz süresince birleşimlerin bulon gruplarındaki maksimum eş değer (von-Mises) gerilme değerleri

Şekil 5.43'te görüleceği üzere, monotonik yükleme altında ALB birleşim örneğindeki bulon grubunun maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilme değeri bulon malzemesinin akma gerilmesine ulaşmamakta, fakat alın levhalı birleşimler için bu durum olmamaktadır.



Şekil 5. 44 Çevrimsel yükleme altında analiz süresince birleşimlerin bulon gruplarındaki maksimum eş değer (von-Mises) gerilme değerleri

Şekil 5.44’de görülen çevrimsel yükleme altında bulon gruplarında meydana gelen maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilme değerlerine göre, her üç birleşimin de bulon grupları malzemenin akma sınırına ulaşmamaktadır. TSALB, TALB ve ALB birleşim örneklerinde öngerilme kuvvetinden dolayı bulon gruplarında meydana gelen maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilme değerleri sırasıyla 687 MPa, 566 MPa ve 508 MPa’dır. Analiz süresince, TALB ve ALB birleşim örneklerindeki bulon gruplarının gerilme değerleri, öngerilme kuvvetinden dolayı meydana gelen maksimum gerilme değerinin altına düşmediği görülürken, TSALB birleşim örneğindeki bulon grubunun gerilme değerinde kırk sekizinci adımdan sonra sözü edilen bu gerilme değerinin altına düştüğü görülmektedir.

5.2.2.4 Bulonlu Birleşimlerin Değerlendirilmesi

İncelenen üç adet bulonlu birleşim örneklerinden TSALB ve TALB birleşim örneklerinde hasar durumları ve plastik mafsall oluşma bölgesi birleşim bölgesinden uzakta, kiriş başlıkları ve gövdesinde burkulma ile meydana gelirken, ALB birleşim örneğinde göçme mekanizması son bulon sırasındaki kiriş en kesitinde yırtılma ile meydana gelmektedir.

ALB birleşim örneğindeki bu kırılma biçimi istenmeyen bir kırılma biçimidir. DBYBHY-2007’de birleşimlerin 0,04 radyan görelî kat ötelemesine sahip olması durumunun sağlandığı görölmektedir. ALB birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altında 0,04 radyan dönme değerine ulaştığı fakat çevrimlerini tamamlayamadığı görölrken, alın levhalı birleşim örneklerinin 0,07 radyan dönme değerinin çevrimlerini tamamladığı, fakat TSALB birleşim örneğinin 0,05 radyan değerinin ilk çevriminde, TALB birleşim örneğinin ise 0,04 radyan değerinin ikinci çevriminde göçme durumuna geldiğı görölmektedir.

Birleşimler moment kapasiteleri bakımından karşılaştırılacak olursa, TALB ve ALB birleşim örneklerinin yaklaşık olarak aynı moment kapasitesine sahip oldukları görölrken, TSALB birleşim örneğinin moment kapasitesi diğér bulonlu birleşim örneklerinin moment kapasitesinin yaklaşık %82’si kadar olduğı görölmektedir.

Birleşimler, çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değıştirme eğrileri ile elde edilmiş olan enerji tüketme kapasiteleri bakımından ele alınacak olursa, analiz sonuna kadar TALB birleşim örneğinin daha fazla enerji tükettiğı, TSALB birleşim örneğinin de tükettiğı enerji miktarının TALB birleşim örneğine yakın bir değerde olduğı görölmektedir. Ayrıca, daha erken göçmesi sonucu ALB birleşim örneğinin tükettiğı enerji miktarının alın levhalı birleşimlerin yaklaşık dörtte biri kadar olduğı görölmektedir. Birleşimlerde göçme mekanizması geldiğı anda TSALB birleşim örneğinin enerji tüketme kapasitesinin az farkla TSALB birleşim örneğinden daha fazla olduğı görölmektedir.

Birleşimlerin başlangıç dönme rijitlikleri ve çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değıştirme eğrilerinden elde edilmiş olan rijitlik değérleri incelendiğinde, TALB birleşim örneğinin diğérlerinden daha fazla rijitliğe sahip olduğı görölmektedir.

Analiz süresince birleşimlerdeki öngerilme bulonların maksimum eşdeğér (von-Mises) gerilme değérleri incelendiğinde, ALB birleşim örneğindeki bulonların monotonik yükleme altında bulon malzemesinin akma gerilmesi değérine ulaştığı görölmektedir.

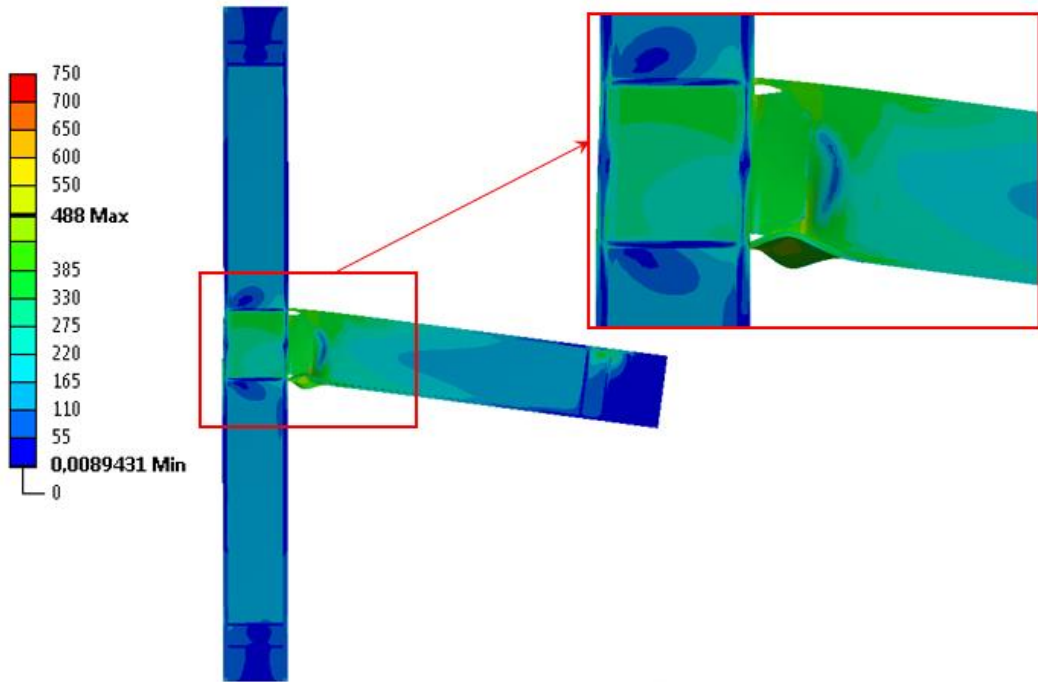
Ele alınan sonuçlar çerçevesinde, TALB birleşim örneğinin diğér bulonlu birleşimlere göre daha üstün ve güvenilir olduğı görölmektedir.

5.2.3 Kaynaklı Birleşimler

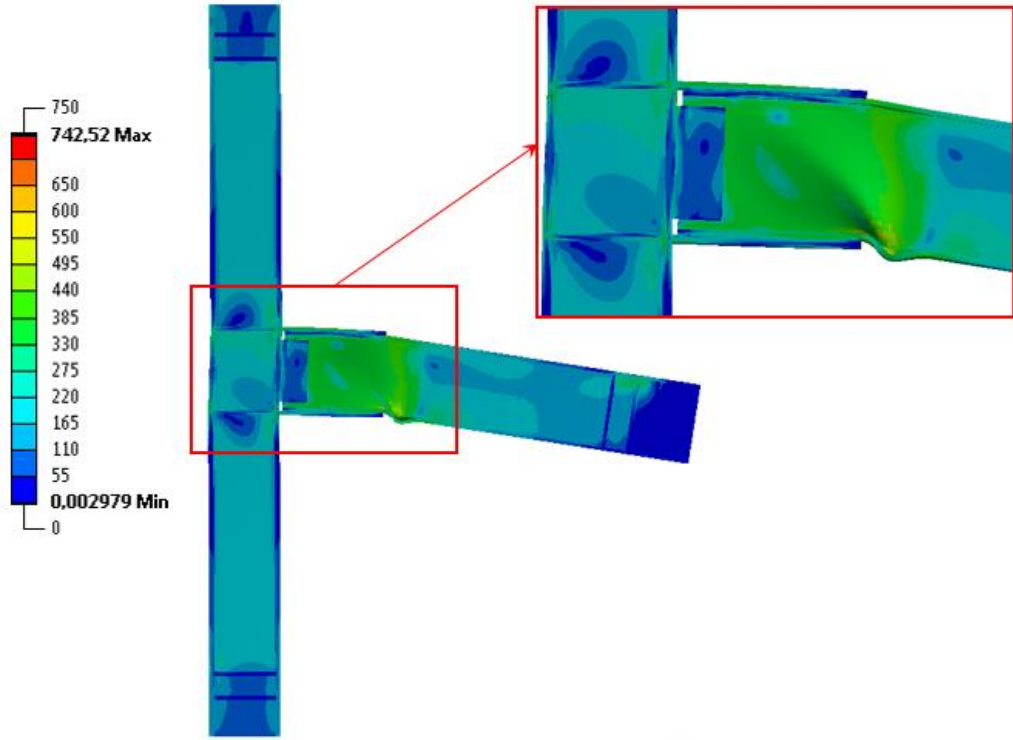
Tezin bu bölümünde kaynaklı birleşim örneği, ek başlık levhalı kaynaklı (EBLK) birleşim örneği ve zayıflatılmış kiriş en kesiti kaynaklı (ZKEK) birleşim örneği analizlerinden elde edilen sonuçlar incelenmektedir.

5.2.3.1 Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri

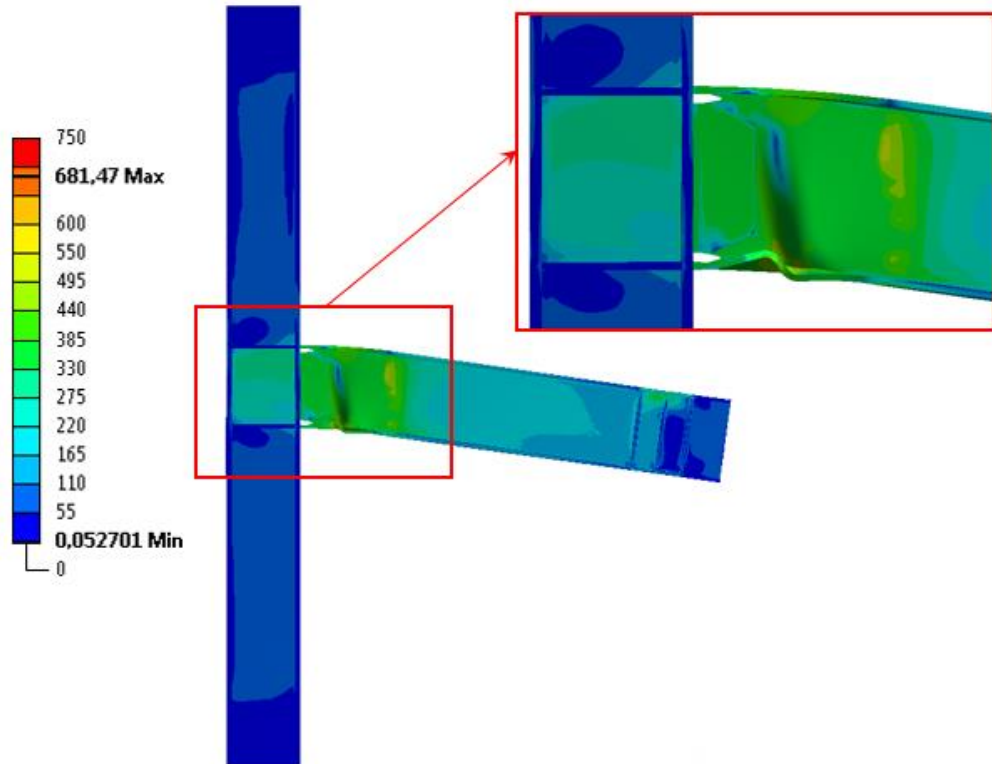
Her bir birleşimin monotonik ve çevrimsel yükleme altında analizi yapılmaktadır. Söz konusu her üç birleşim de monotonik yükleme altında yükleme noktasına uygulanan 150 mm'lik yer değiştirme değerine kadar (dönme değeri %11,4) ulaşmakta ve çevrimsel yükleme altında uygulanan yetmiş iki adımlık yüklemeyi tamamlamaktadır. Her üç birleşim örneklerinde de hasar durumları kiriş başlıkları ve gövdesinde burkulma ile meydana gelmektedir. Şekil 5.45 – Şekil 5.47'de birleşimlerin monotonik yükleme altında, Şekil 5.48 – Şekil 5.50'de çevrimsel yükleme altında deforme olmuş şekilleri üzerinden eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları gösterilmektedir.



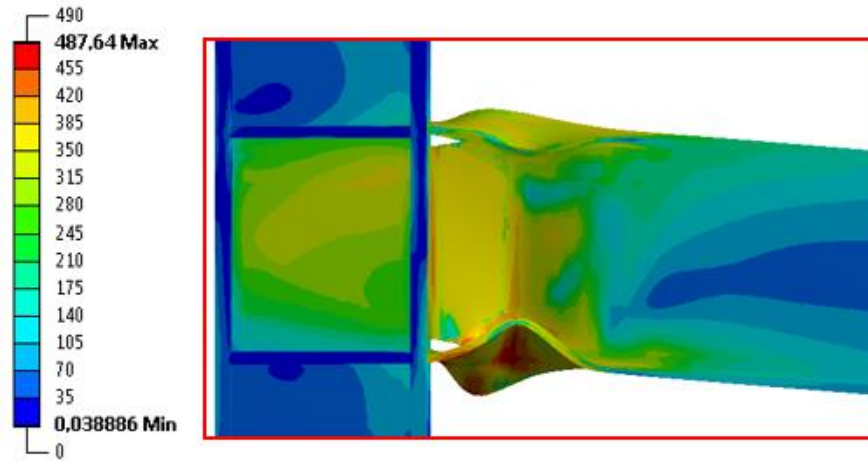
Şekil 5. 45 Kaynaklı birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



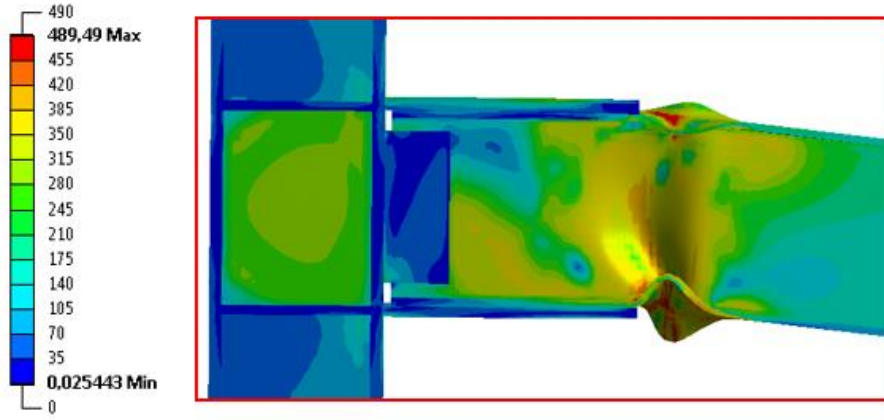
Şekil 5. 46 EBLK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



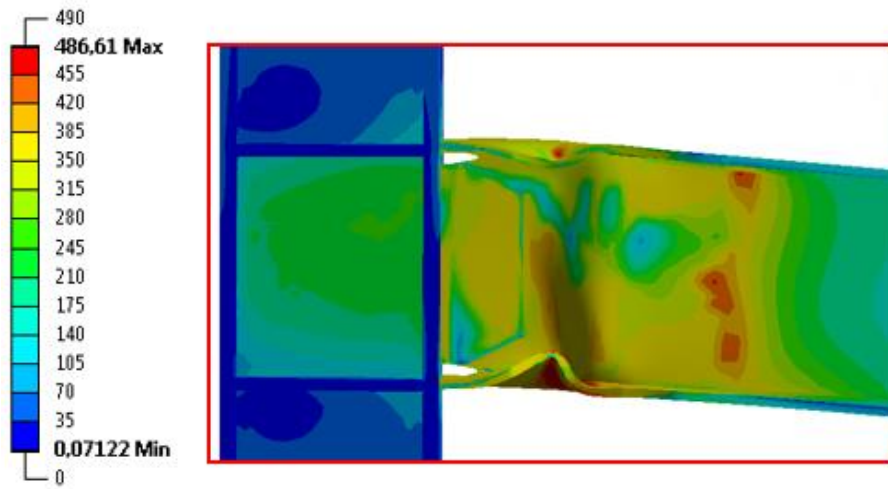
Şekil 5. 47 ZKEK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



Şekil 5. 48 Kaynaklı birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları



Şekil 5. 49 EBLK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları

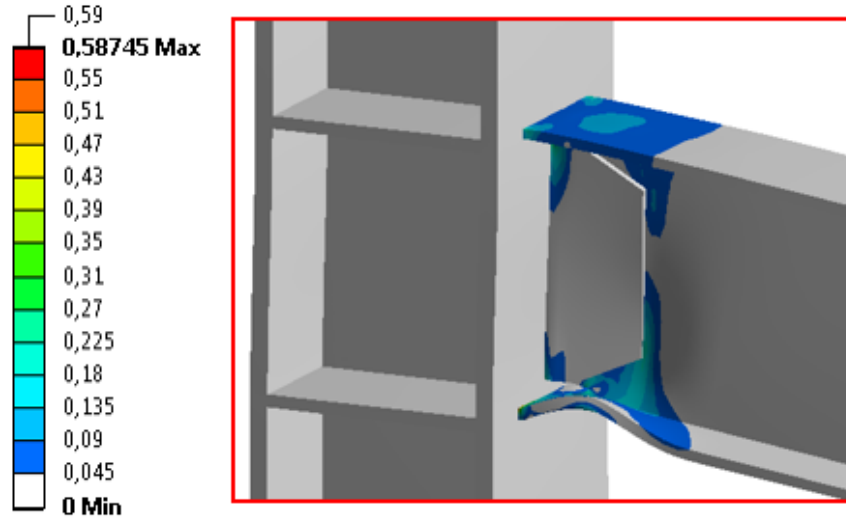


Şekil 5. 50 ZKEK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) gerilme dağılımları

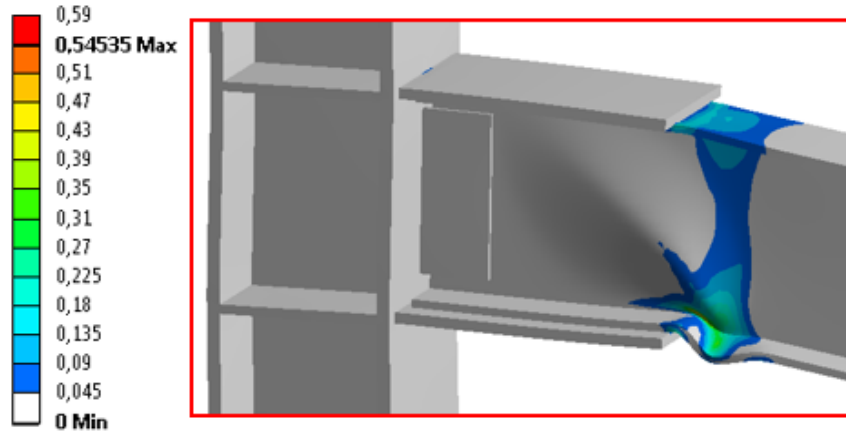
Şekil 5.45 – Şekil 5.50’de görüldüğü üzere, her üç birleşimde de hasarın ve plastik mafsallın oluştuğu yerler incelendiğinde, yüklemenin monotonik veya çevrimsel olması hasar ve plastik mafsall yerlerini fazla etkilememektedir. Şekil 5.45 ve Şekil 5.48’e göre, kaynaklı birleşim örneğinde plastik mafsall kirişin kolona birleştirildiği yerden başlamakta ve kolon yüzünde yaklaşık 50 mm uzaklıkta kiriş başlığındaki burkulma durumu maksimum düzeye ulaşmaktadır. Şekil 5.46 ve Şekil 5.49’e göre, EBLK birleşim örneğinde plastik mafsall, kiriş üzerindeki ek başlık levhalarının sonunda başlamaktadır. Şekil 5.47 ve Şekil 5.50’ye göre, ZKEK birleşim örneğinde plastik mafsall yeri kolon gövdesinden uzaklaşmakta ve kiriş enkesitinin zayıf olduğu bölgede yoğunlaşmaktadır. Bu birleşimde başlıklardaki maksimum burkulmanın kolon yüzünden uzaklığı yaklaşık 150 mm uzaklıktadır.

Her üç birleşim örneğinde de monotonik yükleme altında kiriş başlıkları ve gövdesinde meydana gelen burkulmanın, çevrimsel yükleme altında meydana gelen burkulmadan daha az olduğu görülmektedir.

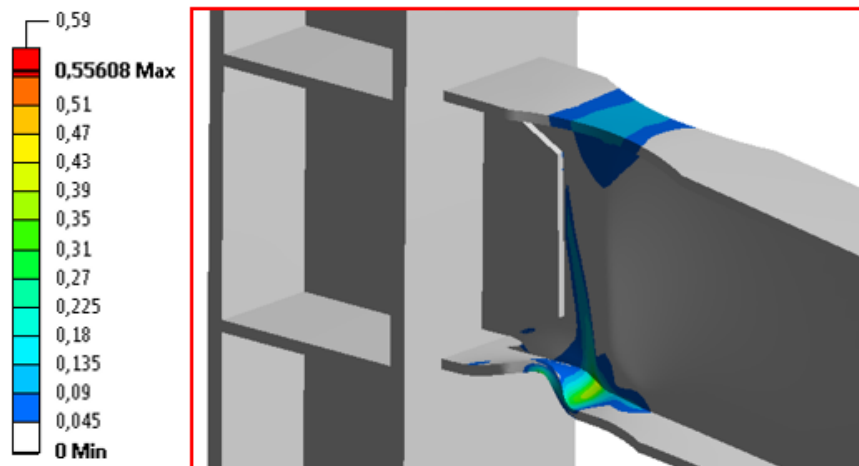
Birleşimlerdeki hasar durumu ve plastik mafsall yerlerinin incelenmesi için kullanılan bir diğer araç da eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımlarının incelenmesidir. Bu dağılımlar monotonik yükleme için Şekil 5.51 – Şekil 5.53’te, çevrimsel yükleme için Şekil 5.54 – Şekil 5.56’da gösterilmektedir.



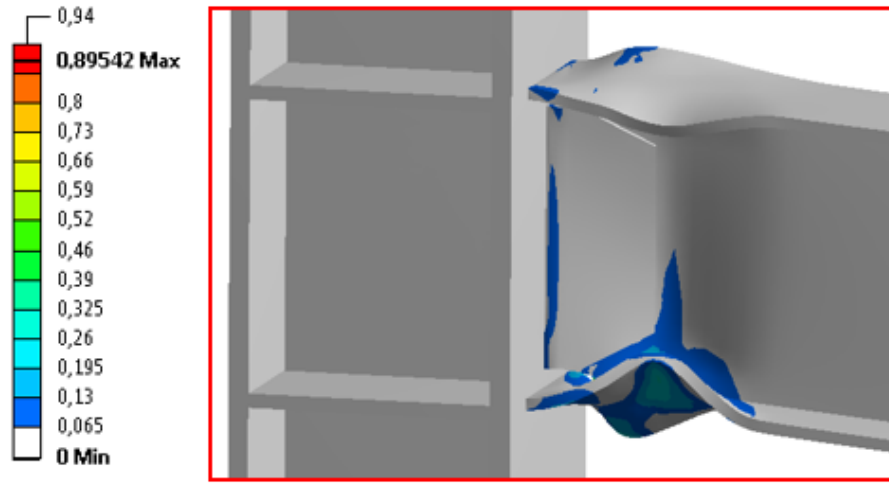
Şekil 5. 51 Kaynaklı birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



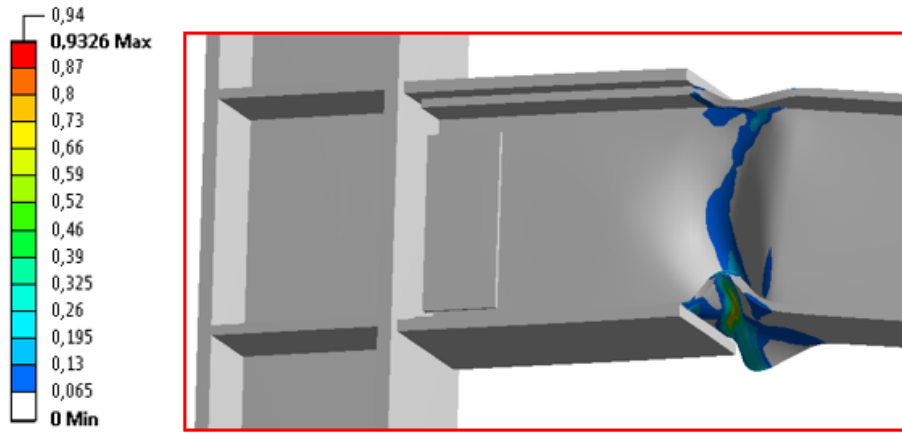
Şekil 5. 52 EBLK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



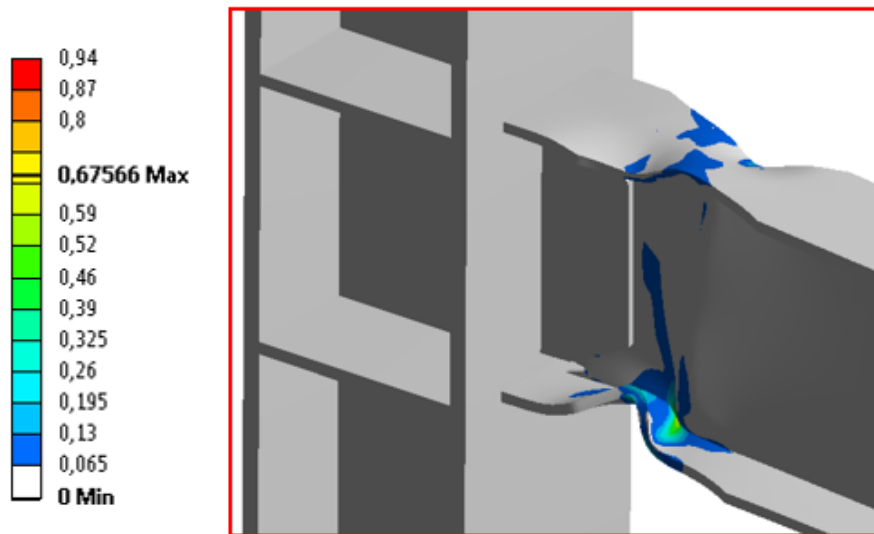
Şekil 5. 53 ZKEK birleşim örneğinin monotonik yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



Şekil 5. 54 Kaynaklı birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları



Şekil 5. 55 EBLK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları

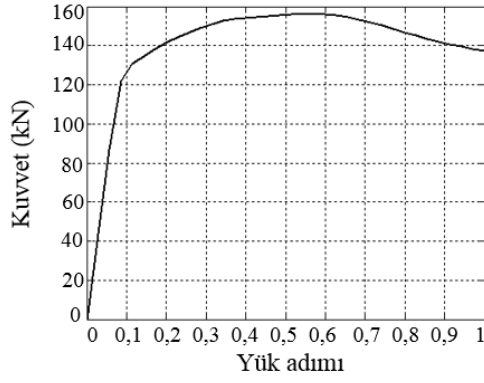


Şekil 5. 56 ZKEK birleşim örneğinin çevrimsel yükleme altındaki eş değer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları

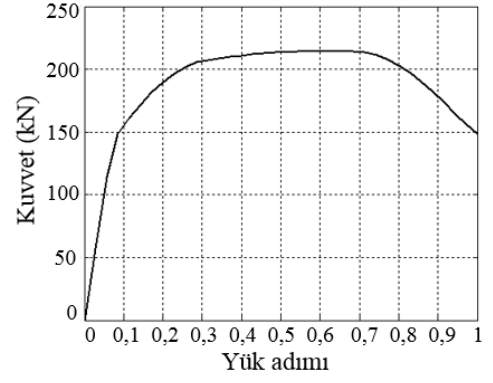
Şekil 5.51 ve Şekil 5.54'e bakıldığında, Kaynaklı birleşim örneğinde eşdeğer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımı, kirişte kolon yüzünde başlayıp, burkulmanın olduğu bölgede yoğunlaşmaktadır. Şekil 5.51'de monotonik yükleme altında kiriş üst başlığında yaygın bir dağılım görülürken, Şekil 5.54'de çevrimsel yükleme altında sadece bazı bölgelerde yerel dağılım görülmektedir. Şekil 5.52 ve 5.55'e göre, EBLK birleşim örneğinde ise bu dağılım, kirişte ek başlık levhasının sonunda yoğunlaşmaktadır. Şekil 5.52'ye bakıldığında, monotonik yükleme altında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımının kiriş başlık ve gövdesinde yaygın olduğu görülürken , Şekil 5.55'deki çevrimsel yükleme altındaki dağılımda daha az yaygın olduğu görülmektedir. Şekil 5.53 ve Şekil 5.56'da görüldüğü gibi, kaynaklı birleşim örneğinin kiriş en kesitinin zayıflatılmasıyla oluşturulmuş olan ZKEK birleşim örneğinde bu dağılımlar sadece kiriş en kesitinin zayıflatılmış bölgelerinde görülmektedir. Böylelikle, kiriş en kesitinin zayıflatılmasıyla plastik şekil değiştirmelerin, dolayısıyla plastik mafsalın kolon yüzünden uzaklaştırıldığı görülmektedir.

5.2.3.2 Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri

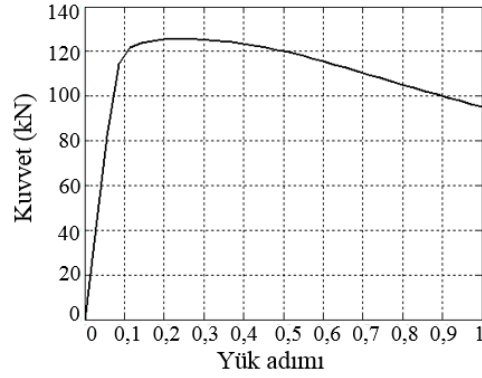
Birleşimlerin analizi için kiriş üzerine uygulanan yer değiştirme değerlerinin aynı yerdeki tepki kuvvetleri monotonik yükleme için Şekil 5.57'de ve çevrimsel yükleme için Şekil 5.58'de gösterilmektedir. Şekil 5.57 ve Şekil 5.58'den görüldüğü üzere, her üç birleşim örneğinde de belli bir yük adımından sonra taşınan kuvvette azalma görülmektedir. Çevrimsel yükleme altında, Kaynaklı ve EBLK birleşim örneklerinde yüklemenin 63. adımında kuvvet taşıma değerinde azalma görülürken, ZKEK birleşim örneğinde 53. adımda azalma görülmektedir.



a) Kaynaklı birleşim

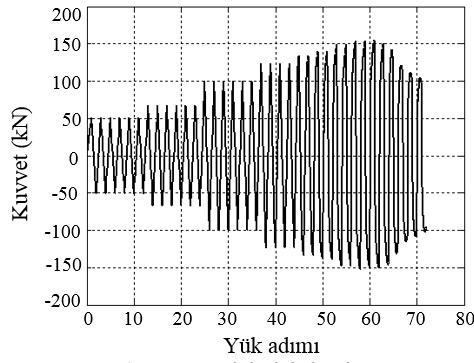


b) EBLK birleşim

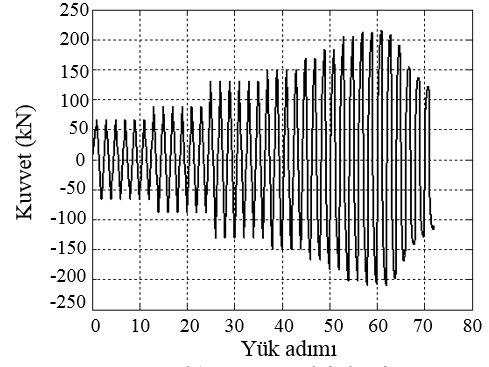


c) ZKEK birleşim

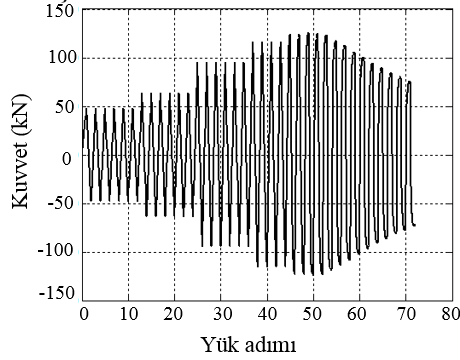
Şekil 5. 57 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulanan kuvvet



a) Kaynaklı birleşim



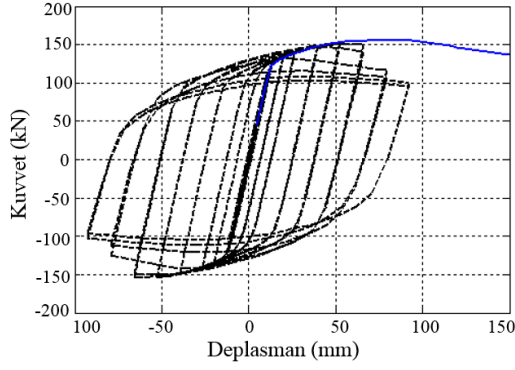
b) EBLK birleşim



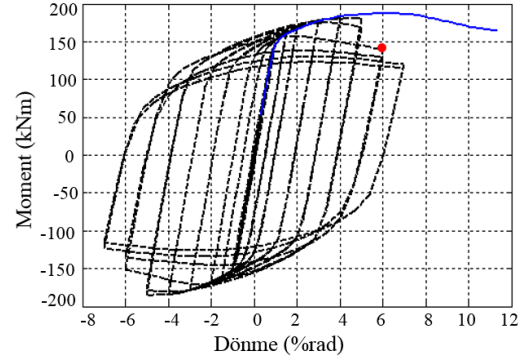
c) ZKEK birleşim

Şekil 5. 58 Monotonik yükleme altında analiz süresi boyunca konsol kiriş üzerine uygulana kuvvet

Birleşim örneklerinin taşıdığı kuvvet –yer değiştirme (yükleme noktasının) eğrileri ve bu eğrilerden elde edilmiş olan moment – dönme eğrileri her iki yükleme altındaki durumları için Kaynaklı birleşim örneği için Şekil 5.59’da, EBLK birleşim örneği için Şekil 5.60’da, ZKEK birleşim örneği için Şekil 5.61’de verilmektedir.

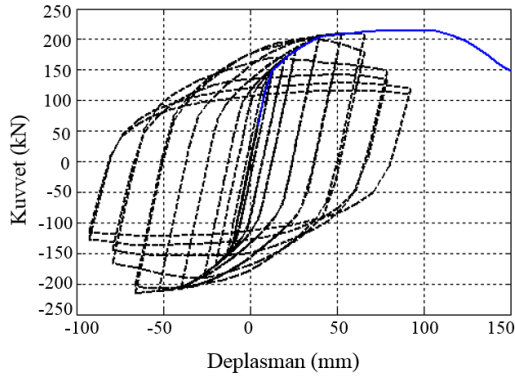


a) Kuvvet – yer değiştirme

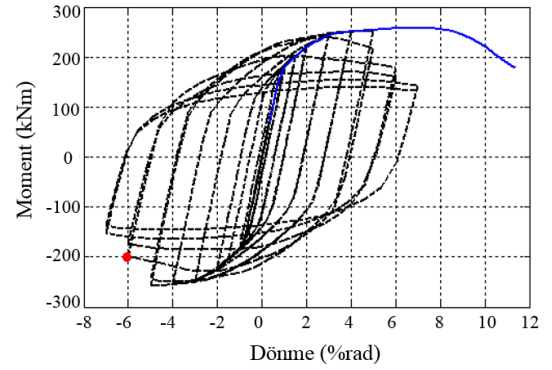


b) Moment - dönme

Şekil 5. 59 Kaynaklı birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri

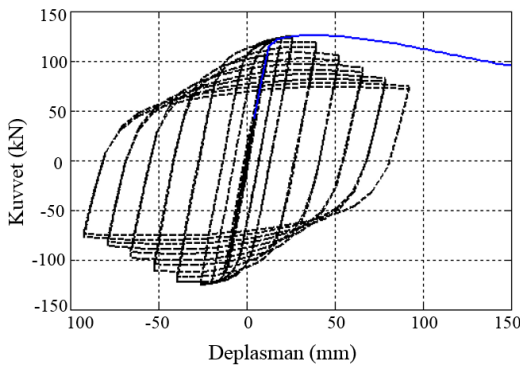


a) Kuvvet – yer değiştirme

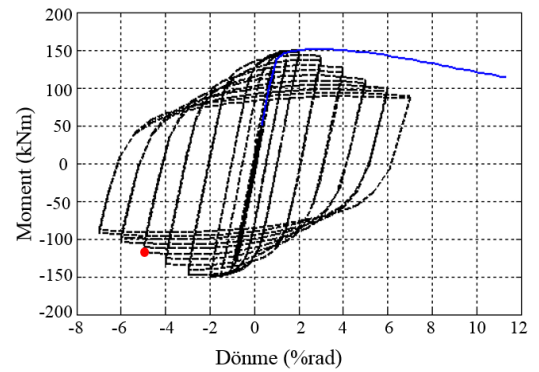


b) Moment - dönme

Şekil 5. 60 EBLK birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri



a) Kuvvet – yer değiştirme



b) Moment - dönme

Şekil 5. 61 ZKEK birleşim örneğinin kuvvet – yer değiştirme ve moment – dönme eğrileri

FEMA-350'ye göre birleşimde herhangi bir göçme gözlemlenmese de eğer bir çevrimde elde edilen maksimum moment değeri, sistemin moment kapasitesinin %80'inin altına düşüyorsa, sistemde göçme meydana geldiği kabul edilmektedir. Her üç birleşim de çevrimsel yükleme altında uygulanan 0,07 radyan dönme değerlerinin çevrimlerini tamamlamış olsalar da, belli bir adımdan sonra taşınan moment değerleri, sistemin moment kapasitesinin %80'inin altına düşmektedir. Birleşimlerde bu durumun görüldüğü yerler, Şekil 5.59 – Şekil 5.61'deki moment – dönme eğrilerinde kırmızı işaret ile gösterilmektedir. Ayrıca, Çizelge 5.7'de her birleşim için çevrimsel yükleme altında moment taşıma kapasitelerine ulaştığı andan sonra analiz sonlanana kadar her çevrimde elde edilen maksimum moment değerleri verilmektedir. Kaynaklı birleşim örneğinde, analizin 0,06 radyan pozitif dönme değerinin ilk çevriminde böyle bir azalma görülürken, EBLK birleşim örneğinde 0,06 radyan negatif dönme değerinin ilk çevriminde görülmektedir. Söz konusu her iki birleşimde de sistemin moment kapasitesine 0,05 radyan dönme değerinde ulaşılmaktadır. Bu durumda sözü edilen iki birleşim maksimum moment kapasitelerine ulaştıktan 0,01 radyan dönme değerinden sonra göçme mekanizmalarına ulaştıkları söylenebilir. ZKEK birleşim örneğinde ise, birleşimde göçme mekanizması 0,05 radyan negatif dönme değerinin ilk çevriminde görülürken, sistemin maksimum moment kapasitesi 0,02 radyan dönme değerinde görülmektedir. Bu durumda bu birleşim ise maksimum moment kapasitesine ulaştıktan 0,03 radyan dönme değerinden sonra göçme mekanizmasına ulaşılmaktadır.

Çizelge 5. 7 Birleşimlerde çevrimsel yükleme altında maksimum moment kapasitesine ulaştıktan sonra, her çevrimde okunan maksimum moment değerleri

Dönme	Kaynaklı birleşim		EBLK Birleşim		ZKEK Birleşim	
	M _{maks}	%(M _{maks} /M _{taş})	M _{maks}	%(M _{maks} /M _{taş})	M _{maks}	%(M _{maks} /M _{taş})
-0,02	-	-	-	-	150,9*	100
0,02	-	-	-	-	149,3	98,94
-0,02	-	-	-	-	149,6	99,14
0,02	-	-	-	-	147,3	97,61
-0,03	-	-	-	-	147,4	97,68
0,03	-	-	-	-	141,9	94,04

Çizelge 5. 7 Birleşimlerde çevrimsel yükleme altında maksimum moment kapasitesine ulaştıktan sonra, her çevrimde okunan maksimum moment değerleri (devamı)

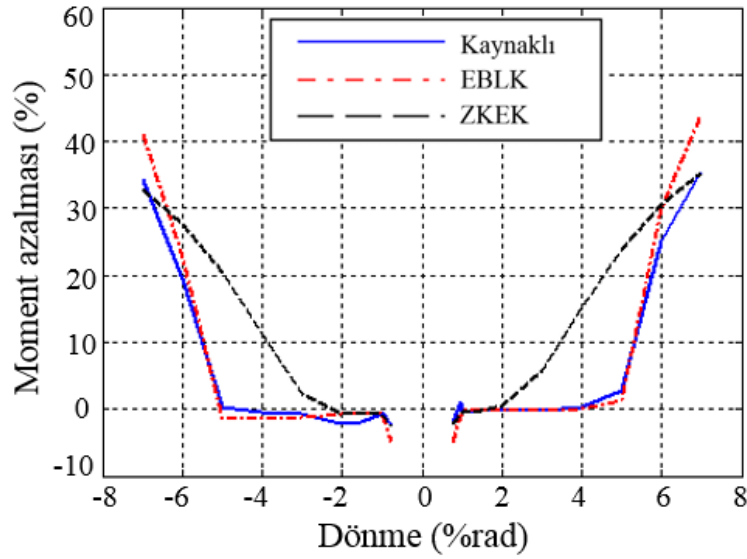
-0,03	-	-	-	-	140,7	93,24
0,03	-	-	-	-	135,9	90,06
-0,04	-	-	-	-	132,8	88,01
0,04	-	-	-	-	126,6	83,90
-0,04	-	-	-	-	125,1	82,90
0,04	-	-	-	-	120,7	80,00
-0,05	185,5*	100	258,2*	100	116,7	77,34^t
0,05	180,6	97,36	251,5	97,74	111,6	73,96
-0,05	178,3	96,12	243,7	94,38	110,4	73,16
0,05	168,9	91,05	217,5	84,24	106,2	69,91
-0,06	150,8	81,29	198,9	77,03^t	103,3	68,46
0,06	140,2	75,58^t	179,3	69,44	99,23	65,76
-0,06	134,6	72,56	173,5	67,20	98,28	65,13
0,06	130	70,08	162,4	62,90	94,85	62,86
-0,07	122,7	66,15	152	58,87	92,5	61,30
0,07	102,3	64,85	144,1	55,81	89,23	59,13
-0,07	114,9	61,94	138	53,45	88,53	58,67
0,07	114,4	61,67	132,6	51,36	85,73	56,81

*Birleşimin moment taşıma kapasitesi,

^tÇevrimdeki maksimum momentin, moment taşıma kapasitesinin %80'inin altına düştüğü ilk çevrim.

Şekil 5.59 – Şekil 5.61'den görüldüğü üzere, her üç birleşimde de belli bir dönme değerinden sonra, aynı dönme değeri için monotonik ve çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Bu eğrilerin doğrusal olmayan bölgesinde aynı dönme değeri için monotonik yükleme altında taşınan moment değerinin, çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Birleşimlerde gözlemlenen moment taşıma değerlerindeki azalmanın daha iyi anlaşılması için Şekil 5.62’de bu azalma miktarı yüzde olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. 62 Birleşimlerde her dönme için çevrimsel ve monotonik yükleme altında meydana gelen maksimum moment farkları

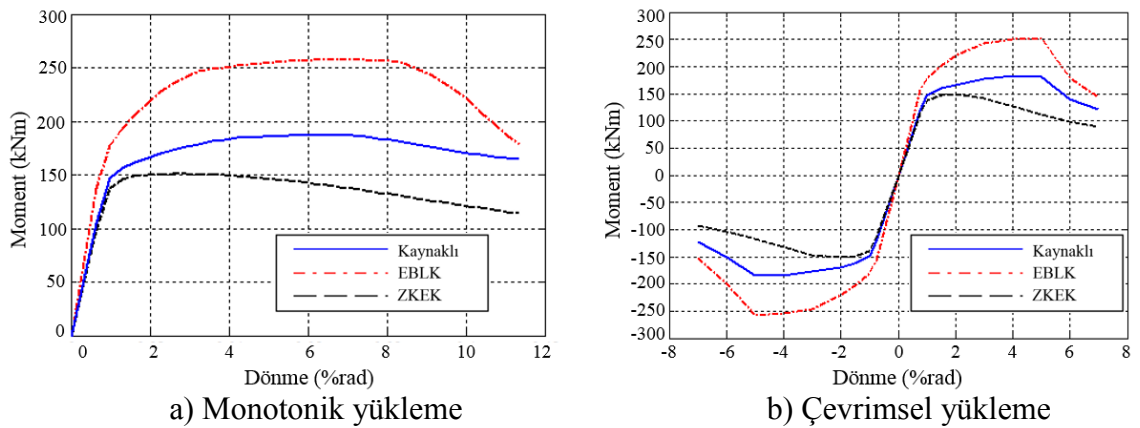
Şekil 5.62’den görüldüğü üzere, monotonik ve çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerleri arasında en fazla fark EBLK birleşim örneğinde görülmektedir. Dönme değeri pozitif değerini aldığı anda, bu fark daha fazla olup yaklaşık %43 olurken, dönmenin negatif değerinde yaklaşık %40 olmaktadır. Diğer birleşim örneklerinde, dönmenin pozitif ve negatif değerlerinde yüzde olarak yaklaşık olarak aynı moment taşıma değeri azalması görülmüş olup, bu azalma miktarı yaklaşık %34 olmaktadır. Her üç birleşim örneğinde de dönmenin yaklaşık olarak %-1 ile %1 arasında olduğu durumda, moment taşıma değerindeki azalmanın negatif yani, çevrimsel yükleme altında taşınan moment değerinin, monotonik yükleme altında taşınan moment değerinden fazla olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.8’de her üç birleşimin monotonik ve çevrimsel yükleme altında ulaşabildikleri maksimum moment değerleri verilmektedir. Moment taşıma kapasitelerine bakıldığında, birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasitelerinin aynı olduğu söylenebilir. Birleşimlerin birbirleriyle karşılaştırılmasında ise, en fazla moment kapasitesine EBLK birleşim örneği sahip olurken, en az moment kapasitesine ise ZKEK birleşim örneği sahip olmaktadır. EBLK birleşim örneği Kaynaklı birleşim örneğinden %38 daha fazla moment kapasitesine sahip olduğu, ZKEK birleşim örneğinden ise %71 daha fazla moment kapasitesine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 8 Birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment kapasiteleri

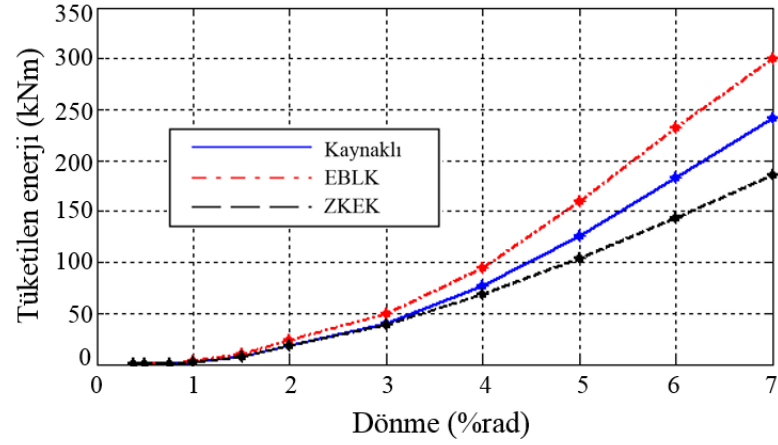
Birleşim	Moment taşıma kapasitesi (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
Kaynaklı	187,2	185,5
EBLK	257,5	258,2
ZKEK	150,8	150,9

Birleşimlerin performanslarını birbirleriyle daha iyi karşılaştırabilmek için Şekil 5.63'te birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki moment – dönme eğrilerinden elde edilen dayanım zarfları verilmektedir. Başlangıçta, monotonik ve çevrimsel yükleme altında Kaynaklı ve ZKEK birleşim örneklerinin taşıdığı moment değerleri yaklaşık olarak aynı seviyelerdeyken, yaklaşık %1 dönme değerinden sonra, Kaynaklı birleşim örneğinin daha fazla moment taşıdığı görülmektedir. Monotonik yükleme altında, EBLK birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinde dönme değeri yaklaşık %8'e ulaştığında büyük bir azalma görülürken, diğer birleşim örneklerinde bu dönme değerindeki azalmanın daha küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, Kaynaklı birleşim örneğinin moment taşıma değerinde yaklaşık %7 dönme değerinden sonra, ZKEK birleşim örneğinin moment taşıma değerinde ise yaklaşık %4 dönme değerinden sonra azalma görülmektedir. Çevrimsel yükleme altında ise, dönme değeri yaklaşık %5'e ulaştıktan sonra Kaynaklı ve EBLK birleşim örneklerinin moment taşıma değerlerinde azalma görülürken, ZKEK birleşim örneğinde ise yaklaşık %3 dönme değerinden sonra azalma görülmektedir.

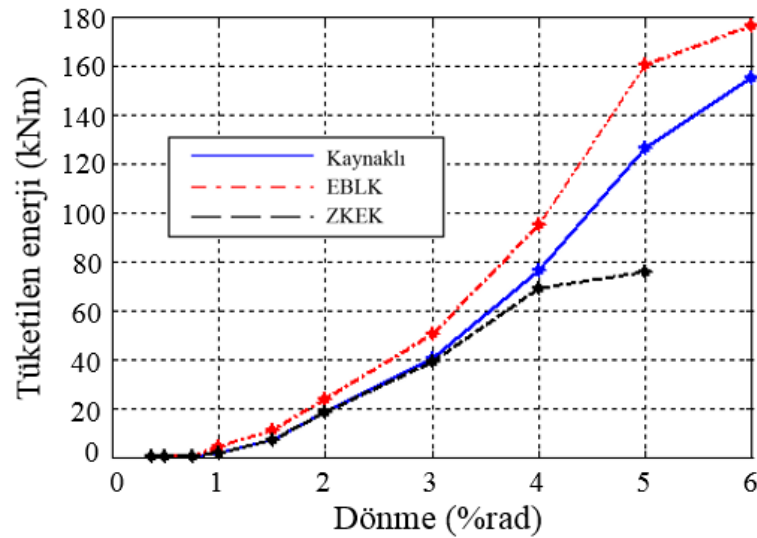


Şekil 5. 63 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri ve çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları

Çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin alanı ile elde edilmiş olan birleşimlerin tüketilen enerji değerlerinin analizin başlangıcından bitimine kadar değişimini incelemek amacıyla Şekil 5.64’de her üç birleşimin tüketilen enerji – dönme eğrileri verilmektedir. Şekil 5.65’te ise, birleşimlerde göçme mekanizması olduğu kabul edilen, Kaynaklı ve EBLK birleşim örnekleri için %6 radyan dönmenin ilk çevrimine kadar, ZKEK birleşim örneği için %5 radyan dönmenin ilk çevrimine kadar hesaplanan tüketilen enerji – dönme eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.64 ve Şekil 5.65’ten görüldüğü üzere, enerji tüketme kapasitesi en fazla olan birleşim EBLK birleşim örneği olurken, en az enerji tüketme kapasitesine sahip olan birleşim ZKEK birleşim örneği olmaktadır. %3 dönme değerine kadar Kaynaklı ve ZKEK birleşim örneklerinin tükettiği enerji değeri yaklaşık olarak aynı iken, bu dönme değerinden sonra, Kaynaklı birleşim örneğinin daha fazla enerji tükettiği görülmektedir.



Şekil 5. 64 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri



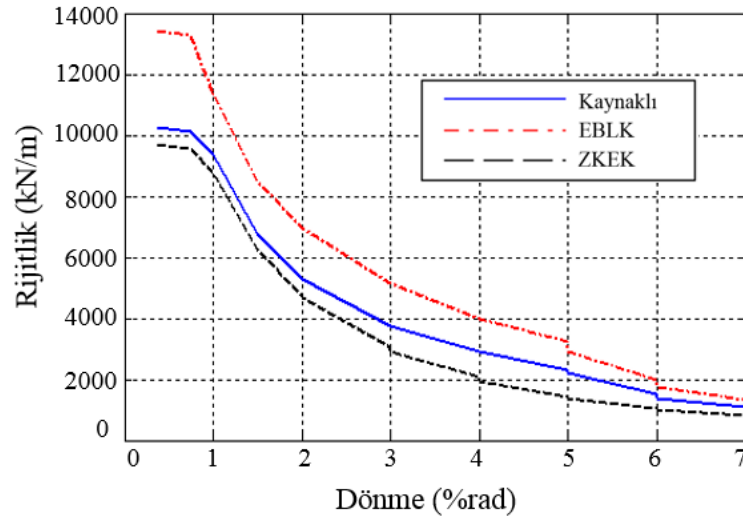
Şekil 5. 65 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri

Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve moment – dönme eğrisinden elde edilen başlangıç dönme rijitlikleri Çizelge 5.9’da verilmiştir. Başlangıç dönme rijitlikliği en büyük olan birleşim EBLK birleşim örneği olurken, en küçük başlangıç dönme rijitliğine sahip olan birleşimin ZKEK birleşim olduğu görülmekle birlikte, Kaynaklı ve ZKEK birleşim örneklerinin başlangıç dönme rijitlikleri birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. 9 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri

Birleşim	Enerji tüketme kapasitesi (Analiz sonuna kadar) (kNm)	Enerji tüketme kapasitesi (Göçme oluşana kadar) (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
Kaynaklı	241,5	155,2	15926
EBLK	300,7	176,1	20455
ZKEK	186,5	75,91	15237

Birleşimlerin çevrimsel yükleme altındaki kuvvet – yer değiştirme eğrilerinden elde edilen rijitlik değerlerinin dönme ile ilişkileri Şekil 5.66’da gösterilmektedir. Birleşimlere uygulanan çevrim sayısının artmasıyla rijitlik değerlerinde azalma görülmektedir. Analiz boyunca en fazla rijitliğe EBLK birleşim örneğinin, en az rijitliğe ise ZKEK birleşim örneğinin sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 66 Birleşimlerin analiz süresince rijitlik – dönme eğrileri

5.2.3.3 Kaynaklı Birleşimlerin Değerlendirilmesi

İncelenen kaynaklı birleşim örneklerinde, hasar durumları kiriş başlıklarında ve gövdesinde burkulma ile meydana gelmektedir. Kirişte görülen plastik mafsallar, EBLK birleşim örneğinde başlık levhasının sonunda, ZKEK birleşim örneğinde kesitin zayıflatılmış bölgesinde ve Kaynaklı birleşim örneğinde kolon yüzünden yaklaşık olarak 50 mm uzaklıkta meydana gelmektedir.

Her üç birleşim de çevrimsel yükleme altında uygulanan bütün çevrimleri tamamlamış olmakla birlikte, Kaynaklı ve EBLK birleşim örnekleri %6, ZKEK birleşim örneği ise %5 dönme değerinde göçme mekanizmalarına ulaştığı dikkate alınmaktadır. Bu durumda her üç birleşim de DBYBHY-2007’de belirtilen %4 göreceli kat ötelemesi açısını sağlamaktadır.

Birleşimler moment kapasiteleri bakımından karşılaştırılacak olursa, EBLK birleşim örneği en fazla moment kapasitesine sahip birleşim olurken, moment kapasitesi Kaynaklı birleşim örneğinden %38, ZKEK birleşim örneğinden %71 daha fazladır.

Enerji tüketme kapasiteleri bakımından karşılaştırılacak olursa, EBLK birleşim örneğinin daha fazla enerji tükettiği ve tükettiği enerji miktarının Kaynaklı birleşim örneğinden %25, ZKEK birleşim örneğinden %61 daha fazla olduğu görülmektedir.

Başlangıç dönme rijitlikleri ve rijitlik değerleri incelendiğinde, EBLK birleşim örneğinin diğer birleşimlerden daha fazla rijitliğe sahip olduğu görülmektedir.

Ele alınan sonuçlar çerçevesinde, EBLK birleşim örneğinin diğer kaynaklı birleşimlere göre daha üstün ve güvenilir olduğu görülmektedir.

5.2.4 TALB ve EBLK Birleşim Örneklerinin Karşılaştırılması

Bu bölümden bulonlu ve kaynaklı birleşim örneklerinin karşılaştırılmasında öne çıkan birleşimler yani, bulonlu birleşimlerden TALB, kaynaklı birleşimlerden ise EBLK birleşim örnekleri birbiriyle karşılaştırılacaktır.

5.2.4.1 Hasar Durumları ve Plastik Mafsal Yerleri

Her iki birleşim örneklerinde de hasar durumları kiriş başlıkları ve gövdesine burkulma ile meydana gelmektedir. Plastik mafsal oluşma noktaları TALB birleşim için alın takviye levhasının bittiği yerde, EBLK birleşim için ek başlık levhasının bittiği yerde

gözlenmektedir. Bu durumda her iki birleşimde de plastik mafsallar birleşim bölgesinden uzakta, kiriş üzerinde meydana gelmektedir.

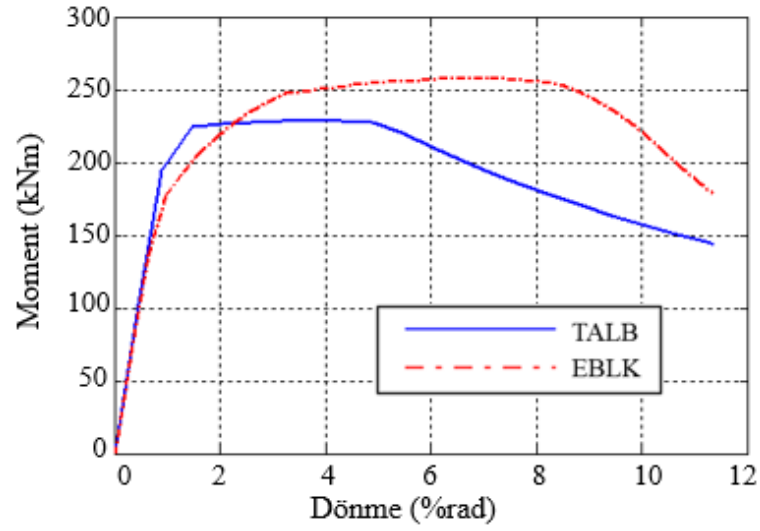
5.2.4.2 Kuvvet – Yer Değiştirme Eğrileri

Her iki birleşim de monotonik yükleme altında uygulanan 150 mm'lik yer değiştirme değerine kadar ulaşmış ve çevrimsel yükleme altında uygulanan tüm çevrimleri tamamlamışlardır. Çevrimsel yükleme altında TALB birleşim örneği %4 dönme değerinin son çevriminde, EBLK birleşim örneği ise %6 dönme değerinin ilk çevriminde göçme mekanizmalarına ulaşmaktadır.

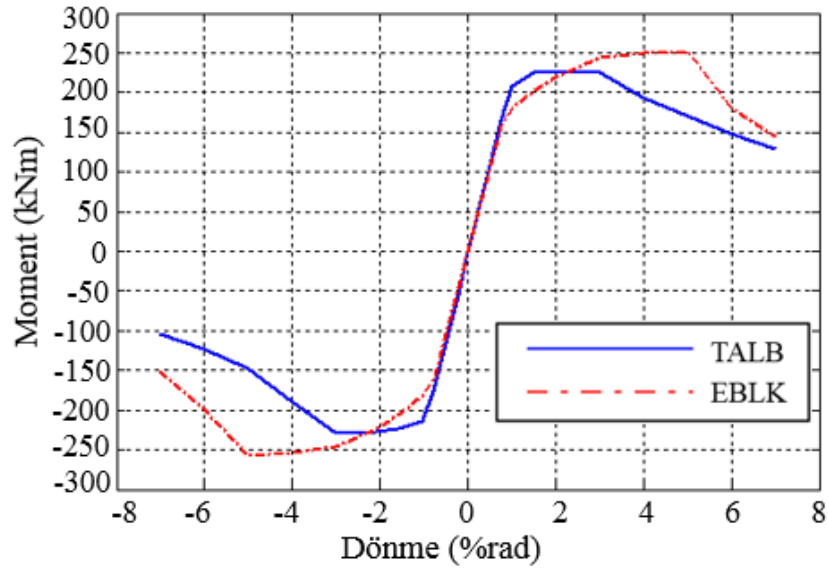
Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri Şekil 5.67'de, çevrimsel yükleme altındaki moment – dönme eğrilerinden elde edilmiş olan dayanım zarfları Şekil 5.68'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Monotonik ve çevrimsel yükleme altındaki moment taşıma kapasiteleri ise Çizelge 5.10'da verilmektedir.

Şekil 5.67 ve Şekil 5.68'deki karşılaştırmalardan görüldüğü üzere, yaklaşık olarak %2 dönme değerine kadar TALB birleşim örneğinin taşıdığı moment daha fazla iken, bu dönme değerinden sonra, EBLK birleşim örneğinin taşıdığı moment değerinde artış görülmekte ve diğer birleşimde yaklaşık olarak sabit gitmektedir. Bu durumda çizelge 5.10'da görüldüğü gibi, EBLK birleşim örneğinin moment taşıma kapasitesi, TALB birleşim örneğinin moment taşıma kapasitesinden yaklaşık olarak %13 daha fazla olmaktadır.

Birleşimlerin tüketilen enerji değerlerinin analizin başlangıcından bitimine kadar değişimini incelemek amacıyla Şekil 5.69'da her üç birleşimin tüketilen enerji – dönme eğrileri verilmektedir. Şekil 5.70'de ise, birleşimlerde göçme mekanizması olduğu kabul edilen, TALB birleşim örneği için %4 radyan dönmenin son çevrimine kadar, EBLK birleşim örneği için %6 radyan dönmenin ilk çevrimine kadar hesaplanan tüketilen enerji – dönme eğrileri gösterilmektedir. Çizelge 5.11'de ise birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve moment – dönme eğrisinden elde edilen başlangıç dönme rijitlikleri verilmektedir.



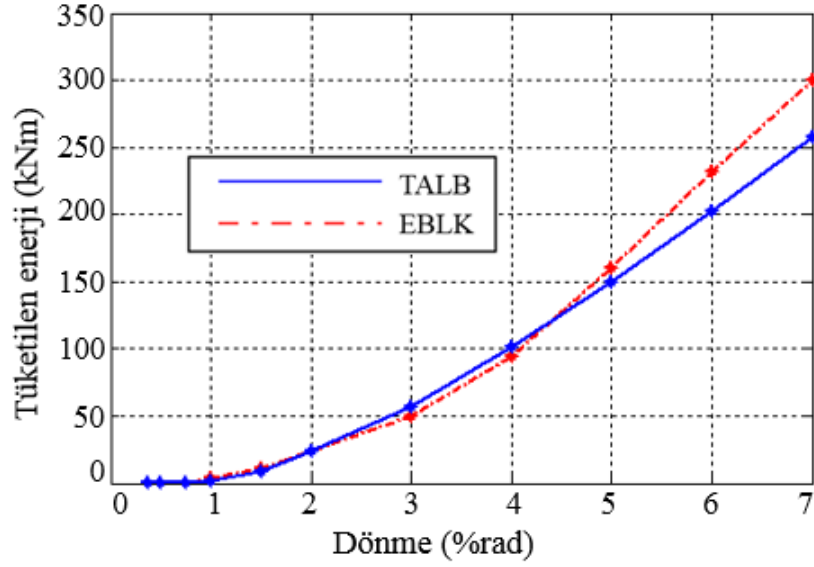
Şekil 5. 67 Birleşimlerin monotonik yükleme altındaki moment – dönme eğrileri



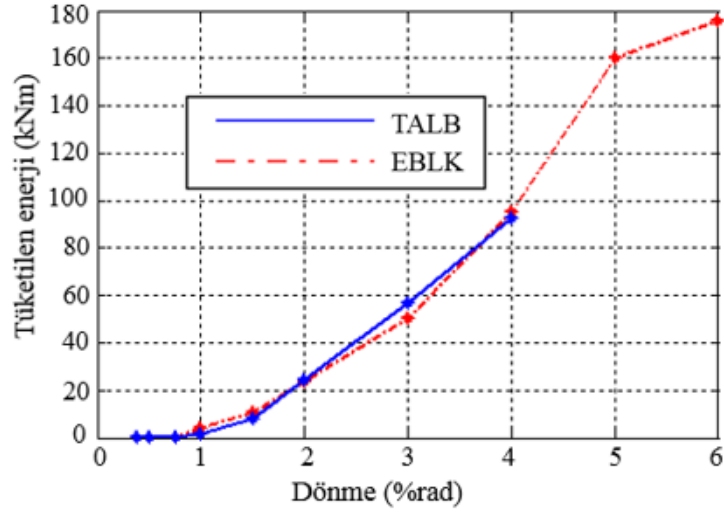
Şekil 5. 68 Birleşimlerin çevrimsel yükleme altındaki dayanım zarfları

Çizelge 5. 10 TALB ve EBLK birleşim örneklerinin moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Birleşim	Moment taşıma kapasitesi (kNm)	
	Monotonik yükleme	Çevrimsel yükleme
TALB	228,7	228,3
EBLK	257,5	258,2



Şekil 5. 69 Birleşimlerin analiz süresince elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri



Şekil 5. 70 Birleşimlerde göçme mekanizması gelinceye kadar elde edilen tüketilen enerji – dönme eğrileri

Çizelge 5. 11 Birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri ve başlangıç dönme rijitlikleri

Birleşim	Enerji tüketme kapasitesi (Analiz sonuna kadar) (kNm)	Enerji tüketme kapasitesi (Göçme oluşana kadar) (kNm)	Başlangıç dönme rijitliği (kNm/rad)
TALB	258,36	92,51	22451
EBLK	300,7	176,1	20455

Şekil 5.69, Şekil 5.70 ve Çizelge 5.11'den görüldüğü üzere, enerji tüketme kapasitesi en fazla olan birleşim EBLK birleşim örneğidir. Bu birleşimin enerji tüketme kapasitesi TALB birleşim örneğinin enerji tüketme kapasitesinden analiz sonunda %16, göçme

oluştugu durumda, TALB birleşim örneği daha erken göçme mekanizmasına ulaştığı için, %90 daha fazla olmaktadır. Başlangıç dönme rijitliği en büyük olan birleşim TALB birleşim örneği olurken, EBLK birleşim örneğinden yaklaşık olarak %10 daha fazladır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, DBYBHY-2007’de belirtilen moment aktaran çelik kolon – kiriş birleşimlerinin monotonik ve çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan geometri değişimi ve malzeme özellikleri kullanılmış olup, birleşimdeki parçalar arasındaki temaslar da doğrusal veya doğrusal olmayan olarak dikkate alınmıştır. Sözü edilen birleşimlerin analizlerini yapmadan önce, sonlu eleman modellemelerini doğrulama amacıyla, literatürden deneysel ve sonlu eleman analizleri yapılmış iki adet alın levhalı bulonlu birleşimlerin analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar şöyle açıklanabilir:

- Literatürden alınan iki adet alın levhalı bulonlu birleşimlerin bu çalışmadaki sonuçlarıyla, literatürdeki deneysel ve sonlu eleman sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Yalnız bir adet birleşimin moment – dönme eğrisinin elastik bölgesinde küçük uyumsuzluklar görülmüş olup, bunun sebebinin sonlu eleman yoğunluğu ve/veya seçilen temas türleri olduğu düşünülmektedir.
- DBYBHY-2007’de belirtilen ALB birleşim dışındaki birleşimlerin, kiriş başlıkları ve gövdesinin burkulması sebebiyle göçme mekanizmalarına ulaşmış olduğu yani, plastik mafsalların birleşim bölgesinin dışında, kiriş üzerinde olduğu görülmüştür. ALB birleşim örneğinde de hasar durumu kirişte gözlemlenmiştir, fakat bu birleşimin kiriş başlığında bulunan bulon deliğindeki yırtılma ile göçme mekanizmasına ulaştığı, yani istenmeyen bir kırılma biçimi gösterdiği görülmüştür.
- Bulonlu birleşimlerden TALB ve ALB birleşim örneklerinin yaklaşık olarak aynı moment kapasitesine sahip oldukları görülürken, TSALB birleşim örneğinin

moment kapasitesinin diğer bulonlu birleşimlerin moment kapasitesinden daha az olduğu görülmüştür. Kaynaklı birleşimlerde ise, EBLK birleşim örneğinin en fazla moment kapasitesine sahip birleşim olduğu görülürken, ZKEK birleşim örneğinin en az moment kapasitesine sahip birleşim olduğu görülmüştür.

- Birleşimlere monotonik yükleme olarak 150 mm yer değiştirme ve çevrimsel yükleme olarak en fazla %7 radyan dönme değerine kadar çevrimsel yer değiştirme uygulanmıştır. ALB birleşim örneği dışındaki birleşimler her iki yüklemeyi de tamamlamışlardır. ALB birleşim örneği monotonik yükleme altında 102 mm yer değiştirme değerine ulaştığında ve çevrimsel yükleme altında %4 radyan dönmenin ilk çevrimini tamamlayamadığı görülmüştür. Diğer birleşimler çevrimsel yükleme altında uygulanan tüm çevrimleri tamamladığı halde, FEMA-350'ye göre her biri son çevrime ulaşmadan daha önce göçme mekanizmalarına ulaşmışlardır. TSALB ve ZKEK birleşim örnekleri %5 radyan dönmenin ilk çevriminde, TALB birleşim örneği %4 radyan dönmenin son çevriminde, Kaynaklı ve EBLK birleşim örnekleri %6 radyan dönmenin ilk çevriminde göçme mekanizmalarına ulaştıkları söylenebilir. Böylelikle, tüm birleşimlerin DBYBHY-2007'de belirtilen %4 radyan dönme kapasitesine sahip olması durumunu sağladığı görülmüştür.
- ALB birleşim örneğinin göstermiş olduğu istenmeyen kırılma biçiminin tasarım sürecinde olan %1,03 oranındaki hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Tasarım sürecinde ALB birleşimin kiriş enkesitinden yırtılma ile göçme mekanizmasına ulaşması kontrolü sağlanamamıştır. Bu birleşim örneğinin tüm özelliklerinin DBYBHY-2007'de belirtilen ALB birleşimin uygulama sınırları dahilindedir. Yani, uygulanma sınırlarına uyulduğu halde, istenmeyen kırılma biçimi gösterdiği görülmüştür.
- ALB birleşim dışındaki birleşimlerde ilerleyen dönme değerlerinde monotonik ve çevrimsel yükleme altında taşıyabildiği moment değerleri arasında farklılıklar olduğu görülmüştür. Dönme arttıkça çevrimsel yükleme altında taşınan momentin, monotonik yükleme altında taşınan momente göre daha fazla düştüğü görülürken, moment taşıma kapasitelerinin yükleme türüne göre değişmediği görülmüştür. Dönme arttıkça moment taşıma değerlerinde farklılıklar görülmesine rağmen, çevrimsel yükleme altında diğer birleşimlere göre iyi veya

kötü performans gösteren birleşimin, monotonik yükleme altında da diğer birleşimlere göre aynı performansı gösterdiği görülmüştür. Bu durumda farklı birleşim türlerini birbirleriyle karşılaştırmak için sadece monotonik yüklemekten faydalanabileceği söylenebilir.

- Ele alınan bu incelemeler çerçevesinde, bulonlu birleşimlerden TALB birleşim örneğinin, kaynaklı birleşimlerden EBLK birleşim örneğinin moment ve enerji tüketme kapasiteleri ve rijitlik değerleri bakımından diğer birleşimlere göre daha üstün ve güvenilir oldukları görülmüştür. Bu iki birleşimin karşılaştırılmasında ise EBLK birleşim örneğinin daha fazla moment ve enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu ve TALB birleşim örneğinden daha üstün olduğu görülmüştür.
- Bu tez kapsamında incelenen birleşimler, monotonik yükleme altında ve FEMA-350’de belirtilen yükleme protokolüne göre çevrimsel yükleme altında incelenmiş olup, modellemede yapının diğer elemanlarının etkisi dikkate alınmamıştır. İleriki çalışmalarda, birleşimlerin tüm sistem içerisinde olmasının dikkate alınması ve kompozit döşeme gibi diğer yapı elemanları ile birlikte davranışının incelenmesi gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Han, S.W., Kwon, G.U. ve Moon, K.H., (2007). “Cyclic Behaviour of Post-Northridge WUF-B Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 63: 365–374.
- [2] Hedayat, A.A. ve Celikag, M., (2009). “Post-Northridge Connection with Modified Beam End Configuration to Enhance Strength and Ductility”, *Journal of Constructional Steel Research*, 65:1413–1430.
- [3] Miller, D.K., (1998). “Lessons Learned from the Northridge Earthquake”, *Engineering Structures*, 20:249–260.
- [4] Ricles, J.M., Mao, C., Lu, L.W. ve Fisher, J.W., (2003). “Ductile Details for Welded Unreinforced Moment Connections Subject to Inelastic Cyclic Loading”, *Engineering Structures*, 25: 667–680.
- [5] Roeder, C.W., (2002). “Connection Performance for Seismic Design of Steel Moment Frames”, *Journal of Structural Engineering*, 128(4): 517-525.
- [6] Roeder, C.W., (2003). “Prequalification of Steel Moment-Frame Connection Performance”, *Earthquake Spectra*, 19(2): 291–308.
- [7] ANSI/AISC 358-10, (2010). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*, AISC, Chicago, IL.
- [8] FEMA 350, (2000). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*, Federal Emergency Management Agency.
- [9] T.C. Resmi Gazete, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. (26454), 06.03.2007
- [10] Öztürk, Z., (2009). *Çelik Yapılar Kısa Bilgi ve Çözölmüş Problemler*, 5. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [11] EN 1993-1-8, (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, European Committee for Standardization.
- [12] Lu, L.W., Ricles, J.M., Mao, C. ve Fisher, J.W., (2000). “Critical Issues in Achieving Ductile Behaviour of Welded Moment Connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 55: 325–341.
- [13] Deren, H., Uzgider, E., Piroğlu, F. ve Çağlayan, Ö., (2012). *Çelik Yapılar*, 4. Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

- [14] Tsai, K.C. ve Popov, E.P., (1990). "Cyclic Behavior of End-plate Moment Connections". *Journal of Structural Engineering*, 116(11): 2917-2930.
- [15] Sherbourne, A.N. ve Bahaari, M.R., (1994). "3D Simulation of End-plate Bolted Connections", *Journal of Structural Engineering*, 120(11): 3122-3136.
- [16] Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N., (1996). "Structural Behavior of End-plate Bolted Connections to Stiffened Columns", *Journal of Structural Engineering*, 122(8): 926-935.
- [17] Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N., (1996). "3D Simulation of Bolted Connections to Unstiffened Columns - II. Extended Endplate Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 40(3): 189-223.
- [18] Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N., (2000). "Behavior of Eight-bolt Large Capacity Endplate Connections", *Computers and Structures*, 77: 315-325.
- [19] Adey, B.T., (1997). *Extended End Plate Moment Connections Under Cyclic Loading*, Yüksek Lisans Tezi, University of Alberta Faculty of Graduate Studies and Research, Edmonton.
- [20] Ryan, Jr.J.C., (1999). *Evaluation of Extended End-Plate Moment Connections Under Seismic Loading*, Yüksek Lisans Tezi, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [21] Yorgun, C., (2002). "Evaluation of Innovative Extended End-Plate Moment Connections Under Cyclic Loading", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26: 483-492.
- [22] Yorgun, C. ve Bayramoğlu, G., (2001). "Cyclic tests for welded-plate sections with end-plate connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 57: 1309–1320.
- [23] Sumner, E.A. ve Murray, T.M., (2002). "Behavior of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading", *Journal of Structural Engineering*, 128(4): 501-508.
- [24] Sumner, E.A., (2003). *Unified Design of Extended End-Plate Moment Connections Subject to Cyclic Loading*, Doktora Tezi, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [25] Schneider, S.P. ve Teeraparbong, I., (2002). "Inelastic Behavior of Bolted Flange Plate Connections", *Journal of Structural Engineering*, 128(4): 492-500.
- [26] Coelho, A.M.G., Bijlaard, F.S.K. ve da Silva, L.S., (2004). "Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections", *Engineering Structures*, 26: 1185–1206.
- [27] Maggi, Y.I., Gonçalves, Y.M., Leon R.T. ve Ribeiro, L.F.L., (2005). "Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling", *Journal of Constructional Steel Research*, 61: 689–708.
- [28] Shi, Y., Shi, G. ve Wang, Y., (2007). "Experimental and theoretical analysis of the moment–rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 63: 1279–1293.

- [29] Guo, B., Gu, Q. ve Liu, F., (2006). “Experimental Behavior of Stiffened and Unstiffened End-Plate Connections under Cyclic Loading”, *Journal of Structural Engineering*, 132(9): 1352-1357.
- [30] Shi, G., Shi, Y. ve Wang, Y., (2007). “Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading”, *Engineering Structures*, 29: 703–716.
- [31] Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. ve Bradford, M.A., (2008). “Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details”, *Engineering Structures*, 30: 2677–2686.
- [32] Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V. ve Daryan, A.S., (2011). “Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts”, *Journal of Constructional Steel Research*, 67: 690–705.
- [33] Mashaly, E., El-Heweity, M., Abou-Elfath, H. ve Osman, M., (2011), “Behavior of four-bolt extended end-plate connection subjected to lateral loading”, *Alexandria Engineering Journal*, 50:79-90.
- [34] Mashaly, E., El-Heweity, M., Abou-Elfath, H. ve Osman, M., (2011), “Finite element analysis of beam-to-column joints in steel frames under cyclic loading”, *Alexandria Engineering Journal*, 50: 91–104.
- [35] Hatipoğlu, E.T., (2011). Zayıflatılmış ve Güçlendirilmiş Tipteki Çelik Kolon-Kiriş Birleşimlerinin Deprem Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [36] Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T. ve Al Nasra, M., (2012), “Finite Element Analysis of Large Capacity Endplate Steel Connections”, *Journal of Computer Science*, 8(4): 482-493.
- [37] Baei, M., Ghassemieh, M. ve 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.
- [38] Abidelah, A., Bouchaïr, A. ve Kerdal, D.E., (2012), “Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners”, *Journal of Constructional Steel Research*, 76:13-27.
- [39] Dessouki, A.K., Youssef, A.H. ve Ibrahim, M.M., (2013), “Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections”, *Ain Shams Engineering Journal*, 4: 685–699.
- [40] Wang, M., Shi, Y., Wang, Y. ve Shi, G., (2013), “Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 90:140:152.
- [41] Ismail, R.E.S., Fahmy, A.S., Khalifa, A.M. ve Mohamed, Y.M., (2014), “Behavior of End-Plate Steel Connections Stiffened with Stiffeners of Different Geometrical Dimensions”, *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation*, 3(3):55-69.
- [42] Shaker, F.M.F. ve Abd Elrahman, W.M., (2014), “Analytical Behavior of Steel Pre-tensioned Bolted Connections with Flushed and Extended End Plates under Bending”, *World Applied Sciences Journal*, 30(6): 673-684.

- [43] Taufik, S., (2013), “Numerical Modelling of Semi-rigid Connection with High Strength Steel”, *Study of Civil Engineering and Architecture*, 2(2):38-47.
- [44] Saberi, V., Gerami, M. ve Kheyroddin, A., (2014), “Comparison of bolted end plate and T-stub connection sensitivity to component thickness”, *Journal of Constructional Steel Research*, 98: 134–145.
- [45] Prinz, G.S., Nussbaumer, A., Borges, L. ve Khadka, S., (2014), “Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row”, *Engineering Structures*, 59: 434–447.
- [46] Yılmaz, O. ve Bekiroğlu, S., (2014). “Behavior of pretensioned bolted steel column beam connections subjected to monotonic loading”, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering, 21-25 Ekim 2014, İstanbul.
- [47] Ricles, J., Mao, C., Lu, L., ve Fisher, J., (2002), “Inelastic Cyclic Testing of Welded Unreinforced Moment Connections”, *Journal of Structural Engineering*, 128(4): 429–440.
- [48] Stojadinovic, B., Goel, S.C., Lee, K.H., Margarian, A.G. ve Choi, J.H., (2000), “Parametric Tests on Unreinforced Steel Moment Connections”, *Journal of Structural Engineering*, 126(1): 40-49.
- [49] Chen, C.C., Chen, S.W., Chung, M.D. ve Lin, M.C., (2005), “Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 61:1-21.
- [50] Pachoumis, D.T., Galoussis, E.G., Kalfas, C.N. ve Efthimiou, I.Z., (2010), “Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections - experimental analysis and finite element model simulation”, *Engineering Structures*, 32: 2683-2692.
- [51] Gholami, M., Deylami, A. ve Tehranizadeh, M., (2013), “Seismic performance of flange plate connections between steel beams and box columns”, *Journal of Constructional Steel Research*, 84: 36–48.
- [52] Nia, Z.S., Ghassemieh, M. ve Mazroi, A., (2013), “WUF-W connection performance to box column subjected to uniaxial and biaxial loading”, *Journal of Constructional Steel Research*, 88: 90–108.
- [53] Han, S.W., Moon, K.H. ve Jung, J., (2014), “Cyclic Performance of Welded Unreinforced Flange–Welded Web Moment Connections”, *Earthquake Spectra*, 30(4):1663-1681.
- [54] ANSYS, (2015). Incorporated programmers manual for ANSYS, ANSYS Inc.

TEZ KAPSAMINDA ELE ALINMIŞ OLAN BİRLEŞİM ÖRNEKLERİNİN BOYUTLANDIRMASI

Tez kapsamında sonlu eleman analizleri yapılmış olan birleşimler, aynı şartlar altında FEMA-350'ye göre boyutlandırılmış olup, levha boyutları, bulon çapları gibi değişken parametreler minimum olarak seçilmeye çalışılmıştır.

Kolon için HE240B profil, kiriş için IPE270 profil seçilmiş olup, bu profillerin özellikleri Çizelge A-1'de verilmektedir. Profillerin atalet momenti, mukavemet momenti ve plastik mukavemet momenti değerleri, kesit başlıkları ve gövdesi dikdörtgen olarak modellendiği için, profil tablosundan alınmamış olup, sırasıyla Eşitlik (A-1), (A-2) ve (A-3) ile hesaplanmıştır. Kiriş açıklığının 5 m olduğu kabul edilmiştir, böylece kolon eksenleri arasındaki uzaklık (L) 5,24 m olarak elde edilmektedir.

Çizelge 0-1 HE240B ve IPE270 profillerinin geometrik özellikleri

Profil	Gövde kalınlığı	Başlık kalınlığı	Kesit yüksekliği	Başlık genişliği
HE240B	(s _c) 10	(t _c) 17	(h _c) 240	(b _c) 240
IPE270	(s _b) 6,6	(t _b) 10,2	(h _b) 270	(b _b) 135

Kirişin atalet momenti Eşitlik (A.1) ile hesaplanmıştır.

$$I = 2 \cdot \left(\frac{b_b \cdot t_b^3}{12} + b_b \cdot t_b \cdot \left(\frac{h_b - t_b}{2} \right)^2 \right) + \frac{s_b \cdot (h_b - 2 \cdot t_b)^3}{12} \quad (\text{A.1})$$

$$I = 2 \cdot \left(\frac{13,5 \cdot 1,02^3}{12} + 13,5 \cdot 1,02 \cdot \left(\frac{27 - 1,02}{2} \right)^2 \right) + \frac{0,66 \cdot (27 - 2 \cdot 1,02)^3}{12} = 5504,7 \text{ cm}^4$$

Kirişin mukavemet momenti Eşitlik (A.2) ile hesaplanmıştır.

$$W = \frac{I}{\left(\frac{h_b}{2}\right)} \quad (\text{A.2})$$

$$W = \frac{5504,7}{\left(\frac{27}{2}\right)} = 407,76 \text{ cm}^3$$

Kirişin plastik mukavemet momenti Eşitlik (A.3) ile hesaplanmıştır:

$$W_p = b_b \cdot t_b \cdot (h_b - t_b) + 0,25 \cdot s_b \cdot (h_b - 2 \cdot t_b)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$W_p = 13,5 \cdot 1,02 \cdot (27 - 1,02) + 0,25 \cdot 0,66 \cdot (27 - 2 \cdot 1,02)^2 = 460,54 \text{ cm}^3$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır:

$$M_{pr} = 1,1 \cdot D_a \cdot W_p \cdot \sigma_y \quad (\text{A.4})$$

Burada:

D_a : Arttırma katsayısı olup, 1,1 olarak alınmıştır

σ_y : Kiriş kesitinin akma gerilmesi

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır:

$$V_p = \frac{(M_{pr} + M_{pr}) + P \cdot L' / 2 + w \cdot L'^2 / 2}{L'} \quad (\text{A.5})$$

Burada:

P : Kiriş üzerindeki tekil yük

w : Kiriş üzerindeki yayılı yük

L' : Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu olup Eşitlik (A.6) ile hesaplanır:

$$L' = L - 2 \cdot S_h \quad (\text{A.6})$$

Burada:

S_h : Kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri

Kiriş üzerinde yayılı yük olmadığı kabul edilmiş olup, üzerinde 100 kN tekil yük olduğu kabul edilmiştir.

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır:

$$M_f = M_{pr} + V_p \cdot (S_h - h_c / 2) \quad (A.7)$$

Kolon eksenı üzerindeki moment Eşitlik (A.8) ile hesaplanır:

$$M_c = M_{pr} + V_p \cdot S_h \quad (A.8)$$

A-1 Takviyesiz Alın Levhalı Bulonlu Birleşim Örneği

A-1-1 Momentlerin Hesaplanması

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır.

$$M_{pr} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 460,54 \cdot 36 = 20061 \text{ kNcm}$$

Alın Levhalı Bulonlu Birleşimde kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri Eşitlik (A.9) ile belirlenir.

$$S_h = h_c / 2 + t_{ep} + h_b / 3 \quad (A.9)$$

Burada:

t_{ep} : Alın levhası kalınlığı

Bu birleşim örneğinde alın levhası kalınlığı 30 mm seçilmiştir.

$$S_h = 24 / 2 + 3 + 27 / 3 = 24 \text{ cm}$$

Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu Eşitlik (A.6) ile hesaplanır.

$$L' = 524 - 2 \cdot 24 = 476 \text{ cm}$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır.

$$V_p = \frac{(2 \cdot 20061) + 100 \cdot 476 / 2}{476} = 134,29 \text{ kN}$$

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır.

$$M_f = 20061 + 134,29 \cdot 12 = 21673 \text{ kNcm}$$

A-1-2 Bulon Çapı Kontrolü

Bulon çapı seçildikten sonra aşağıda verilen Eşitlik (A.10)'daki koşul sağlanmalıdır:

$$M_f < 2 \cdot T_{ub} \cdot (d_0 + d_1) \quad (A.10)$$

Burada:

T_{ub} : Bir bulonun dişdibi alanı ile taşıyabileceği maksimum çekme kuvveti

d_0 : Kiriş basınç başlığı ortasından, kiriş çekme başlığının üstündeki ilk çekme bulonunun merkezine uzaklığı

d_1 : Kiriş basınç başlığı ortasından, en yakın çekme bulonunun merkezine uzaklığı

Bu birleşim örneğinde M20 bulon seçilmiştir.

$$T_{ub} \approx 100 \cdot \frac{\pi(0,86 \cdot 2,1)^2}{4} = 256,19 \text{ kN}$$

$$d_0 = 27 - 1,02 / 2 + 4,5 = 30,99 \text{ cm}$$

$$d_1 = 27 - 1,02 - 1,02 / 2 - 4,5 = 20,97 \text{ cm}$$

$$21673 \text{ kNcm} < 2 \cdot 256,19 \cdot (30,99 + 20,97) = 26623,26 \text{ kNcm}$$

Bulon kesme güvenliğinin kontrolü için Eşitlik (A.11)'de verilen koşul sağlanmalıdır.

$$A_b \geq \frac{\frac{2 \cdot M_f}{L - d_c} + V_g}{n \cdot \tau_{sem}} \quad (A.11)$$

Burada:

A_b : Bulon kesit alanı

n : Bulon sayısı

$$A_b = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,1^2}{4} = 3,46 \text{ cm}^2$$

$$3,46 \geq \frac{\frac{2 \cdot 21673}{524 - 24} + 100}{8 \cdot 32} = 0,73$$

A-1-3 Alın Levhası Kalınlığı Seçimi

Alın levhası kalınlığı seçiminde aşağıdaki Eşitlik (A.12) ve Eşitlik (A.13) kullanılmaktadır.

$$t_{ep} = \sqrt{\frac{M_f}{0,8 \cdot \sigma_{y,ep} \left\{ (h_b - P_f) \cdot \left[\frac{b_{ep}}{2} \left(\frac{1}{P_f} + \frac{1}{\sqrt{b_{ep} \cdot g}} \right) + \left(P_f + \sqrt{b_{ep} \cdot g} \right) \frac{2}{g} \right] + \frac{b_{ep}}{2} \left(\frac{h_b}{P_f} + \frac{1}{2} \right) \right\}}} \quad (\text{A.12})$$

$$t_{ep} = \frac{M_f}{1,1 \cdot \sigma_{y,ep} \cdot b_{ep} \cdot (h_b - t_b)} \quad (\text{A.13})$$

Burada:

$\sigma_{y,ep}$: Alın levhası çeliğinin akma gerilmesi

P_f : Çekme bölgesindeki en yakın bulonların merkezinin kiriş başlığına uzaklığı

b_{ep} : Alın levhası genişliği

g : Kiriş gövdesinin sağ ve sol tarafındaki bulonların merkezleri arasındaki uzaklık

$$t_{ep} = \sqrt{\frac{21673}{0,8 \cdot 26 \left\{ (27 - 4,5) \cdot \left[\frac{20}{2} \left(\frac{1}{4,5} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot 11}} \right) + \left(4,5 + \sqrt{20 \cdot 11} \right) \frac{2}{11} \right] + \frac{20}{2} \left(\frac{27}{4,5} + \frac{1}{2} \right) \right\}}} = 2,23 \text{ cm}$$

$$t_{ep} = \frac{21673}{1,1 \cdot 26 \cdot 20 \cdot (27 - 1,02)} = 1,46 \text{ cm}$$

Seçilen alın levhası kalınlığı (30 mm) uygundur.

A-2 Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Örneği

A-2-1 Momentlerin Hesaplanması

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsallarda oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır:

$$M_{pr} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 460,54 \cdot 36 = 20061 \text{ kNcm}$$

Kiriş kesitine sekiz bulonun yerleştirilebilmesi için M16 bulon seçilmiştir. Alın levhası kalınlığı 40 mm olarak seçilmiş olup, alın takviye levhasının uzunluğu 235 mm'dir.

Takviyeli Alın Levhalı Bulonlu Birleşimde kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri Eşitlik (A.14) ile belirlenir:

$$S_h = h_c / 2 + t_{ep} + L_{st} \quad (A.14)$$

Burada:

L_{st} : Alın takviye levhasının uzunluğu

$$S_h = 24 / 2 + 4 + 23,5 = 39,5 \text{ cm}$$

Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu Eşitlik (A.6) ile hesaplanır:

$$L' = L - 2 \cdot S_h$$

$$L' = 524 - 2 \cdot 39,5 = 445 \text{ cm}$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır:

$$V_p = \frac{(2 \cdot 20061) + 100 \cdot 445 / 2}{445} = 140,16 \text{ kN}$$

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır:

$$M_f = 20061 + 140,16 \cdot 27,5 = 23916 \text{ kNcm}$$

A-2-2 Bulon Çapı Kontrolü

Bulon çapı seçildikten sonra aşağıda verilen Eşitlik (A.15)'deki koşul sağlanmalıdır:

$$M_f < 3,4 \cdot T_{ub} \cdot (d_0 + d_1) \quad (A.15)$$

$$T_{ub} \approx 100 \cdot \frac{\pi (0,86 \cdot 1,7)^2}{4} = 167,87 \text{ kN}$$

$$d_0 = 27 - 1,02 / 2 + 3,5 = 29,99 \text{ cm}$$

$$d_1 = 27 - 1,02 - 1,02 / 2 - 3,5 - 6 = 15,97 \text{ cm}$$

$$23916 \text{ kNcm} < 3,4 \cdot 167,87 \cdot (29,99 + 15,97) = 26232,04 \text{ kNcm}$$

Ayrıca T_{ub} aşağıdaki Eşitlik (A.16)'daki koşulu da sağlamalıdır.

$$T_{ub} \geq \frac{0,00218529 \cdot P_f^{0,591} \cdot F_{fu}^{2,583}}{t_{ep}^{0,895} \cdot d_{bt}^{1,909} \cdot t_{st}^{0,327} \cdot b_p^{0,965}} + P_v \quad (\text{A.16})$$

Burada:

d_{bt} : Bulon çapı

t_{st} : Alın takviye levhasının kalınlığı

P_v : Bulona uygulanacak öngerilme

F_{fu} : M_f kuvvetinden dolayı kiriş başlıklarına etki eden kuvvet olup, Eşitlik (A.17) ile bulunmaktadır

Eşitlik (A.16)'daki ifadede T_{ub} , F_{fu} ve P_v değerleri ton cinsinden yazılır.

$$F_{fu} = \frac{M_f}{h_b - t_b} \quad (\text{A.17})$$

$$F_{fu} = \frac{23916}{27 - 1,02} = 920,54 \text{ kN}$$

$$16,787 \text{ ton} \geq \frac{0,00218529 \cdot 3,5^{0,591} \cdot 92,054^{2,583}}{4^{0,895} \cdot 1,7^{1,909} \cdot 1^{0,327} \cdot 20^{0,965}} + 10 = 13,19 \text{ ton}$$

Bulon kesme güvenliğinin kontrolü Eşitlik (A.11) ile yapılır.

$$A_b = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,7^2}{4} = 2,27 \text{ cm}^2 \geq \frac{\frac{2 \cdot 23916}{524 - 24} + 100}{16 \cdot 32} = 0,4 \text{ cm}^2$$

A-2-3 Alın Levhası Kalınlığı Seçimi

Alın levhası kalınlığı aşağıdaki Eşitlik (A.18) ve Eşitlik (A.19)'u sağlamalıdır.

$$t_{ep} \geq \frac{0,0386428 \cdot P_f^{0,9} \cdot g^{0,6} \cdot F_{fu}}{d_{bt}^{0,9} \cdot t_{st}^{0,1} \cdot b_p^{0,7}} \quad (\text{A.18})$$

$$t_{ep} \geq \frac{0,047451 \cdot P_f^{0,25} \cdot g^{0,15} \cdot F_{fu}}{d_{bt}^{0,7} \cdot t_{st}^{0,15} \cdot b_p^{0,3}} \quad (A.19)$$

$$t_{ep} = 4 \text{ cm} \geq \frac{0,0386428 \cdot 3,5^{0,9} \cdot 11^{0,6} \cdot 92,054}{1,7^{0,9} \cdot 1^{0,1} \cdot 20^{0,7}} = 3,63 \text{ cm}$$

$$t_{ep} = 4 \text{ cm} \geq \frac{0,047451 \cdot 3,5^{0,25} \cdot 11^{0,15} \cdot 92,054}{1,7^{0,7} \cdot 1^{0,15} \cdot 20^{0,3}} = 2,45 \text{ cm}$$

A-3 Alın Levhasız Bulonlu Birleşim Örneği

A-3-1 Momentlerin Hesaplanması

Kiriş en kesitini fazla zayıflatmamak için bulon çapı küçük seçilmiştir.

Seçilen bulon: M12

Bir sıradaki bulon sayısı: 6

Bulonların kenar mesafeleri: 30 mm

Bulonların ara mesafeleri: 50 mm

Böylelikle başlık levhası uzunluğu (L_p) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$L_p = 5 \cdot 5 + 2 \cdot 3 + 1 = 32 \text{ cm}$$

Başlık levhasının genişliği (b_p) 22 cm olarak seçilmiştir.

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır:

$$M_{pr} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 460,54 \cdot 36 = 20061 \text{ kNcm}$$

Alın Levhasız Bulonlu Birleşimde kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri Eşitlik (A.20) ile belirlenir:

$$S_h = h_c / 2 + L_p \quad (A.20)$$

$$S_h = 24 / 2 + 32 = 44 \text{ cm}$$

Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu Eşitlik (A.6) ile hesaplanır:

$$L' = L - 2 \cdot S_h$$

$$L' = 524 - 2 \cdot 44 = 436 \text{ cm}$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır:

$$V_p = \frac{(2 \cdot 20061) + 100 \cdot 436 / 2}{436} = 142,02 \text{ kN}$$

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır:

$$M_f = 20061 + 142,02 \cdot 32 = 24606 \text{ kNcm}$$

Kolon başlık yüzünde, kiriş başlığında akma başladığı andaki moment Eşitlik (A.21) ile hesaplanır:

$$M_{yf} = C_y \cdot M_f \quad (\text{A.21})$$

Burada C_y bir katsayı olup, Eşitlik (A.22) ile hesaplanır:

$$C_y = \frac{1}{C_{pr} \cdot \frac{W_p}{W}} \quad (\text{A.22})$$

Burada

C_{pr} : en büyük birleşim mukavemeti katsayısı olup, 1,2 olarak alınmıştır.

$$C_y = \frac{1}{1,2 \cdot \frac{460,54}{407,76}} = 0,738$$

$$M_{yf} = 0,738 \cdot 24606 = 18159 \text{ kNm}$$

A-3-2 Başlık Levhası Kalınlığının Seçimi

Başlık levhasının minimum kalınlığı aşağıdaki Eşitlik (A.23) ile hesaplanır:

$$t_{pl} = \frac{h_b - \sqrt{h_b^2 - \frac{4,4 \cdot M_{yf}}{\sigma_y \cdot b_p}}}{2} \quad (\text{A.23})$$

$$t_{pl} = \frac{27 - \sqrt{27^2 - \frac{4,4 \cdot 18159}{36 \cdot 22}}}{2} = 0,97 \text{ cm}$$

Başlık levhasının kalınlığı 1,2 cm seçilmiştir.

A-3-3 Yük Taşıma Kaybı Mekanizmalarının Oluşmaması Bakımından Birleşimin Uygunluğunun İncelenmesi

Birleşimde aşağıdaki adımlarda açıklanan yük taşıma kaybı mekanizmalarının oluşmaması için Eşitlik (A.24)'deki koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$1,2 \cdot M_{yf} < M_g \quad (A.24)$$

Burada:

M_g : Kolon başlığı hizasında aşağıdaki adımlarda açıklanan yük taşıma kaybı mekanizmalarına karşı gelen momenttir.

Birleşimin bulonların makaslanması suretiyle yük taşıma kaybı mekanizmasına ulaşmaması kontrolü için Eşitlik (A.25) kullanılır.

$$M_g = 2 \cdot N \cdot A_b \cdot F_{v,b} \cdot h_b \cdot L_{TF1} \quad (A.25)$$

Burada:

N : Kiriş başlığı ile başlık levhası bağlantısında bir sıradaki bulon sayısı

$F_{v,b}$: Bulonun kayma dayanımı olup, 50 kN/cm² olduğu kabul edilmiştir.

L_{TF1} : bir katsayı olup, Eşitlik (A.26) ile hesaplanmaktadır.

$$L_{TF1} = \frac{L - h_c}{L - h_c - (2S_1 + S_3)} \quad (A.26)$$

Burada:

S_1 : Kolon yüzünün en yakındaki bulon merkezine uzaklığı

S_3 : Bulonların kiriş eksenine doğrultusunda ara mesafeleri toplamı

$$L_{TF1} = \frac{524 - 24}{524 - 24 - (2 \cdot 4 + 5 \cdot 5)} = 1,0707$$

$$1,2 \cdot M_{yf} = 1,2 \cdot 18459 = 21791 \text{ kNm} < M_g = 2 \cdot 6 \cdot \frac{\pi \cdot 1,3^2}{4} \cdot 50 \cdot 27 \cdot 1,0707 = 23022 \text{ kNm}$$

Birleşimin başlık levhasının yırtılması suretiyle yük taşıma kaybı mekanizmasına ulaşmaması kontrolü için Eşitlik (A.27) kullanılır.

$$M_g = 0,85 \cdot \sigma_{u,pl} \cdot (b_{d,p} - 2(d_p + 0,15)) \cdot t_{pl} \cdot (h_b + t_{pl}) \cdot L_{TF2} \quad (A.27)$$

Burada:

$\sigma_{u,pl}$: Başlık levhasında kullanılan çeliğin kopma dayanımı

$d_{b,p}$: Başlık levhasındaki delik çapı

L_{TF2} : Bir katsayı olup, Eşitlik (A-28) ile hesaplanır.

$$L_{TF2} = \frac{L - h_c}{L - h_c - 2S_1} \quad (A.28)$$

$$L_{TF2} = \frac{524 - 24}{524 - 24 - 2 \cdot 4} = 1,0163$$

$$M_g = 0,85 \cdot 48,8 \cdot (22 - 2(1,3 + 0,15)) \cdot 1,2 \cdot (27 + 1,2) \cdot 1,0163 = 27247 \text{ kNm}$$

$$1,2 \cdot M_{yf} = 21791 \text{ kNm} < M_g = 27247 \text{ kNm}$$

Birleşimin kiriş enkesitinin yırtılması suretiyle yük taşıma kaybı mekanizmasına ulaşmaması kontrolü için Eşitlik (A.29) kullanılır.

$$M_g = \sigma_{u,b} \cdot (W_p - 2(d_{b,b} + 0,15)) \cdot t_b \cdot (h_b - t_b) \cdot L_{TF3} \quad (A.29)$$

Burada:

$\sigma_{u,b}$: Kiriş malzemesinin kopma dayanımı

$d_{b,b}$: Kiriş başlığındaki delik çapı

L_{TF3} : Bir katsayı olup, Eşitlik (A.30) ile hesaplanır.

$$L_{TF3} = \frac{L - h_c}{L - h_c - 2(S_1 + S_3)} \quad (A.30)$$

$$L_{TF3} = \frac{524 - 24}{524 - 24 - 2(4 + 5 \cdot 5)} = 1,1312$$

$$M_g = 48,8 \cdot (460,54 - 2(1,3 + 0,15)) \cdot 1,02 \cdot (27 - 1,02) \cdot 1,1312 = 21159 \text{ kNm}$$

$$1,2 \cdot M_{yf} = 21791 \text{ kNm} > M_g = 21159 \text{ kNm} \quad \text{koşul sağlanamamıştır.}$$

Birleşimin bulon deliklerinin genişlemesi suretiyle yük taşıma kaybı mekanizmasına ulaşmaması kontrolü için Eşitlik (A.31) kullanılır.

$$M_g = \min(\sigma_{u,b} \cdot (S_3 + S_1 - c) \cdot t_b; \sigma_{u,pl} \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{pl}) \cdot 2,4 \cdot (h_b + t_{pl}) \cdot L_{TF1} \quad (A.31)$$

Burada:

c: Kiriş ile kolon arasındaki mesafe (10 mm alınmıştır)

$$M_g = \min(1393,7; 1639,7) \cdot 2,4 \cdot (27 + 1,2) \cdot 1,0707 = 100990 \text{ kNm}$$

$$1,2 \cdot M_{yf} = 21791 \text{ kNm} < M_g = 100990 \text{ kNm}$$

A-4 Kaynaklı Birleşim Örneği

Bu birleşimde gövde levhasının boyutları DBYBHY-2007’de verildiği gibi alınmış olup, kaynak ulaşım deliğinin geometrisi FEMA-350’ye uygun olarak düzenlenmiştir.

A-5 Ek Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşim Örneği

A-5-1 Momentlerin Hesaplanması

Ek başlık levhasının uzunluğu (L_p) 35 cm, genişliği (b_p) 20 cm seçilmiştir.

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır:

$$M_{pr} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 460,54 \cdot 36 = 20061 \text{ kNcm}$$

Ek Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşimde kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri Eşitlik (A.32) ile belirlenir:

$$S_h = h_c / 2 + L_p \quad (A.32)$$

$$S_h = 24 / 2 + 35 = 47 \text{ cm}$$

Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu Eşitlik (A.6) ile hesaplanır.

$$L' = 524 - 2 \cdot 47 = 430 \text{ cm}$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır:

$$V_p = \frac{(2 \cdot 20061) + 100 \cdot 430 / 2}{430} = 143,41 \text{ kN}$$

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır:

$$M_f = 20061 + 143,41 \cdot 35 = 25077 \text{ kNcm}$$

A-5-2 Başlık Levhası Kalınlığının Seçimi

Kiriş başlığı takviye levhasının kalınlığının seçimi Eşitlik (A.33) ile yapılmaktadır:

$$t_{pl} = \frac{M_f}{\sigma_y \cdot b_p \cdot \left(d_b + \frac{(2 \cdot t_{pl})}{2} \right)} \quad (A.33)$$

$$t_{pl} = \frac{25077}{36 \cdot 20 \cdot \left(27 + \frac{(2 \cdot t_{pl})}{2} \right)} \rightarrow t_{pl} = 1,23 \text{ cm}$$

Kiriş başlığı takviye levhasının kalınlığı (t_p) 1,4 cm seçilmiştir.

A-5-3 Başlık Levhası Uzunluğunun Kontrolü

Kiriş başlığı takviye levhasını kiriş başlığına bağlayan köşe kaynakların toplam uzunluğu Eşitlik (A.34) ile hesaplanmaktadır.

$$l_k = \frac{M_f}{h_b \cdot 0,707 \cdot \min(t_{pl}; t_b) \cdot \tau_{kem}} \quad (A.34)$$

Burada:

τ_{kem} : Kaynak emniyet gerilmesi olup, 19 kN/cm² olduğu kabul edilmiştir.

$$l_k = \frac{25077}{27 \cdot 0,707 \cdot 1,02 \cdot 19} = 67,79 \text{ cm}$$

Alın dikişi uzunluğu: 13,5 cm

Her bir yan dikişin uzunluğu: (67,79-13,5)/2=27,14 cm

Kaynak kalınlığı: 0,707 · 1,02 ≈ 0,7 cm

Her bir yan dikişin uygulama uzunluğu: 27,14 + 2 · 0,7 ≈ 28,54 cm

Kiriş başlık takviye levhası uzunluğu ($L_p=35$ cm) uygundur.

A-6 Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti Kaynaklı Birleşim Örneği

A-6-1 Zayıflama Yeri ve Miktarının Hesaplanması

Kiriş başlığındaki azaltmaların yeri ve değeri Eşitlik (A.35), (A.36) ve (A.37) ile hesaplanmaktadır.

$$a \approx 0,6 \cdot b_b \quad (\text{A.35})$$

$$b \approx 0,75 \cdot h_b \quad (\text{A.36})$$

$$C \approx 0,2 \cdot b_b \quad (\text{A.37})$$

Burada:

a : Kolon başlığından kiriş başlığındaki zayıflamanın başlangıcına olan mesafe

b : Kiriş başlığındaki zayıflamanın uzunluğu

C : Kiriş başlığındaki zayıflamanın en fazla olduğu yerdeki zayıflama miktarı

$$a = 0,6 \cdot 13,5 = 8,1 \text{ cm} \approx 8 \text{ cm}$$

$$b = 0,75 \cdot 27 = 20,25 \text{ cm} \approx 20 \text{ cm}$$

$$C = 0,2 \cdot 13,5 = 2,7 \text{ cm} \approx 2,5 \text{ cm}$$

A-6-2 Momentlerin Hesaplanması

Azaltılmış kiriş kesitinin plastik mukavemet değeri Eşitlik (A.38) ile hesaplanır.

$$W_{p,az} = W_p - 2 \cdot C \cdot t_b \cdot (h_b - t_b) \quad (\text{A.38})$$

$$W_{p,az} = 460,54 - 2 \cdot 2,5 \cdot 1,02 \cdot (27 - 1,02) = 328,04 \text{ cm}^3$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin plastik moment taşıma kapasitesi Eşitlik (A.4) ile hesaplanır:

$$M_{pr} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 328,04 \cdot 36 = 14289 \text{ kNcm}$$

Zayıflatılmış Kiriş Enkesiti Kaynaklı Birleşimde kolon ekseninden itibaren plastik mafsallın yeri Eşitlik (A.40) ile belirlenir:

$$S_h = h_c / 2 + a + b / 2 \quad (\text{A.40})$$

$$S_h = 24 / 2 + 8 + 20 / 2 = 30 \text{ cm}$$

Kiriş açıklığında plastik mafsallar arasında kalan bölgenin uzunluğu Eşitlik (A.6) ile hesaplanır:

$$L' = 524 - 2 \cdot 30 = 464 \text{ cm}$$

Kiriş üzerinde muhtemel plastik mafsall oluşma noktasında kiriş kesitinin kesme kuvveti Eşitlik (A.5) ile hesaplanır:

$$V_p = \frac{(2 \cdot 14289) + 100 \cdot 464 / 2}{464} = 111,59 \text{ kN}$$

Kolon başlık yüzeyindeki moment Eşitlik (A.7) ile hesaplanır.

$$M_f = 14289 + 111,59 \cdot 18 = 16297,6 \text{ kNcm}$$

A-6-3 Boyutlandırmanın Kontrolü

Boyutlandırmanın kabul edilebilir olması için bulunan M_f değerinin Eşitlik (A.41)'deki koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$M_f < 1,1 \cdot D_a \cdot W_p \cdot \sigma_y \quad (\text{A.41})$$

$$M_f = 16297,6 \text{ kNcm} < 1,1 \cdot 1,1 \cdot 460,54 \cdot 36 = 20061 \text{ kNcm}$$

Boyutlandırma uygundur.

A-7 Kayma Bölgesinin Güvenliği

Kayma bölgesinin gerekli kesme kuvveti dayanımı Eşitlik (A.42) ile hesaplanmaktadır.

$$V_{ke} = 0,8 \cdot \sum M_p \cdot \left(\frac{1}{h_b} - \frac{1}{H_{ort}} \right) \quad (\text{A.42})$$

Burada:

H_{ort} : Ortalama kat yüksekliği olup, 2,5 m olarak kabul edilmiştir.

M_p : Plastik moment taşıma kapasitesi olup, Eşitlik (A.43) ile hesaplanmaktadır.

$$M_p = \sigma_y \cdot W_p \quad (\text{A.43})$$

$$M_p = 36 \cdot 460,54 = 16579 \text{ kNcm}$$

$$V_{ke} = 0,8 \cdot 16579 \cdot \left(\frac{1}{27} - \frac{1}{250} \right) = 438,19 \text{ kN}$$

Kayma bölgesinin kesme kuvveti kapasitesi Eşitlik (A.44) ile hesaplanmaktadır.

$$V_n = 0,6 \cdot \sigma_y \cdot h_c \cdot t_p \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot b_c \cdot t_c^2}{h_b \cdot h_c \cdot t_p} \right) \quad (\text{A.44})$$

Burada:

t_p : Birleşim kayma bölgesi kalınlığı olup, takviye levhası kullanılmadığından kolon gövde kalınlığına eşit alınmıştır.

$$V_n = 0,6 \cdot 36 \cdot 24 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot 24 \cdot 1,7^2}{27 \cdot 24 \cdot 1} \right) = 684,86 \text{ kN}$$

$V_{ke} < V_n$ olduğundan takviye levhasına gerek yoktur.

Kolon gövde kalınlığı kontrolü Eşitlik (A.45) ile yapılmaktadır.

$$s_c \geq (d_z + w_z) / 90 \quad (\text{A.45})$$

Burada:

d_z : Kayma bölgesinin süreklilik levhaları arasında kalan derinliği

w_z : Kayma bölgesinin kolon başlık elemanları arasında kalan genişliği

$$1 \text{ cm} > (27 + (24 - 2 \cdot 1,7)) / 90 = 0,53 \text{ cm}$$

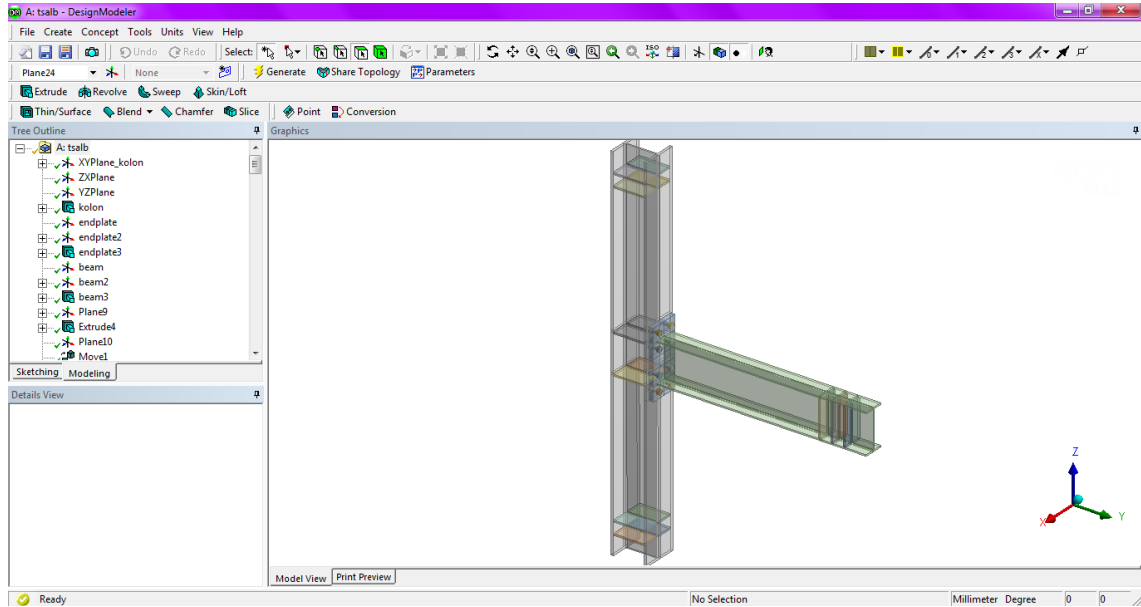
Kolon gövde kalınlığı uygundur.

SONLU ELEMEN MODELERİNİN ANSYS WORKBENCH PROGRAMI İLE HAZIRLANMASI

Bu bölümde tez çalışmasında ele alınmış olan birleşimlerin ANSYS Workbench sonlu eleman analiz programı yardımı ile hazırlanması kısaca açıklanacaktır. Modellemelerin hazırlanma sürecinin açıklanmasında sadece Takviyesiz Alın Levhalı Bulonlu (TSALB) birleşim örneği kullanılacaktır.

B-1 Birleşim Geometrisinin Oluşturulması

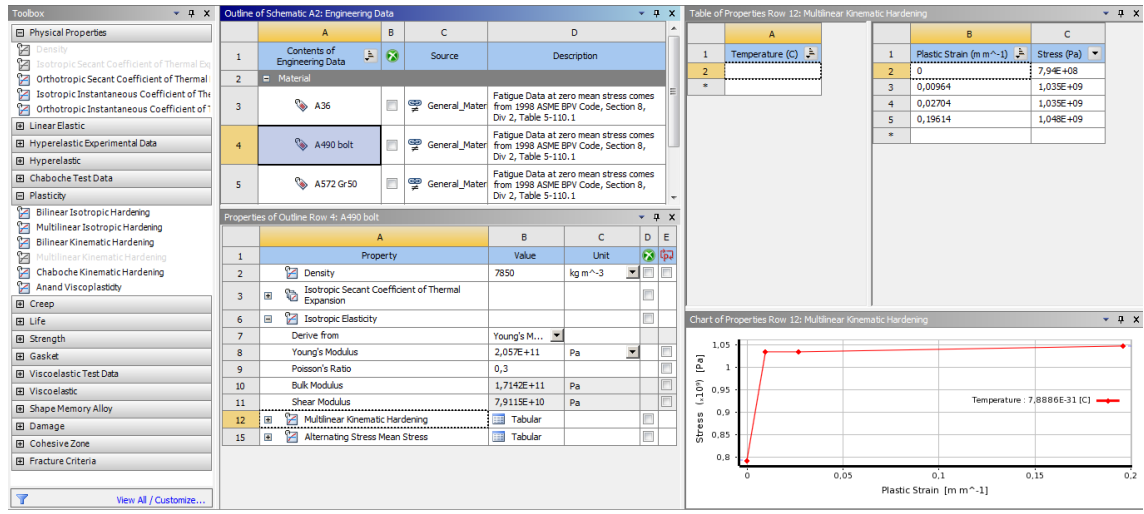
Birleşimlerin geometrisi ANSYS Workbench programı içerisindeki DesignModeler çizim programı ile oluşturulmuştur. TSALB birleşim örneğinin geometrisinin oluşturulduktan sonraki görüntüsü Şekil B-1’de görülmektedir.



Şekil B-1 TSALB birleşim örneğinin geometrisinin oluşturulduktan sonraki görüntüsü

B-2 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

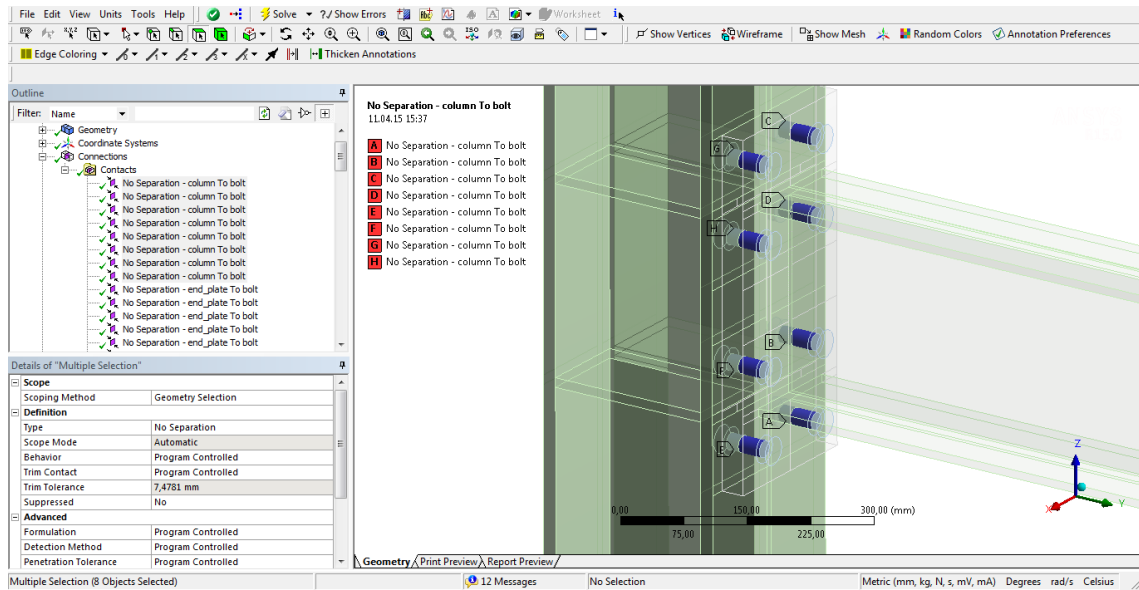
TSALB birleşim örneği için üç farklı malzeme kullanılmıştır. Bulonlar için ASTM A490, alın levhası için ASTM A36 ve diğer parçalar için ASTM A572 50 sınıfı çelik kullanılmıştır. Örnek olarak Şekil B-2’de ASTM A490 çeliğinin özellikleri gösterilmektedir. Şekil B-2’den görüldüğü gibi, çevrimsel yükleme altında doğrusal olmayan malzeme için “Plasticity” kısmından “Multilinear Kinematik Hardening” modülü kullanılmıştır. Burada malzemenin plastik şekil değiştirme – gerilme değerleri ilgili tabloya yazılır. Elastik bölge “Young’s Modulus” (Elastisite Modülü) ile dikkate alınır, bu yüzden plastik şekil değiştirmenin değeri sıfırdan başlar.



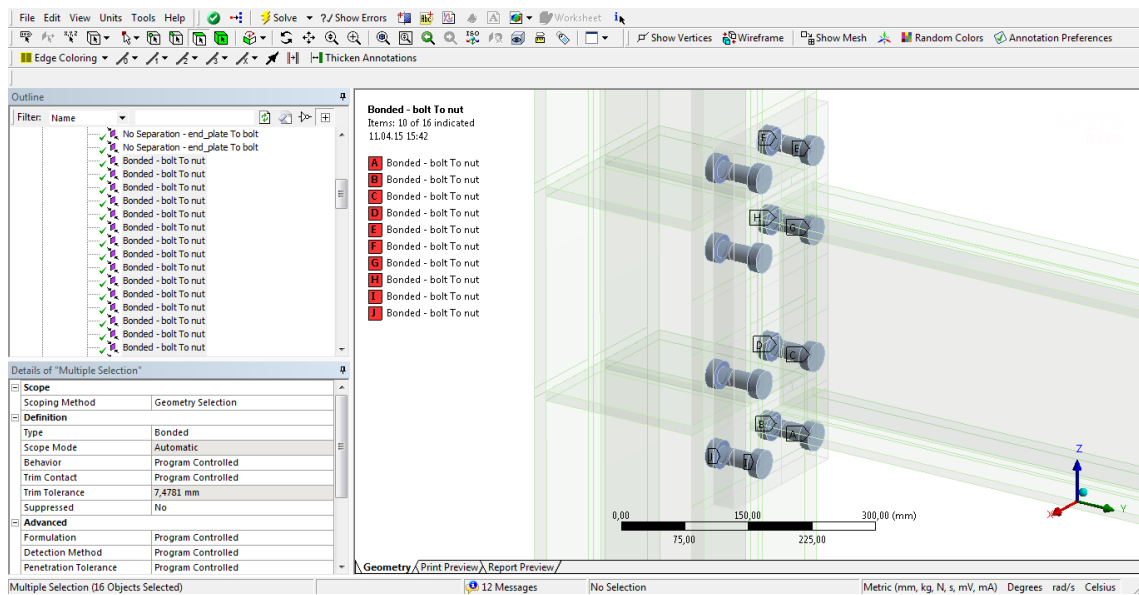
Şekil B-2 ASTM A490 çeliğinin özelliklerinin programa girilmesi

B-3 Temasların Belirlenmesi

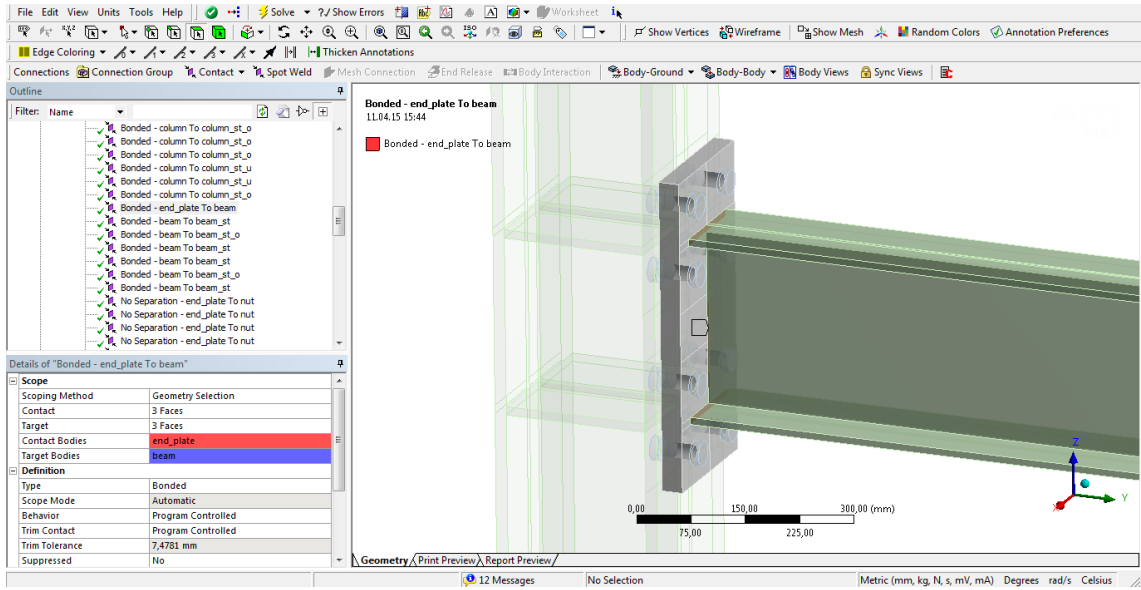
Birleşimlerdeki parçaların birbirleri arasındaki temaslar, “Model” penceresinin içerisindeki “Connections→Contacts” ile belirlenir. Şekil B-3’te kolon başlığındaki delikler ile bulon gövdeleri arasında belirlenmiş olan “No Separation” (Ayrılmayan) temaslar, Şekil B-4’de bulon gövdesinin üst yüzeyi ile somunlar arasında belirlenmiş olan “Bonded” (Bağlı) temaslar, Şekil B-5’de ise, alın levhası ile kiriş arasında belirlenmiş olan “Bonded” (Bağlı) temas gösterilmiştir.



Şekil B-3 Kolon başlığındaki delikler ile bulon gövdeleri arasında belirlenmiş olan
“No Separation” (Ayrılmayan) temaslar



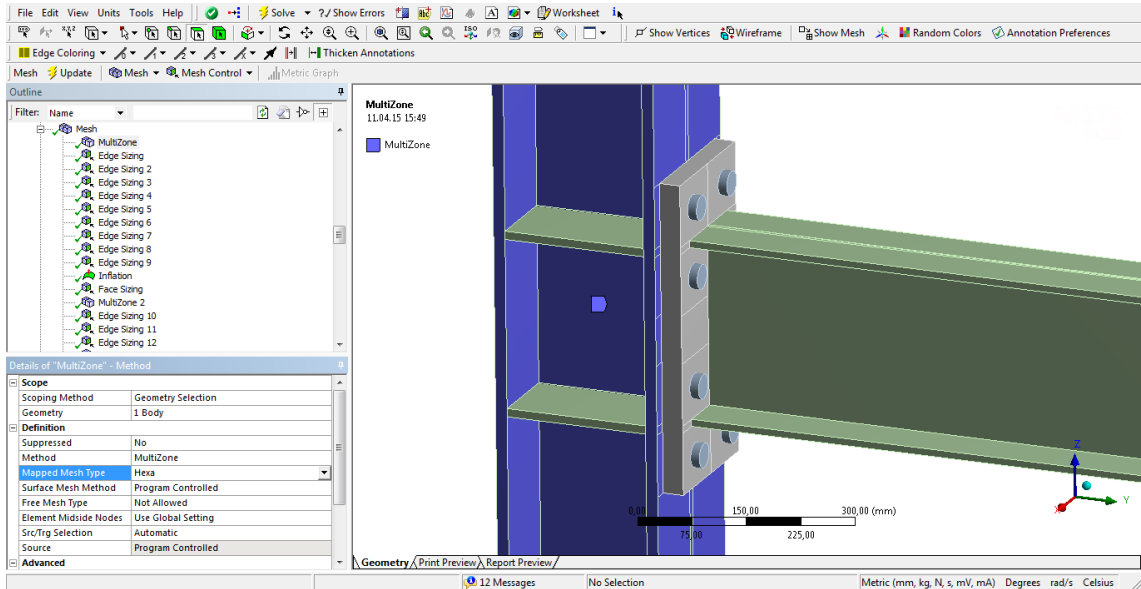
Şekil B-4 Bulon gövdesinin üst yüzeyi ile somunlar arasında belirlenmiş olan “Bonded” (Bağlı) temaslar



Şekil B-5 Alın levhası ile kiriş arasında belirlenmiş olan “Banded” (Bağlı) temas

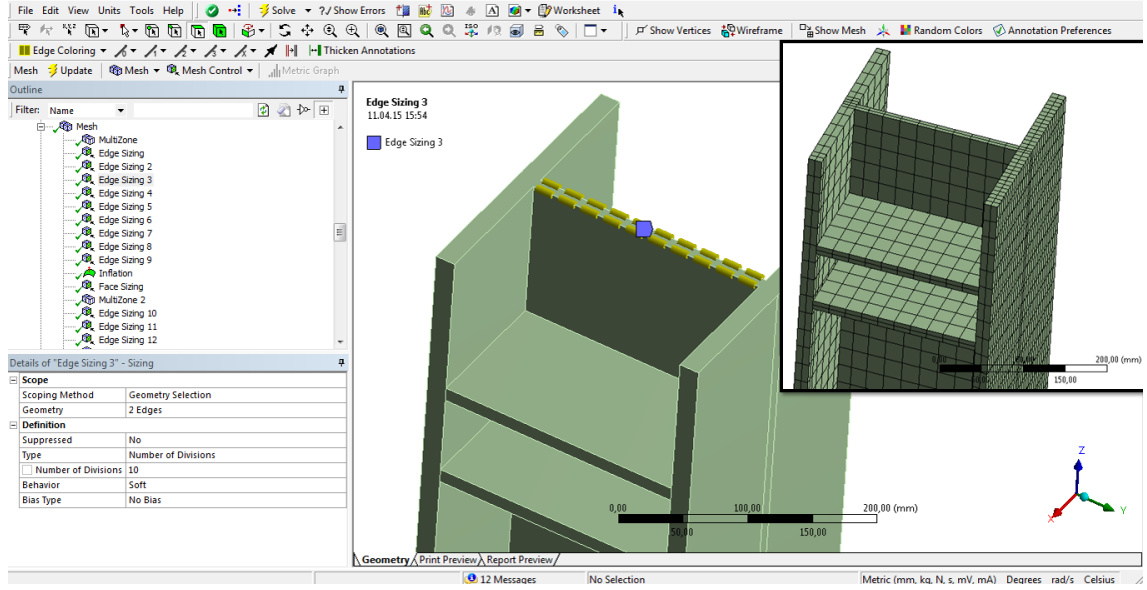
B-4 Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması

Birleşimlerin sonlu eleman ağının oluşturulması sırasında mümkün olduğu sürece altı yüzlü elemanlar kullanmak için “Mesh” bölümü içerisinde bütün parçalara ayrı olacak şekilde “MultiZone” özelliği eklenmiş ve “Mapped Mesh Type” olarak “Hexa” seçilmiştir. Örnek olarak Şekil B-6’da bu özelliğin kolona uygulanması gösterilmiştir.



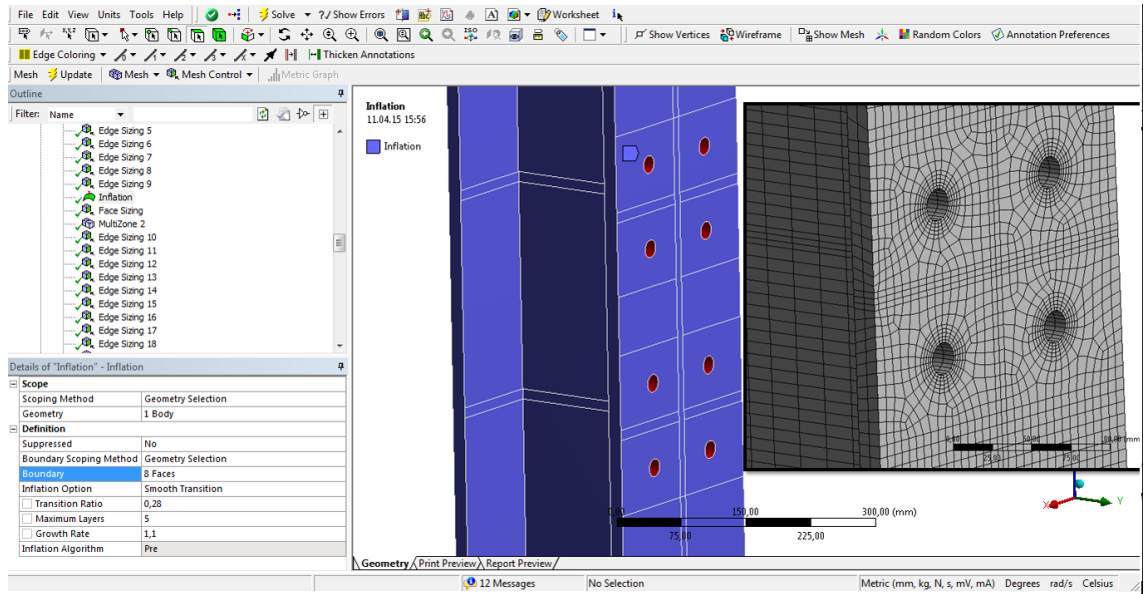
Şekil B-6 Kolona “MultiZone” uygulanması

Parçaların uzunluk boyunca kaç elemana bölüneceği “Edge Sizing” ile belirlenmektedir. Örnek olarak Şekil B-7’de kolon gövdesinin on elemana bölünmesinin ayarlandığı ve sonlu eleman ağı oluşturulduktan sonra on elemana bölündüğü görülmektedir.



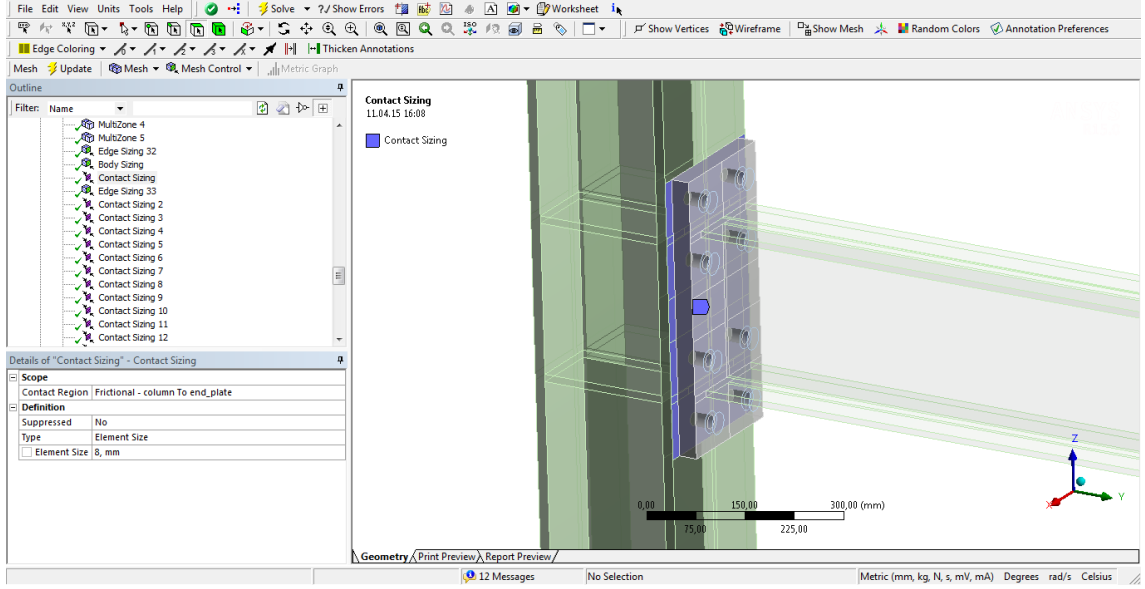
Şekil B-7 Kolon gövdesinin on elemana bölünmesinin ayarlanması

Bulon delikleri etrafına daha hassas sonlu eleman ağı uygulamak için bulon deliğine sahip parçalara “Inflation” seçeneği eklenmiş ve “Boundary” kısmından deliklerin iç yüzeyi seçilmiştir. Örnek olarak Şekil B-8’de kolon için bu özelliğin uygulanması ve daha sonrasında elde edilen sonlu eleman ağı gösterilmektedir.

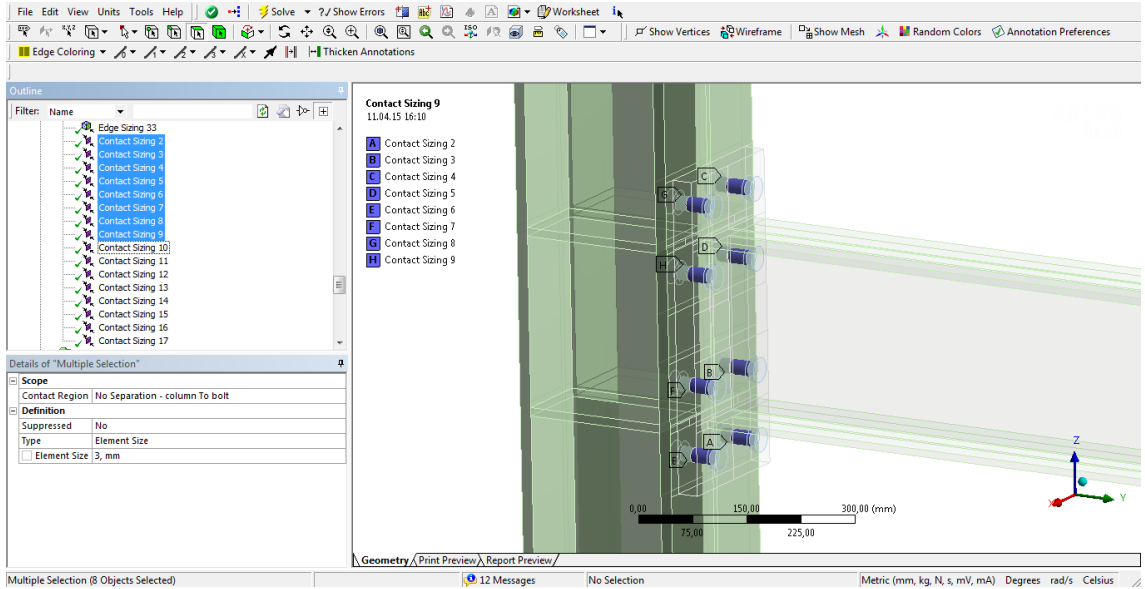


Şekil B-8 Kolon için “inflation” özelliğin uygulanması

Modellerdeki doğrusal olmayan temaslara ve öngerme kuvvetinden dolayı bulon gövdesi ile delikler arasındaki temaslara “Contact Sizing” parametresi eklenmiştir. Şekil B-9’da alın levhası ile kolon başlığı arasındaki ve Şekil B-10’da bulon gövdesi ile kolon başlığındaki delikler arasındaki temaslara uygulanan “Contact Sizing” parametresi görülmektedir.

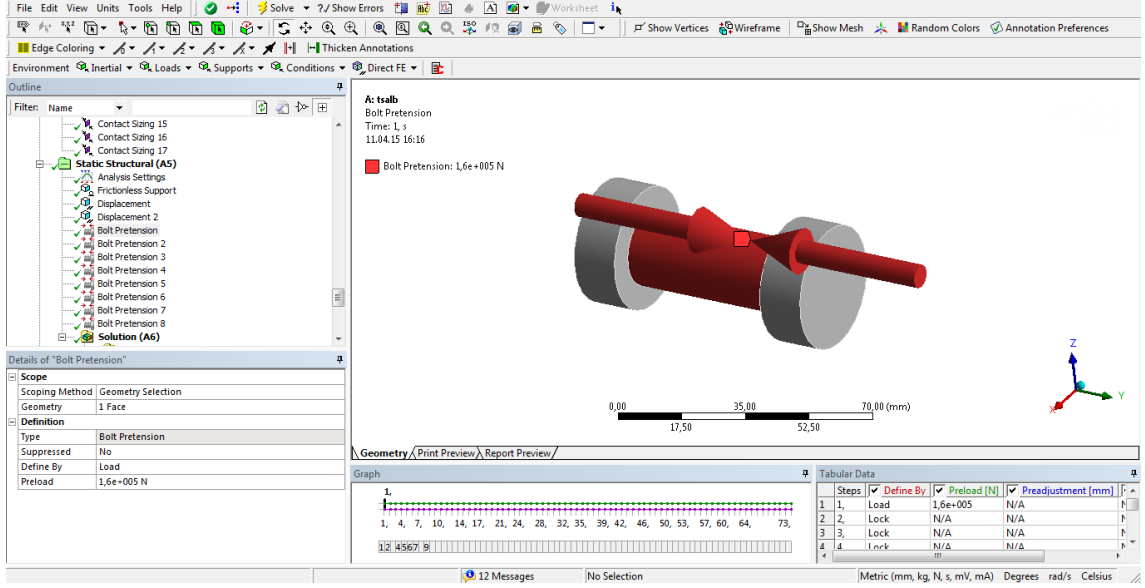


Şekil B-9 Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temasa uygulanan “Contact Sizing”

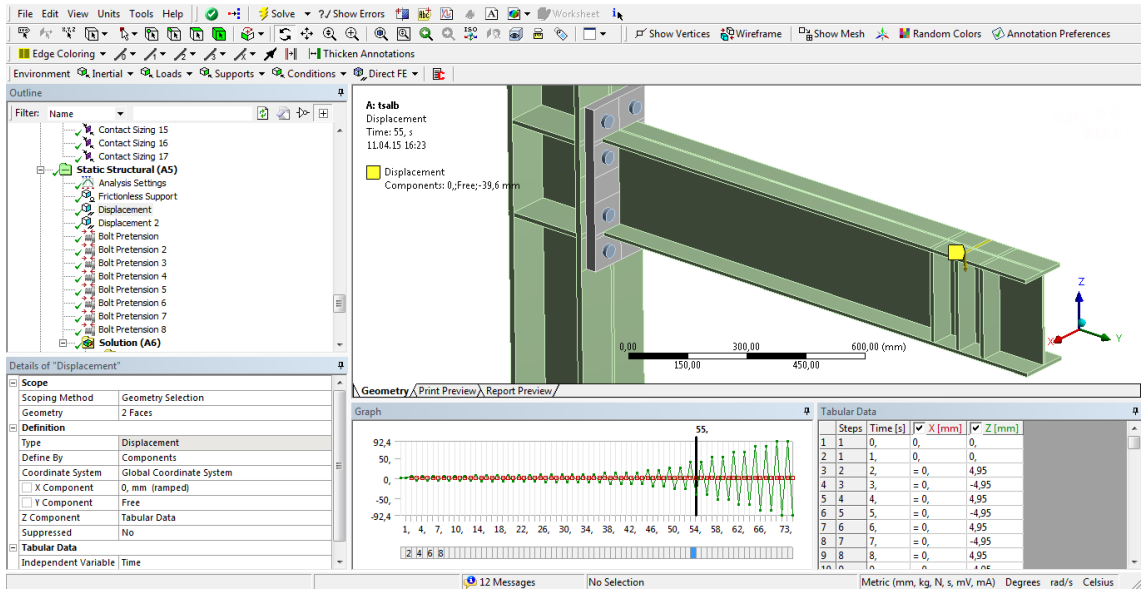


Şekil B-10 Bulon gövdesi ile kolon başlığındaki delikler arasındaki temaslara uygulanan “Contact Sizing”

Bulonlu birleşimlerde konsol kiriş ucuna yer değiştirme uygulanmadan önce bulonlara öngerilme kuvveti uygulanmaktadır. Şekil B-11’de bir bulona öngerilme kuvvetinin uygulanması görülmektedir. Şekil B-12’de ise kiriş üzerindeki yükleme noktasına çevrimsel yükleme için uygulanan yer değiştirmeler gösterilmektedir. Burada yer değiştirmeler Z doğrultusunda uygulanmış olup, yükleme noktasının yanal öteleme yapmaması için X yönündeki yer değiştirme değerleri sıfır olarak girilmiş ve Y yönündeki yer değiştirmeler serbest bırakılmıştır.



Şekil B-11 Bir bulona öngerilme kuvvetinin uygulanması



Şekil B-12 Kiriş üzerindeki yükleme noktasına uygulanan yer değiştirmeler

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Orkun YILMAZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.10.1989, Bakırköy – İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : orkun.yilmaz@hotmail.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Fen	Gürlek Nakipoğlu Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013 - Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. **Yılmaz, O.** ve Şahin, A. (2015), “A Novel Approach for Static Analysis of Plane Frame Systems”, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 33(2): 129-143.
2. **Yılmaz, O.** ve Şahin, A. (2013), “Çelik Yapı Tasarımı Dersi İçin Eğitim Programı Geliştirilmesi”, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 31(4): 571-581.

Bildiri

1. **Yılmaz, O.** ve Bekiroğlu, S. (2015), “DBYBHY-2007'ye Göre Moment Aktaran Bulonlu Birleşimlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi”, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı.
2. **Yılmaz, O.** ve Şahin, A. (2014), “The Development of Educational Tool for Analysis and Design of Plane Truss Systems”, International Conference on Engineering Education, Instructional Technology, Assessment, and E-learning (EIAE 14).
3. **Yılmaz, O.** ve Bekiroğlu, S. (2014), “Behaviour of Pretensioned Bolted Steel Column – Beam Connections Subjected to Monotonic Loading”, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014).
4. **Yılmaz, O.** ve Bekiroğlu, S. (2014), “Numerical Simulations of Bolted Steel Connections in Single and Double Shear Under Pretension Effect”, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2014).
5. **Yılmaz, O.** ve Şahin, A. (2013), “Çelik Endüstri Yapılarının Tasarımı İçin Bilgisayar Programı Geliştirilmesi”, 5. Çelik Yapılar Sempozyumu.

Proje

1. Alın Levhalı Bulonlu ve Alın Levhasız Bulonlu Çelik Kolon-Kiriş Birleşimlerinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizleri ile Karşılaştırılması. Destekleyen Kurum: BAP. Başlangıç tarihi: Nisan, 2015, Bitiş tarihi: Nisan, 2017.

ÖDÜLLERİ

1. YTÜ İnşaat Fakültesi ve İnşaat Mühendisliği Bölümü üçüncülükleri başarı belgesi (2012).