T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAKVİYELİ ALIN LEVHALI BULONLU KİRİŞ KOLON BİRLEŞİMLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

ANIL ZAFER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SERKAN BEKİROĞLU

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAKVİYELİ ALIN LEVHALI BULONLU KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Anıl ZAFER tarafından hazırlanan tez çalışması 06.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku YAZGAN

Maltepe Üniversitesi

ÖNSÖZ

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

Çalışmalarımda değerlerli görüş ve eleştrilerini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU' na teşekkürü bir borç bilirim.

Karşılaştığım zorluklarda fikirlerinden yararlandığım Sayın Araş. Gör. Y. Müh. Orkun YILMAZ 'a teşekkür ederim.

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren ve katkıda bulunan jürideki hocalarım Sayın Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR ve Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Utku YAZGAN' a teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkabilmesi için esneklik gösteren ve destek veren YAPISTATİK PROJE MÜHENDİSLİK ailesine teşekkür ederim.

Tüm emeklerinden ve desteklerden dolayı annem Feryal ZAFER'e, babam Cemil ZAFER'e ve kardeşim Ferah Benan ZAFER' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2018

Anıl ZAFER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ ix

ÇİZELGE LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 9
1.3 Çalışmaların Yöntemi 9

BÖLÜM 2

MOMENT AKTARAN KOLON KİRİŞ BİRLEŞİMLERİ 10

2.1 Moment Aktaran Kolon-Kiriş Birleşim Tipleri 12
2.2 Alın Levhalı Birleşimlerde Çeşitli Göçme Mekanizmaları 17
2.3 Alın Levhalı Birleşimlerin Tasarımı 18
2.3.1 FEMA 350 18
2.3.2 AISC 358-10 25

BÖLÜM 3

TEK TESİR YÜZEYLİ BİRLEŞİMDE FARKLI BULON ÇAPLARININ ARAŞTIRILMASI 38

3.1 Doğrusal Olmayan Temas Davranışı 38
3.2 Doğrulama Çalışmaları 40
3.2.1 Malzeme Özellikleri 40

3.2.2 Geometrik Özellikler 41
3.2.3 Sonlu Elemanlar Ağ Çalışmaları 42
3.2.4 Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Eleman Model Sonuçlarının Karşılaştırılması 43
3.3 Tek Tesirli Kesme Altında Plaka Bulonlu Plaka Birleşimleri 45
3.3.1 Malzeme Özellikleri 45
3.3.2 Model Geometrileri 47
3.3.3 Temas Özelliklerinin Belirlenmesi 49
3.3.4 Sonlu Eleman Ağ Yapısı ve Modellerin Özellikleri 49
3.3.5 Yüklemeler 53
3.3.6 Modellerin Çözümleri Ve Elde Edilen Sonuçlar 55
3.3.6.1 D0 Grubuna Ait Sonuçlar 55
3.3.6.2 D1-D2-D3 Gruplarına Ait Sonuçlar 60

BÖLÜM 4

TAKVİYELİ ALIN LEVHALI BULONLU KİRİŞ KOLON BİRLEŞİMİ 71

4.1 Malzeme Özellikleri 71
4.2 Model Geometrileri 72
4.3 Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı 75
4.4 Temas Özellikleri 77
4.5 Yüklemeler Ve Birleşimlerin Mesnetlenmesi 78
4.6 Analiz Ayarları 80
4.7 Analiz Sonuçlarinin İrdelenmesi 80
4.8 Göçme Modları 81
4.9 Birleşimlerin Maksimum Kuvvet Kapasiteleri 85
4.10 Moment Dönme Eğrileri 90
4.11 Birleşimlerin Rijitlikleri 93
4.12 Birleşimlerin Enerji Tüketme Kapasiteleri 95
4.13 Bulonlara Gelen Kuvvetler 97

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 102

ÖZGEÇMİŞ 107

SİMGE LİSTESİ

A_b	Bulon kesit alanı
A_n	Alın levhasının net alanı
b_{bf}	Kiriş başlık genişliği (mm)
b_{fc}	Kolon başlığının genişliği
b_p	Alın levhasının genişliği
c	Kiriş ile kolon arasındaki mesafe
C_1	Süreklilik levhası hesabında bulonlar arasıdaki yatay mesafeye bağlı katsayı
C_2	Süreklilik levhası hesabında kolon başlık genişliğine bağlı katsayı
C_a	Bulon kalitesine bağlı katsayı
C_{pr}	Pekleşmeyi içeren katsayı
d	Kiriş derinliği (mm)
d_0	Alın levhasındaki en dış bulonun kiriş uzak başlığının merkezine mesafesi
d_1	Alın levhasındaki iç bulonun kiriş uzak başlığının merkezine mesafesi
d_b	Kiriş profilinin kesit yüksekliği
D_b	Bulon çapı
$d_{b,required}$	Gerekli bulon çapı
d_c	Kolon profilinin kesit yüksekliği
f_1	0,5 ‘den az olmamak koşuluyla belirlenmiş yük katsayısı
F_{nt}	AISC 358-10’ da belirlenmiş karakteristik çekme mukavemeti
F_{su}	Kolondaki limit durumlardan dolayı gerekli mukavemet
F_u	Çeliğin belirlenmiş minimum kopma mukavemeti
F_{up}	Alın levhasının belirlenmiş minimum kopma mukavemeti
F_v	Bulon kayma dayanımı
F_y	Çeliğin minimum akma gerilmesi
F_{yb}	Kiriş malzemesinin minimum akma mukavemeti
F_{yp}	Alın levhasının akma gerilmesi
F_{ys}	Takviye plakasının minimum akma mukavemeti
g	Yatayda yanyana duran bulonlar arasındaki mesafe
h	Panel bölgesinin alt ve üstündeki ortalam kat yüksekliği
h_i	Bulon i. sırasının kiriş basınç başlığına olan mesafesi
k_1	AISC 358-10’da tanımlanmış olan kolon gövdesinin başladığı yer ile kolon başlığının bitimiyle arasındaki en kısa mesafe.
L’	Plastik mafsallar arasındaki mesafe

L_{st} Alın levhası takviyesinin uzunluğu
M_c Kolon gövdesinde oluşan moment
M_f Kirişe gelen yüklerden dolayı kiriş yüzünde oluşan moment
M_{pr} Plastik mafsalda oluşan moment
N_b Basınç başlığındaki bulonların adedi
n_i İç bulonların adedi
n_o Dış bulonların adedi
P_b 8 bulonlu birleşim tipi için iç ve dış bulon sıraları arasındaki düşey mesafe (mm)
P_f Bulon merkeziyle yakın kiriş başlığı arasındaki mesafe
P_{fi} Kiriş çekme başlığının iç kısmının en yakın bulona düşey mesafesi (mm)
P_{fo} Kiriş çekme başlığının dış kısmının en yakın bulona düşey mesafesi (mm)
R_n Kolon başlığı tasarım kuvveti
r_{ni} İç bulonlara gelen kuvvet
r_{no} Dış bulonlara gelen kuvvet
R_{yb} AISC 341-10 da belirlenmiş olan, kiriş veya kolonun beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranı
R_{yc} AISC 341-10‘ da belirlenmiş olan, kiriş veya kolonun beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranı
s C1,C2, Bfc ve k1 ' e bağlı katsayı
T_b Minimum bulon öngerilmesi
t_{bf} Kiriş başlığının kalınlığı
t_{bw} Kiriş gövdesinin kalınlığı
t_{cf} Süreklilik levhası kalınlığı
t_{fc} Kolon başlığının kalınlığı
t_p Alın levhası kalınlığı
T_s Alın levhası takviyesi kalınlığı
T_{ub} Bulonun taşıyabildiği en büyük maksimum çekme kuvveti
t_{wc} Kiriş basınç bölgesindeki kolon başlığı kalınlığı tahkiki için hesaplanan minimum kalınlık
V_g Bulona gelen kesme kuvveti
$V_{gravity}$ Kirişin kesme kuvveti (1,2D+f1L+0,2S-kar yüklerinin dökülmediği durumdaki çatılarda 0,2S yerine 0,7S alınmalıdır.)
V_p Plastik mafsalda oluşan kesme kuvveti
V_u Kirişin ucundaki kesme kuvveti
w Kiriş üzerindeki yayılı yük
w_z Kayma bölgesinin kolon başlık elemanları arasında kalan genişliği
x Plasitk mafsalın kiriş ucuna yakın uzaklığı
Y_c Süreklilik levhası kalınlığı hesabında kullanılan katsayı
Y_p Alın levhası akma mekanizması

KISALTMA LİSTESİ

AISC	American Institute of Steel Construction
ASTM	American Society of Testing and Materials
BFP	Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipi
BSEP	Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Tipi
BUEP	Takviyesiz Alın Levhalı Birleşim Tipi
CEN	Comité Européen de Normalisation
D0	Bulon Çapı ile Bulon Deliği Arasında Boşluk Bulunmayan Çekme Levhalı Modeller
D1	Bulon Çapı ile Bulon Deliği Arasında 1 mm Boşluk Bulunan Çekme Levhalı Modeller
D2	Bulon Çapı ile Bulon Deliği Arasında 2 mm Boşluk Bulunan Çekme Levhalı Modeller
D3	Bulon Çapı ile Bulon Deliği Arasında 3 mm Boşluk Bulunan Çekme Levhalı Modeller
DN	Literatürden Alınan Deneysel Çalışmanın Doğrulama Modelleri
DST	T kesitli Birleşim Tipi
EN	European Standart
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FF	Serbest Başlıklı Birleşim Tipi
LRFD	Load and Resistance Factor Design
RBS	Azaltılmış Kesitli Birleşim Tipi
TALB-P1	Hadde Profille Yapılmış Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Modeli
TALB-P2	Hadde Profille Yapılmış Yatayda Mesnetlenmemiş Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Modeli
TALB-Y1	Yapma Profille Yapılmış Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Modeli
TALB-Y2	Yapma Profille Yapılmış BaşlıklarıKaynak Uygulamalarından Dolayı Eğrilmiş Takviyeli Alın Levhalı Birleşim Modeli
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
WFP	Kiriş Başlıkları Kolon Başlığına Dik Kaynatılmış Birleşim Tipi
WUF-B	Kayma Levhasının Kiriş gövdesine Bulonla Birleşitirildiği Kaynaklı Birleşim Tipi
WUF-W	Kayma Levhasının Kiriş gövdesine Kaynakla Birleşitirildiği Kaynaklı Birleşim Tipi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Yeterli Dayanımlı Panel Bölgeleri Moment-Dönme Grafiği [55] 12
Şekil 2. 2 Rijit Panel Bölgeleri için Çevrimsel Moment-Dönme Grafiği[55] 12
Şekil 2. 3 Kaynaklı Birleşim Tipleri 13
Şekil 2. 4 Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşim Tipi 14
Şekil 2. 5 Azaltılmış Kesitli Kiriş Birleşim Tipi 14
Şekil 2. 6 Alın Levhalı Birleşim Tipleri 15
Şekil 2. 7 Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipleri 16
Şekil 2. 8 Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipleri 16
Şekil 2. 9 FEMA 350' de belirtilen Mf ve Mc momentleri [50] 19
Şekil 2. 10 FEMA 350' de belirtilen d0 ve d1 mesafeleri [50] 19
Şekil 2. 11 AISC 358-10 [58]'da belirtilen alın levhalı birleşim tipleri 25
Şekil 2. 12 Takviyesiz 4 bulonlu birleşimde alın levhası akma çizgileri [58] 29
Şekil 2. 13 Takviyeli 4 bulonlu birleşimde alın levhası akma çizgileri [58] 29
Şekil 2. 14 Takviyeli 8 bulonlu birleşim alın levhası akma çizgileri deseni [58] 30
Şekil 2. 15 Takviyesiz 4 bulonlu alın levhalı birleşimde kolon akma çizgileri [58] 33
Şekil 2. 16 Takviyeli 8 bulonlu birleşimde kolon akma çizgileri deseni [58] 34
Şekil 3. 1 Temas probleminde boşluğun tanımlanmadığı durum 39
Şekil 3. 2 Temas probleminde boşluğun tanımlandığı durum 39
Şekil 3. 3 L9 numunesinin geometrisi[51] 41
Şekil 3. 4 L9 numunesinin geometrisi ve boyutları için kullanılan semboller [51] . 42
Şekil 3. 5 DN02 modelinin sonlu eleman ağ yapısı 43
Şekil 3. 6 Kuvvet- Yerdeğiştirme Grafikleri 44
Şekil 3. 7 L9 numunesinin hasarı ve DN02'nin plastik şekildeğiştirme grafiği 45
Şekil 3. 8 Kullanılan malzemelere ait gerilme-gerinim grafikleri 48
Şekil 3. 9 Tek tesirli kesme etkisindeki bulonlu birleşimlere ait boyutlar 49
Şekil 3. 10 D0-1 SOLID186 elemanına ait geometri ve düğüm noktaları[60] 50
Şekil 3. 11 Sonlu eleman ağ yapısı 51
Şekil 3. 12 D0 Grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri 56
Şekil 3. 13 D0-2 Modeline ait eşdeğer gerilme diyagramı 57
Şekil 3. 14 D1 Grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı 59
Şekil 3. 15 D1-2 Modeline ait eşdeğer gerilme diyagramı 61
Şekil 3. 16 D2 Grubuna ait kuvvet-yerderdeğiştirme diyagramları 62
Şekil 3. 17 D3 Grubuna ait kuvvet-yerderdeğiştirme diyagramları 66

Şekil 4. 1 TALB-P1 ve TALB-P2 modellerine ait geometri 73
Şekil 4. 2 TALB-Y1 modeline ait geometri 73
Şekil 4. 3 TALB-Y2 modeline ait geometri 74
Şekil 4. 4 Alın levhası takviye detayı 74
Şekil 4. 5 Ansys Workbench Design Modeller[59] ile hazırlanan 3 boyutlu model 75
Şekil 4. 6 TALB-Y2' ye ait sonlu eleman ağ yapısı 76
Şekil 4. 7 Kolon panel bölgesi ve bulonlarda ağ yapısı 77
Şekil 4. 8 TALB-P1 ve TALB-P2 numunelerinde serbest dönme değerleri..... 78
Şekil 4. 9 TALB-P1 ve TALB-P2 numunelerinde serbest dönme değerleri..... 79
Şekil 4. 10 TALB-P1 ve TALB-P2 birleşimlerinde yerdeğiştirme yüklemeleri..... 79
Şekil 4. 11 TALB-Y1 ve TALB-Y2 birleşimlerinde yerdeğiştirme yüklemeleri..... 80
Şekil 4. 12 TALB-Y1' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı 82
Şekil 4. 13 TALB-Y2' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı 82
Şekil 4. 14 TALB-P1' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı 83
Şekil 4. 15 TALB-P2' ye ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı 83
Şekil 4. 16 TALB-Y1 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı 84
Şekil 4. 17 TALB-Y2 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı 84
Şekil 4. 18 TALB-P1 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı 85
Şekil 4. 19 TALB-P2 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı 85
Şekil 4. 20 TALB-Y1' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı 86
Şekil 4. 21 TALB-Y2' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı 87
Şekil 4. 22 TALB-P1' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı 87
Şekil 4. 23 TALB-P2' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı 88
Şekil 4. 24 TALB-Y1' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı 89
Şekil 4. 25 TALB-Y2' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı 89
Şekil 4. 26 TALB-P1' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı 90
Şekil 4. 27 TALB-P1' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı 90
Şekil 4. 28 TALB-Y1' e ait moment -dönme eğrileri 91
Şekil 4. 29 TALB-Y2' e ait moment -dönme eğrileri 91
Şekil 4. 30 TALB-P1' e ait moment -dönme eğrileri 91
Şekil 4. 31 TALB-P2' e ait moment -dönme eğrileri 92
Şekil 4. 32 TALB-Y1' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi 94
Şekil 4. 33 TALB-Y2' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi 94
Şekil 4. 34 TALB-P1' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi 95
Şekil 4. 35 TALB-P1' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi 95
Şekil 4. 36 Bulonlara gelen kuvvetlerin dağılımı 98

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 AISC 358-10' da alın levhalı birleşimler için geometrik ön koşullar 26
Çizelge 3. 1 L9 numunesine ait malzeme mukavemet değerleri[51] 40
Çizelge 3. 2 Modellere göre eleman sayıları, düğüm noktası sayıları ve modellerin yük taşıma kapasiteleri 43
Çizelge 3. 3 Hazırlanan modellere ait malzeme mukavemet değerleri [39] 46
Çizelge 3. 4 Bulonların geometrik özellikleri 48
Çizelge 3. 5 Modellerde teması modelleyen ara eleman uygulamaları 52
Çizelge 3. 6 Modellerde eleman adetleri ve düğüm sayıları 53
Çizelge 3. 7 Modellerde öngerilme 54
Çizelge 3. 8 D0 Modellerine ait gerilmeler 57
Çizelge 3. 9 D0 Modellerine ait gerinim değerleri ve yerleri 59
Çizelge 3. 10 D0 Modellerindeki bulonlara ait gerinim değerleri ve yerleri 59
Çizelge 3. 11 D1 Modellerine ait gerilme değerleri ve yerleri 61
Çizelge 3. 12 D1 Modellerine ait plastik gerinim değerleri ve yerleri 62
Çizelge 3. 13 D1 Modellerinde bulonların eşdeğer gerilme-plastik gerinim değerleri 62
Çizelge 3. 14 D2 Grubunda plakalardaki eşdeğer gerilme değerleri ve yerleri 64
Çizelge 3. 15 D2 Grubu ait plakalardaki plastik gerinim değerleri ve yerleri 65
Çizelge 3. 16 D2 Grubu bulonlarda eşdeğer gerilme-plastik gerinim değerleri 65
Çizelge 3. 17 D3 Grubu Modellere Ait Plakalarda Kuvvet, Gerilme Değerleri 67
Çizelge 3. 18 D3 Grubu Modellere Ait Plakalarda gerinim Değerleri ve Yerleri 68
Çizelge 3. 19 D3 Grubu ait bulonlarda eşdeğer gerinim Değerleri ve Yerleri 68
Çizelge 3. 20 Bulon kesme kuvvetleri 69
Çizelge 4. 1 Hazırlanan modellere ait malzeme mukavemet değerleri [39] 72
Çizelge 4. 2 Modellere ait sonlu eleman sayıları ve düğüm noktası sayıları 77
Çizelge 4. 3 Yükleme alt adımları 80
Çizelge 4. 4 Birleşimler taşıdığı maksimum kuvvetler 89
Çizelge 4. 5 Birleşimler taşıdığı maksimum momentler ve dönme değerleri 93
Çizelge 4. 6 Birleşimler taşıdığı maksimum momentler ve dönme değerleri 93
Çizelge 4. 7 Modellerin tükettikleri toplam enerji miktarları 96
Çizelge 4. 8 Modellere gelen maksimum çekme kuvvetleri 97

ÖZET

TAKVİYELİ ALIN LEVHALI BULONLU KİRİŞ KOLON BİRLEŞİMLERİNİN SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

Anıl ZAFER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Çelik yapı sistemlerinde sünek davranış oluşması için birleşim bölgelerinin sünek tasarımı, sistemde kullanılan malzemenin sünekliği kadar önemlidir. Yapının deprem altında davranışı, birleşimlerde ortaya çıkabilecek gevrek kırılmalardan önemli ölçüde etkilenir. 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde yapılarda gözlenen hasar tipleri çelik yapılardaki sünek birleşim kavramının revize edilmesine yol açmıştır. Bu amaçla FEMA 350 (Federal Emergency Management Agency) tarafından kurulan "the SAC Steel Project" ekibi çeşitli birleşim tipleri önererek bu birleşimlerin tasarım kriterlerini belirlemişlerdir.

Bu tezde FEMA 350 tarafından önerilen, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği tarafından da kabul gören takviye alın levhalı bulonlu birleşim tipi incelenmiştir. Tezde önce, çekme kuvvetlerine maruz bulonlu birleşimlerin davranışları incelenmiştir. Böylelikle, sonlu elemanların sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumluluğu irdelenmiş ve ayrıca farklı bulon deliği çapları ve bulonların davranışları araştırılmıştır. Sonlu eleman modellerinin deneysel çalışma verileriyle uyumlu olduğu, uygulanan sonlu eleman tekniklerinin geçerli olduğu tespit edilmiştir. Burada uygulanan teknikler alın levhalı modeller için de uygulanmıştır. Takviyeli alın levhalı bulonlu birleşim için geometrik ve malzeme özellikleri literatür çalışmasından alınmıştır. Deneysel çalışmada oluşmuş olan yükleme şartları sonlu eleman modellerine uygulanmıştır. Deneysel çalışması yapılan deney

numunelerinin yatayda ötelenmesinin tutulmaması ve yapma profillerde kaynaktan dolayı başlıkların eğrilmesi gibi değişkenlerle yeni modeller türetilerek bu etkilerin birleşimlerde ortaya çıkardığı farklılıklar araştırılmıştır. Hazırlanan tüm modellerde doğrusal olmayan malzeme davranışı, doğrusal olmayan geometrik davranış ve doğrusal olmayan temas davranışları dikkate alınmıştır.

Çekme kuvvetlerine maruz plakalarda yapılan sonlu eleman analizlerinde bulon delikleri ile bulon çapı arasındaki mesafe arttıkça birleşimin rijitliğinin azaldığı gözlenmiştir. Bulonlu birleşimlerde plakalarda oluşan en büyük gerilme ve gerinim değerleri yüklemeye maruz plakada yüklemeye en yakın bulon delikleri civarında gözlenmiştir. Ayrıca bulon çapı ile bulon deliği arasında mesafe bulunmayan durumlarda bulon gövdesi ile plaka arasında sürtünmeli temas özelliğinin ihmal edilebilir olduğu belirlenmiştir. Takviye alın levhalı modeller incelendiğinde bulonlardaki en büyük çekme kuvvetleri alın levhasının en dışındaki bulonlarda oluştuğu belirlenmiştir. Takviyeli alın levhalı birleşimlerde plastik mafsal oluşma bölgesi birleşimden takviye alın levhasının bittiği bölgede kiriş üzerinde oluştuğu tespit edilmiştir. Yapma profilli kirişlerde kiriş başlıklarının kaynaktan dolayı eğrildiği durumlarda kirişte rijitlik kayıpları gözlenirken bu kayıpların %1 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. Bununla beraber kirişin yatayda tutulu olmadığı durumda %6 oranında rijitlik kayıpları oluşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Takviyeli alın levhalı birleşimler, sonlu eleman analizi, çevrimsel yükleme, moment aktaran birleşimler, çelik kiriş kolon birleşimi,

ABSTRACT

FINITE ELEMENTS ANALYSES OF BOLTED STIFFENED END PLATE BEAM-COLUMN CONNECTIONS

Anıl ZAFER

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Serkan BEKİROĞLU

Ductile design of beam - column connections is as critical as ductile material used in steel structures so that it can provide ductile behavior in the steel structures. Structure behavior subjected to earthquake is significantly affected due to brittle failure of the connections. Structural damages, which are occurred by 1994 Northridge and 1995 Kobe Earthquakes, caused review for the concept of ductile connections in the structures. Therewith, the SAC Steel Project team has determined principles of the beam-column connections which has been offered as multiple and reliable by the team.

In this thesis, the stiffened endplate connection types which are advised from FEMA 350 and included in Turkish Building Earthquake Codes. In the beginning for the understanding of bolt behaviours, the single lap connections are investigated first. Thereby, whether results obtained by using finite element method and experimental studies are compatible or not is scrutinized. Moreover, various bolt-hole size and behaviours of bolts are researched. It is observed that the finite element analyse results and experimental results are compatible each other and the applied finite element techniques are valid. Techniques obtained from single lap connections is used for stiffened end plate connections. The geometry and material properties of the finite element models are obtained a study from literature. The loading procedure of the corresponding study is considered. The finite element models derived from literature

study by adding different features such as not to supporting beam laterally or transverse bending on the beam flange caused by welding applications. Nonlinear effects of materials, geometry and contacts are considered, for all finite element models.

It is observed that the rigidity of the single lap connections decreases by increment of the bolt hole size. The maximum stresses are observed in the bolt holes which are nearest to applied forces in the tension member. Moreover, it is observed that the frictional contact between plates can be ignored when the bolt diameter and bolt-hole diameter are equal. Similarly, for the stiffened end plate connections, the highest tension forces are observed in the outer bolts in the end plates. The plastic hinges are occurred approximately same region which is the place where end plate ends. Transverse bending in the beam flange caused by welding process can reason loss of rigidity in the build-up sections and these losses are order of approximately 1%. However, not to supporting the beam in a lateral way can cause approximately 6% loss of rigidity.

Keywords: Stiffened end plate connections, finite element analyses, cyclic loading, moment resisting connections, steel beam-column connections,

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Moment aktaran çelik kolon kiriş birleşimlerinde alın levhalı birleşim tipi 1960' lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır[1,2,3]. İlk alın levhalı birleşimlerin tasarımları bulonun maruz kaldığı manivela etkisi dikkate alınan statik kabullerle yapılmaktaydı. Bu etkilerden dolayı alın levhası kalınlığı ve bulon çapları daha fazla çıkmaktaydı [4]. Douthy ve McGuire ve benzer şekilde Kato ve McGuire [5,6] T-kesitli bağlantı tipi ile beraber alın levhalı birleşim tipi için çeşitli deneysel çalışmalar yapmıştır. Deneylerde plastik tasarım kriterleri oluşturmak amaçlanmıştır. Bu tasarım ilkelerinde manivela etkileri yüksek alınarak, daha kalın alın levhası ve daha büyük çaplı bulonlar tasarlanmaktadır. Bu kriterlere göre hazırlanan tüm kirişlerde tam plastik moment oluştuğu gözlenmiştir [7].

Ostrander[8] düşey yükler altında farklı alın levhası boyutları, farklı kolon ve kiriş kesitleri ve kolonlarda farklı boyutlardaki takviye levhaları için deneyler yaparak, bu testlerden elde edilen moment-dönme ilişkilerini ve bağlantıların performansını kıyasladı. Buna göre alın levhası kalınlığı belirli bir değere kadar artırıldıkça bağlantının rijitliğinin artmakta olduğunu belirledi. Ostrander' in deneysel çalışmalarına [8] göre kirişte akma çizgisi oluştuktan sonra, alın levhası kalınlığı bağlantının davranışını etkilememektedir. Ayrıca alın levhası kalınlığının kolondaki takviye levhalarının daha etkili çalışmasını sağladığını tespit etmiştir. Böylece bağlantının davranışını etkileyen faktör belirli bir alın levhası kalınlığından sonra kolon kesiti ve özellikle kolon başlığı olmaktadır.

Paker ve Morris [9] akma çizgileri yöntemini kullanarak alın levhası kalınlığı ve kolon başlığı kalınlıklarına göre oldukça yaklaşık olarak eğilmede akma momentini tespit etmişlerdir.

Krishnamurthy [10]' nın çalışması alın levhalı birleşimler için ilk sonlu elemanlar analizlerinden biridir. Çalışma, endüstriyel yapılarda sıklıkla kullanılan çeşitli açıklıktaki onüç adet iki ve üç boyutlu sonlu eleman modelini içermektedir. Üç boyutlu modellerin çözümü oldukça uzun zaman alıp bilgisayar gücü yetersizliklerinden dolayı, iki ve üç boyutlu analizler arasında korealasyon saptanmaya çalışılmıştır. Çalışmasında üç boyutlu modeller iki boyutlu modellere göre daha az rijit olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca yaptığı çalışmalar sonucundan eski çalışmalarda kabul edilen manivela etkilerinin beklenenden çok daha az olduğu sonucuna varmıştır.

Ahuja [11], Krishnamurthy' e benzer şekilde ilk sonlu elemanlar analizi yapan araştırmacılardan olup, 8 bulonlu takviye levhalı alın levhalı birleşim analizleri yapmıştır. Çalışmalarında malzemeleri doğrusal elastik kabul ederek 2-boyutlu ve 3-boyutlu birleşimler oluşturdu. Birleşimlerde bulonların taşıdığı kuvvetleri ve alın levha davranışlarını araştırdı.

Ghassemieh [12], Ahuja' nın çalışmalarını doğrusal olmayan malzemeler için genişletti ve gerilme ve gerinim değerlerinde bilinear davranışlar tanımladı.

Akma Çizgileri teorisi alın levhalı birleşimlerde dayanımı tahmin etmek için yaklaşık sonuçlar vermekle birlikte bulonların taşıdığı yükleri ihmal ederek hesap yapmaktadır [1]. Kennedy vd. [13] bulonların taşıdığı yükleri tahmin etmeye yönelik manivela etkilerini de içeren yeni bir yöntem geliştirdiler. Kennedy'nin oluşturduğu yöntem kabul görerek pek çok çalışmayı etkiledi. Borgsmiller[14] çalışmasında Kennedy yöntemini basitleştirerek daha kullanışlı hale getirdi. Bulonlarda kopma göz önünde bulundurularak birleşim dayanımını hesaplamıştır. Kennedy yöntemine bazı kabuller getirerek daha basit bir hesap yöntemi geliştirmiştir.

Alın levhalı birleşimler için ilk olarak çevrimsel yüklemeler Ballio [15] tarafından yapılmıştır. Birleşimin enerji tüketme kapasitesi ve sünekliği incelenmiştir.

Tsai ve Popov [16] 3 adet deney numunesi hazırlayarak çevrimsel yüklemede bulonların davranışını araştırmıştır. 4 bulonlu takviyesiz, 4 bulonlu takviyeli ve takviyesiz yüksek

mukavemetli 4 bulonlu birleşimlerdir. Çevrimsel yükleme altında alın levhalı birleşimlerde bulonların kopmasıyla birleşimin göçtüğünü, takviye levhalarının ise bulonların yük dağılımına olumlu yönde katkıları olduğunu tespit etmişlerdir. Ghobarah vd. [17] çevrimsel yüklemeler altında genişletilmiş alın levhalı birleşimleri incelemişlerdir. Buna göre 4 adet deney numunesi hazırlamışlardır. Numunelerin kolonlarını sabit yük ile yükleyip, kiriş ucundan çevrimsel yerdeğiştirmeler vermişlerdir. Bu deneylerde birleşimin genel davranışı incelenmekle beraber, birleşimi oluşturan her bir elemanın maruz kaldığı etkiler de incelenmiştir. Kiriş ve panel bölgesinde enerji tüketiminin iyi paylaşıldığı birleşimlerin iyi performans sergilediğini ortaya koymuşlardır.

Kukreti vd. [18] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak alın levhalı birleşimlerde moment ve dönme ilişkilerini analitik bir şekilde sunmuşlardır. Hazırlanan sonlu eleman modellerinin bir kısmının deneylerini de yaparak bilgisayar çözümlerinin geçerliliğini test etmişlerdir. Bunun yanısıra, sonlu eleman çözümlerinden elde edilen bilgilere göre bağlantı tipinin genel davranışıyla ilgili bağıntılar geliştirmişlerdir.

Chasten vd. [19] bulonlar üzerindeki manivela etkileriyle kuvvetleri ve alın levhasındaki kayma gerilmelerini incelediler. Bu amaçla 7 adet 8 bulonlu genişletilmiş alın levhalı numune hazırladılar. Bu numunlerde bulonda kopma, kaynakta kopma veya levhada kayma yırtılması ile sonuçlanmıştır. Ayrıca bu numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturulup, lineer olmayan çözümleme yapılmıştır. Analitik olarak tahmin edilen bulon kuvvetleri ile deneysel bulon kuvvetleri kıyaslanıp, yeterli yaklaşıklıkta sonuçlar elde etmişlerdir.

Steenhuis [20] Eurocode 3 [21]'te belirtilen "Tasarım momenti dayanımı (M_{rd})" yöntemine alternatif bir yöntem ortaya koymaktadır. Bu yöntem bilgisayar hesaplamaları için uygun olup, düğüm noktasının plastik analizini içermektedir. Ayrıca Eurocode 3 [21]' te belirtilen yöntemle uyumlu sonuçlar vermektedir.

Sherbourne vd. [22] alın levhalı birleşimler için sonlu eleman modellerinin 3 boyutlu analizi için yöntem geliştirdiler. Bulonlarda oluşan manivela kuvvetleri için diyagramlar hazırladılar ve yapılan çalışmaları deneylerle kıyaslayarak doğruluk değerlendirmesi yaptılar. Buna göre alın levhası kalınlığı ile manivela etkilerinin ters orantılı olduğunu belirttiler. Kalın alın levhalı birleşimlerde bulonlar eksenel yüke maruzken, ince alın

levhalı birleşimlerde manivela etkileri ile bulonlar iki yönlü momentlere maruz kalmaktadır.

Benzer şekilde, Shi vd. [23] alın levhalı birleşimlerde moment- dönme eğrileri için modelleme tekniklerini araştırmışladır. Birleşim karakteristiklerini çekme bölgesindeki, basıç bölgesindeki ve kayma bölgesindeki bileşen davranışları olarak belirlemişlerdir. Kolon gövdesindeki basınç ve kayma bölgelerini dikkate alarak birleşimin dönme değerleri ve moment değerleri türetilmiştir. Diğer sonlu eleman uygulamalarında olduğu gibi yapılan çalışmalara ait deneyler ile elde edilen sonuçların geçerliliği test edilmiştir. Abolmaali vd. [24] 'de Ramberg-Osgood ve 3-parametreli model [25] ile alın levhalı birleşimlerde moment-dönme ilişkisini tahmin etmeye yönelik çalışmalar yapmışlardır.

Choi ve Chung [26] alın levhalı birleşimler için hazırlanan 3 boyutlu sonlu elemanlar modellerinin yakınsaması üzerine çalışmışlardır. Elastoplastik, sabit ve değişken düğüm noktalarına sahip 3 boyutlu elamanların kullanımını önermişlerdir. Bulon öngerilmesi, somun geometrisi ve başlığı dikkate alınmıştır. Basit ve etkili temas algoritması oluşturmuşlardır. Ayrıca elemanlar arasındaki geometrik boşlukları tanımlayacak elemanlar üzerine çalışmışlardır. Sonuçların deneylerle kıyaslanması olumlu sonuçlar vermiştir.

Sherbourne ve Bahaari[27] takviye alın levhalı birleşimlerin yapısal davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca, bulonlara öngerilme uygulanması ve el ile sıkılmış bulonlar arasındaki davranış farklarını şöyle açıklamaktadırlar:

Bulonlarda öngerilme bulunmayan durumunda alın levhaları ve kolon başlığı eğilme etkisinde kolayca birbiriyle teması azalabilmektedir. Öngerilmeli durumlarda ise bu durum belirli moment veya çekme kuvvetine kadar ertelenmektedir. Bu nedenle, kalın alın levhalı birleşimlerde öngerilme bulunan durumlarda birleşimin rijitliği ince alın levhalı birleşimlere göre daha fazla olmaktayken, öngerilmesiz durumlarda birleşim rijitliği alın levhası ile kolon başlığının teması azaldığından daha da az olmaktadır. Yapılan çalışmalarda elastik olmayan sonlu eleman modelleri ile deneysel sonuçların hem rijitlik anlamında hem de dayanım anlamında uyumluluğu ortaya konmuştur. Yük ve yerdeğiştirme için tasarımcıların yararlanabileceği 3 boyutlu diyagramlar geliştirmişlerdir. Ayrıca bulonlardaki öngerilme bulona gelen çekme kuvvetlerini,

bulondaki manivela etkilerini ve kiriş başlığındaki yük dağılımını nihai yükleme durumu için etkilememektedir. Fakat bulon boyutu bulonun maruz kaldığı manivela etkilerinde önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir. Aynı şekilde Sherbourne ve Bahaari başka bir çalışmalarında[28] alın levhalı birleşimlerde moment ve dönme ilişkilerini araştırmışlardır. Birleşimlerin davranışlarını belirlemede modellerin karakteristiklerini içeren çoklu regresyon analizi yöntemi sunmaktadır. Çalışmalarında mevcut bağıntılar arasında Richard-Abbott' a ait Güç fonksiyonlarının [29] moment -dönme ilişkileri için uygun olduğunu belirterek, doğrusal olmayan davranışta, ilk dayanım ve pekleşme ile açığa çıkan ilave dayanımların belirlenmesinde uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Alın levhalı kolon kiriş birleşimleri genellikle rijit birleşimler olarak kabul edilmektedir. Hasan vd. [30] alın levhalı birleşimlerle yapılan deneylerden elde edilen bilgileri toplayarak birleşimlerin rijitliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları araştırmalara göre deney numunelerinin başlangıç rijitlikleri %49 oranında $10^{5,05}$ kN-m/rad'dan az olmaktadır. Bu tip birleşimler yarı rijit birleşimler olarak adlandırılmaktadır. Yukarıda belirtilen dönme rijitliğinin üzerindeki rijitlikler ise nihai moment taşıma kapasitesine göre rijit birleşim olarak kabul edilmektedir. Wheeler vd. [31,32] ise alın levhalı birleşimlerin kutu kesitli profiller üzerindeki davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında kutu kesitli alın levhalı birleşimlerde nihai ve servis durum için birleşimlerin moment kapasitelerini belirlemek amaçlanmıştır. Çalışmalarında kiriş-kiriş birleşimleri ve kolon-kiriş birleşimleri incelenmiştir. Bulonlardaki manivela etkileri hem salt çekme hem de moment etkilerinde değerlendirmişlerdir. I kesitli birleşimlerde olduğu gibi kutu kesitli birleşimlerde de akma çizgileri teorisi yardımıyla teorik olarak moment kapasiteleri tahmin edildikten sonra deneysel çalışmalarla elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Çalışmalarında deneysel verilerle teorik elde edilen bulgular %95 oranında tutarlılık göstermiştir.

Yorgun [33] üç farklı deney numunesi ile alın levhası ve kolon başlığı arasına kiriş kesitinde parça ekleyerek birleşimin elastik olmayan dönme kapasitesini ve moment dayanımını araştırmıştır. İlk hazırlanan numune yönetmeliklerdeki alın levhalı birleşim tipi iken diğer numunelerde alın levhası ile kolon başlığı ayırılmıştır. Eurocode 3 [21]' te belirtilen bileşen yöntemi ile birleşimin davranışını da belirleyerek, deney sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kolon başlığı ile alın levhası arasına

yerleştirilen parça deney sonunda tamamen elastik bölgede kalmaktadır. Alın levhası ile kolon başlığı arasında parça bulunan numuneler daha düşük süneklik gösterip daha yüksek dayanımlara ulaşmıştır. Ayrıca alın levhası kalınlığının az olduğu deney numunelerinde alın levhasının eğilerek plastik şekildeğitirmeler ortaya çıkmaktayken, kalın alın levhalı numunelerde bulonlarda plastik şekildeğiştirmeler gözlenmiştir.

Sumner ve Murray [34] genişletilmiş alın levhalı birleşimlerin çevrimsel yükleme karşısında davranışını incelemişlerdir. 6 adet kolon kiriş birleşim tipinin yanısıra kompozit döşemesi olan bir numunede teste tabii olmuştur. Testler sonuçları genişletilmiş alın levhalı birleşim tiplerinin moment aktaran birleşim tipi olarak yeterli dayanıma, rijitliğe ve sünekliğe sahip bir şekilde tasarlanabileceğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca kompozit döşemenin birleşime etkileri de tartışılmıştır. Tasarımda kompozit döşemelerin birleşime etkilerinin de dikkate alınması gerektiği tavsiye edilmiştir.

Maggi vd. [35] alın levhalı birleşimler için sonlu eleman modelleri ile parametrik çalışma yapmışlardır. Öncelikle sonlu eleman modeli deneysel verilerle kalibre edilmiş olup, sonrasında diğer sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Malzemenin doğrusal olmayan davranışları, geometrik süreksizlikler ve büyük yerdeğiştirmeler dikkate alınmıştır. Değişken olarak ise alın levhası kalınlığını ve bulon çapını seçmişlerdir.

Guo vd. [36] takviyeli ve takviyesiz alın levhalı birleşimleri çevrimsel yüklemede birbirleriyle kıyaslamışlardır. Bu amaçla 6 deney numunesi hazırlanmıştır. Numunler alın levhasında takviye bulunan- bulunmayan, kolon takviyeleri bulunan-bulunmayan ve alın levhası kalınlıkları değişen şekillerde olmak üzere çeşitlendirmişlerdir. Takviyelerin birleşimin davranışı üzerinde dikkate değer etkileri bulunmaktadır. Elde ettikleri sonuçlara göre takviyeli olan birleşimler daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir. Ayrıca bu birleşimler daha fazla yük taşıma kapasitesine de sahiptirler. Daha ince alın levhası bulunan birleşimlerde takviyeler birleşimin rijitliğini çok büyük ölçüde artırmaktadırlar. Ayrıca bu numunelerde kaynaklardaki ilk çatlakların oluşumunu da ertelemektedirler. Kolon gövdesindeki takviye levhaları ise panel bölgesindeki gerilme dağılımını etkileyerek kolon göçme mekanizmalarını önlemektedir. Benzer şekilde Shi vd. [37] ise alın levhalı birleşimleri sonlu eleman modelleri ile parametrik olarak

incelemişlerdir. 8 adet model oluşturulmuş olup, bunlardan bir tanesi genişletilmemiş alın levhalı diğerleri ise genişletilmiş alın levhalıdır. Modellerin bulon adetleri, kolon berkitmesi bulunup-bulunması, alın levhası takviyesi bulunup-bulunmaması ve alın levhası kalınlıkları değişimleri gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Bu modellere ait yükleme deneyleri de yapılmış olup moment- dönme ilişkileri modellerle kıyaslanmıştır. Sonlu eleman çözümlerinin deneylerle uyumluluğu vurgulanmıştır. Bu alanda birleşimin davranışı, yük taşıma kapasitesi, moment dönme ilişkileri ve göçme modları model ve deneylerde paralellik göstermiştir. Ayrıca yazarlar, deneylerden elde edilmesi güç olan verilerin sonlu eleman modelleri ile kolayca elde edilebildiğini vurgulamışlardır. Baldassino ve Zandonini [38] alın levhalı birleşimlerin eksenel yükte, kesme kuvvetlerine maruzken, moment altında ve çeşitli kombinasyonlarında davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla 32 adet test yapmışlardır. Plastik davranışta T-kesitli birleşim davranışının eksenel kuvvetler ve kesme kuvvetlerinin anlaşılmasında önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Gerami vd. [39] alın levhalı birleşimlerin deprem davranışını incelemek için farklı bulon dizilimleri üzerinde durmuşlardır. Ayrıca T-kesitli birleşim, alın levhalı birleşim tipleri de modellenmiştir. Bu amaçla hem yatay sırada hem düşey sırada farklı dizilimli bulonlu birleşimler deneylere tabii tutulmuş ve ayrıca sonlu eleman çözümleri de yapılmıştır. Çalışmada ilk dönme rijitlikleri, enerji yutma kapasiteleri ve moment kapasiteleri incelenmiştir. Özellikle T-kesitli birleşimlerde bulonların kiriş başlığı ile mesafesi arttıkça çevrimsel eğrilerin alanı azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca bulonlar ile kiriş gövdesindeki mesafe arttıkça birleşimin başlangıç dönme rijitliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Mashaly vd. [40] yanal yüklemelere maruz 4 bulonu genişletilmiş alın levhalı birleşimlerin davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında birleşime etkiyen 12 önemli parametre belirlemişlerdir.

Kiamanesh vd. [41] ‘ de benzer şekilde genişletilmiş alın levhalı birleşimlerde dairesel bulonlar kullanılarak çevrimsel yükleme altında davranışlar incelenmiştir. Çalışmalarında 23 adet sonlu eleman modeli üretilerek alın levhası kalınlıkları ve farklı bulon çapları ile modeller oluşturulmuştur. Sonlu eleman modellerinde dairesel bulon kullanımı moment kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir. Dessouki vd. [42] geometrik ve malzemede doğrusal olmayan davranışı gözönünde bulunduran sonlu eleman modelleri oluşturmuşlardır. Bu modellerde 4 bulonlu ve genişletilmiş alın levhalı birleşimler

çalışılmıştır. Ayrıca akma çizgileri yöntemi ile birleşimlerin moment kapasitelerini de hesaplayarak kıyaslamışlardır. Sonuçlarda ise, çoklu bulon sırası bulunan birleşimlerde %30-35 oranında nihai moment taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir. İnce alın levhalı modellerde alın levhası bulunması durumunda eğilmede moment taşıma kapasitesi %30 civarında artmakta olduğunu belirtmişlerdir. Wang vd. [43] yaptıkları çalışmada başlık levhalı birleşim tipinin salt eğilme altındaki davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla hazırlanan sonlu eleman modeli deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Çalışmalarında pratik tasarım için yöntem önermişlerdir. Ataei vd. [44] kompozit kolona alın levhalı birleşimin moment-dönme davranışını kompozit döşeme etkileri altında incelemişlerdir. Burada Ramberg-Osgood [25] bağıntılarından yaralanmışlardır. Detaylı 3 boyutlu model oluşturmuşlar ve çalışmalarını literatürden aldıkları çalışma [45,46] ile doğrulamasını gerçekleştirmişlerdir.

Prinz vd. [47] kalın alın levhalı birleşimlerde çoklu bulon sıraları için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmaları özellikle mevcut çelik yapıların birleşim bölgelerinin iyileştirilmesine yöneliktir. Mevcut yapılarda alın levhalarına takviye yapmanın imalat açısından güçlükleri bulunduğu için takviyesiz alın levhalarında ek bulon sıralarının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında eşit rijitlikli kolon ve kirişler ile zayıf kolon güçlü kirişlerde; alın levhası kalın birleşimler için kolon kesitindeki şekildeğiştirmeler göçme mekanizmasında baskın hale geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca zayıf kolon güçlü kiriş ve eşit rijitlikli kolon kirişlerde alın levhasındaki ilave bulon sırası kolon gövdesine yakınlaştıkça birleşimin moment dönme kapasitesini artırdığı gözlenmiştir. Kolon başlığında dışarı doğru yapılan bulon sırasının birleşime etkilerinin az olduğunu tespit etmişlerdir. Yılmaz ve Bekiroğlu [48] Türk Deprem Yönetmeliği'nde [49] belirtilen moment aktaran kaynaklı birleşimlerde monotonik yükleme altında birleşimin davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla aynı birleşim tipleri FEMA-350 [50]' ye göre tasarlanmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modelleri literatürden alınan iki adet [37] çalışma ile kalibre edilmiştir. Çalışmada birleşim tipleri hasar durumları, yük taşıma kapasiteleri, eş değer (von-Mises) şekil değiştirmeleri kıyaslanmıştır. Kıyaslamalar neticesinde ek başlık levhalı birleşim tipinin diğer kaynaklı birleşimlere göre daha üstün olduğu belirtilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada çelik yapılarda takviyeli alın levhalı bulonlu birleşimlerin çevrimsel yükler altında davranışı araştırılacaktır. Deprem etkileri altında kolon-kiriş düğüm noktalarında şekil değiştirme bölgeleri belirlenmeye çalışılacaktır. Buna göre 4 ayrı sonlu eleman modeli oluşturulacak olup, bu modeller literatürden alınan çalışmadaki çevrimsel yüklere maruz bıraklacaktır. Hazırlanan modellerde birleşim bölgeleri, analitik olarak incelendikten sonra elde edilen sonuçlar birbiriyle kıyaslanacaktır. Bu bilgiler ışığında çevrimsel yükleme altındaki çelik bir birleşim teorik ve deneysel analizleri bir bütün şeklinde incelenecektir. Hazırlanan modellerde yapma profillerde başlıkların eğrildiği durum ve kirişin yatayda tutulu olmadığı durumlar incelenecektir. Yapma profillerde kaynak uygulamaları ile profil başlıklarının eğrilmesi sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu durumun kiriş yük taşıma kapasitesine, kirişin enerji yutma kapasitesine etkileri incelenecektir. Ayrıca kirişin yatayda tutulu olmadığı durum için de benzer özelliklerin değişimi ile ilgili sonuçlar elde edilecektir.

1.3 Çalışmaların Yöntemi

Alın levhalı birleşimlerin çevrimsel yükleme altındaki davranışlarının araştırıldığı bu çalışmada 2 farklı deneye ait sonuçlar ile bu deney numunelerinin sonlu elaman modelleri hazırlanıp, sonuçların geçerliliği tespit edilecektir. Öncelikle düğüm noktası davranışının anlaşılmasında kritik öneme sahip olan bulonlu birleşimler üzerine çalışılacaktır. Bulonlu birleşimlerde bulon çapı ile bulon deliği çapı arasındaki mesafe değiştirilerek toplam 27 sonlu eleman modeli oluşturulacaktır. Bu modelerin 3 tanesi literatürden [51] alınmış deneysel çalışma ile kalibre edilecektir. Bu çalışmalarla elde veriler ve sonlu eleman modelleme teknikleri alın levhalı birleşimler için kullanılacaktır. Alın levhalı modellerde 4 ayrı birleşim oluşturularak elde edilen sonuçlar maksimum kuvvet taşıma kapasiteleri, moment dönme eğrilikleri, enerji tüketme kapasiteleri, birleşimlerin rijitlikleri ve bulonlara gelen kuvvetler olarak farklı özellikleri incelenerek genel sonuçlara varılacaktır.

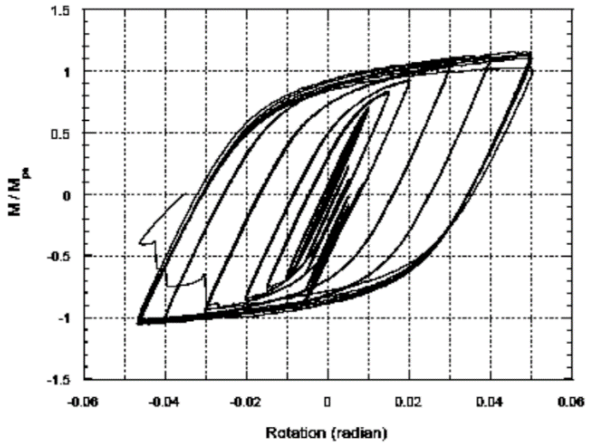
BÖLÜM 2

MOMENT AKTARAN KOLON KİRİŞ BİRLEŞİMLERİ

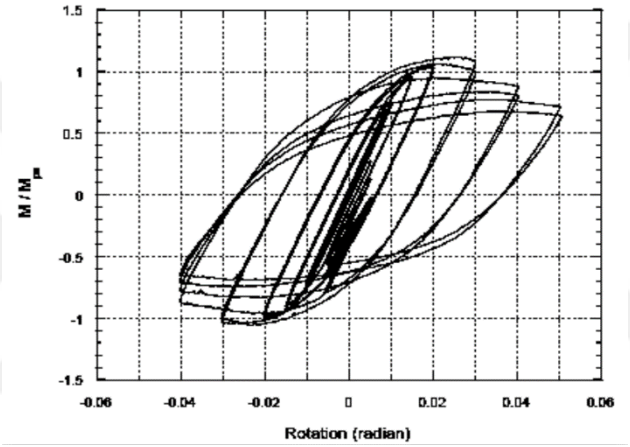
Yapı şartnamelerinin sismik koşullarının temel amacı, büyük zarar görse bile tamamen göçmeyecek yapılar tasarlamaktır. Bunu başarmak için yapı sistemlerini, malzemeleri ve detayları yapı sünek davranışını sağlayacak şekilde oluşturmak modern şartnamelerin ana koşulları olmuştur. Sünek yapı, önemli ölçüde dayanım kaybetmeksizin büyük plastik şekildeğiştirme yapabilen ve bu esnada göçmeyen veya stabilitesini kaybetmeyen yapıdır [50]. Çelik yapılarda kolon-kiriş bağlantılarında moment aktaran birleşimler, kirişlerin kolonlara rijit bir şekilde bağlandığı birleşimler olarak tanımlanabilir. Rijit bir düğüm noktasında kesişen elemanların eksenleri arasında yerel bir dönmenin olmadığı yani kolon ile kiriş arasındaki açının değişmediği varsayılmaktadır. Dolayısıyla rijit birleşimlerde, yani moment aktaran birleşimlerde, eğilme momenti, elemanlara eğilme rijitlikleri oranında dağılmaktadır. Birleşimlerin tasarımı da bu iki kabul, yani moment aktaran veya aktarmayan birleşimler, ile yapılmaktadır. Son yıllarda yoğun bir şekilde yapılan çalışmalar doğrultusunda birleşimlerin moment aktaran veya aktarmayan olarak tanımlanmasının doğru olmadığı vurgulanarak, bunun yerine rijit ve mafsallı davranış arasında davranışları olduğu ortaya konmuştur. Yarı-rijit olarak tanımlanan bu birleşim sınıfı kirişlerin kolonlara moment aktardığı fakat aynı zamanda bu birleşimlerde yerel dönmelerin de oluştuğu varsayılmaktadır [52]. Birleşimlerin rijitliğinin değerlendirilmesi için Eurocode 3 [21], bileşen yöntemini önermektedir. Bileşen yöntemi düğüm noktasındaki tüm lokal elemanların dayanım ve rijitliklerinin çeşitli tesirler altında tek tek ele alınarak düğüm noktasının genel rijitliğini belirlenmesi esasına dayanır.

1994 Northridge Depreminden sonra, rijit çelik çerçeve kiriş-kolon birleşimlerinin beklenen performansın çok altında deprem davranışı gösterdikleri için FEMA-SAC projesi gerçekleştirilmiş olup, süneklik düzeylerinin yeterli olduğu ıspatlanmış birleşim tipleri önerilmiştir. Türk Yönetmeliklerince [53,54] de kabul edilmiş bu birleşimlerin 1. ve 2. Derece deprem bölgelerinde kullanılması deprem yüklerine maruz çelik yapıların sünek davranışı açısından gereklidir. Öte yandan belirlenmiş birleşim tipleri dışında birleşimler kullanılacaksa da bu birleşim tiplerinin dönme kapasiteleri mutlaka deneylerle ispatlanması gerekmektedir. Ayrıca 1. ve 2. Derece deprem bölgelerinde yarı-rijit birleşimler genellikle tercih edilmemektedir[54].

Moment aktaran birleşimlerde sünekliği etkileyen diğer önemli bir nokta ise birleşimlerin panel bölgeleridir. Birleşimin panel bölgesi kolon ile kirişin birleştiği bölgedeki kolon gövdesidir. Sünek tasarımda yapının göçmeye ulaşmadan yeterince enerji tüketilebilmesi için plastik mafsalların kirişlerde oluşturulması gerekmektedir. Belirtilmiş olan birleşim tipleri sayesinde plastik mafsalın oluşacağı yer kontrol altında tutularak yapıda tamemen göçme mekanizmalarının önüne geçilmektedir. Bu amaçla panel bölgesindeki akma veya buruşmaların önüne geçebilmek için tüm birleşimlerin panel bölgelerinde kiriş başlığı hizalarında kolon başlıklarını birbirine bağlayan berkitme levhaları bulunmaktadır. Ayrıca gerekli durumlarda ilave levhalar yardımıyla kolon gövde bölgesi kalınlaştırarak panel bölgesinin yeterli dayanım ve rijitliğinin sağlanması gereklidir. Bununla beraber panel bölgesinin plastikleşme gösterecek kirişte dengeli akma mekanizmasına maksimum katkısı olması için buruşma etkilerini önleyecek yeterli takviyeden fazlasının birleşimin dönme kapasitesini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu noktada tam rijitleştirilmiş panel bölgeli birleşim ile yeterli derecede dayanıma sahip panel bölgelerinde yapılan araştırmalardan elde edilen moment-dönme grafikleri Şekil 2.1 ve Şekil 2.2 ‘de gösterilmektedir. Çevrimsel grafiğin altında kalan alanlar kıyaslandığında gereğinden fazla rijitleştirilmiş panel bölgeli birleşimlerin diğerlerine oranla daha az sünek oldukları belirlenmiştir[55]. Bu bağlamda FEMA/SAC tarafından birleşimin yeterli sünekliğinin minimum 0,03 radyan deformasyon açısı yapabilme kapasitesi olarak öngörülmüştür.



Şekil 2. 1 Yeterli Dayanımlı Panel Bölgeleri Moment-Dönme Grafiği [55]

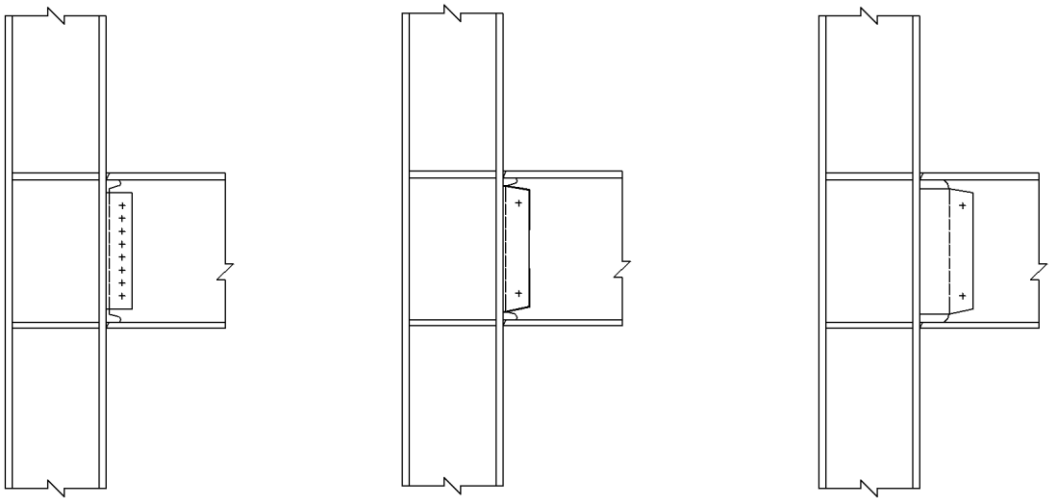


Şekil 2. 2 Rijit Panel Bölgeleri için Çevrimsel Moment-Dönme Grafiği[55]

2.1 Moment Aktaran Kolon-Kiriş Birleşim Tipleri

Northridge 1994 ve Kobe 1995 depremlerinde çelik yapılarda görülen hasarlar birleşimlerin yeterli sünekliğe sahip olmadığını gösterdi[50]. Bu durumu araştırmak amacıyla FEMA-SAC projesi oluşturuldu. Bu proje kapsamında sünekliği ispatlanmış bazı kolon kiriş birleşim tipleri önerildi. Bu tipler dünya üzerindeki şartnameleri de etkileyerek kabul gördü. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar [53] da önerilmiş olan bu tipler dışındaki kolon kiriş birleşim tipleri kullanıldığında, kullanılan birleşimlerin yeterli dönme kapasitesine sahip olduğu deneylerle ispatlanması gerektiği belirtilmiştir. FEMA 350 kapsamında önerilen moment aktaran kolon-kiriş tipleri şunlardır:

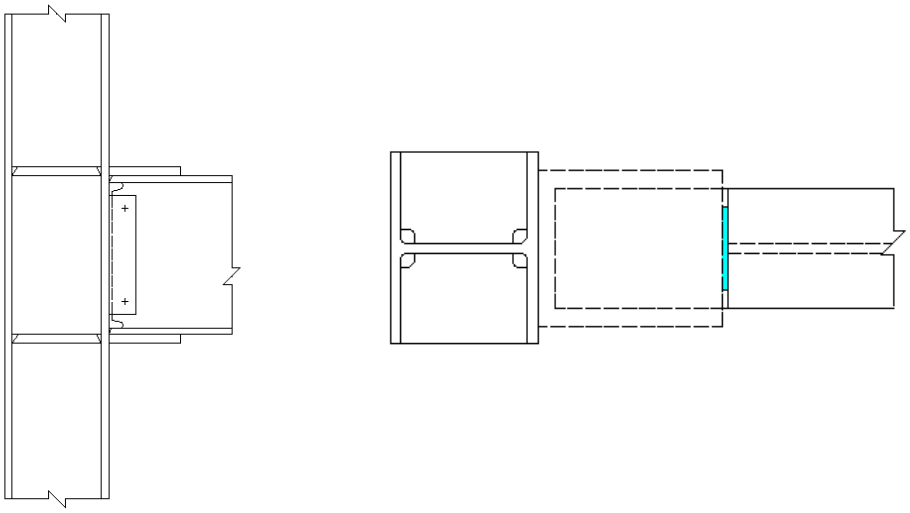
Kaynaklı Birleşimler: Kirişin alt ve üst başlığı kolonun başlığına dik gelerek, FEMA 353 [56]' teki şartları karşılayacak olan kaynaklı birleşimlerin iki tipi mevcuttur. Kayma levhası kiriş gövdesine bulon ile bağlandığında (WUF-B) bulonlu gövde kaynaklı başlık birleşim tipi olarak adlandırılır. Bu birleşim tipi şekil 2.3.a' de gösterilmektedir. Kayma levhasının kaynakla teşkil edildiği durum (WUF-W) ise şekil 2.3.b' de gösterilmektedir. Daha büyük kiriş derinliklerinde serbest başlıklı birleşim tipi (FF) kullanılmakta olup kiriş gövdesinin kayma levhasına kaynakla bağlandığı birleşim tipine benzer bir birleşimdir. Şekil 2.3.c'de gösterilmektdir. Bu tip birleşimlerde kolon başlıkları arasında berkitme levhaları da kullanılmaktadır.



a) Bulonlu Kayma Levhası b) Kaynaklı Kayma Levhası c) Serbest Başlıklı

Şekil 2. 3 Kaynaklı Birleşim Tipleri

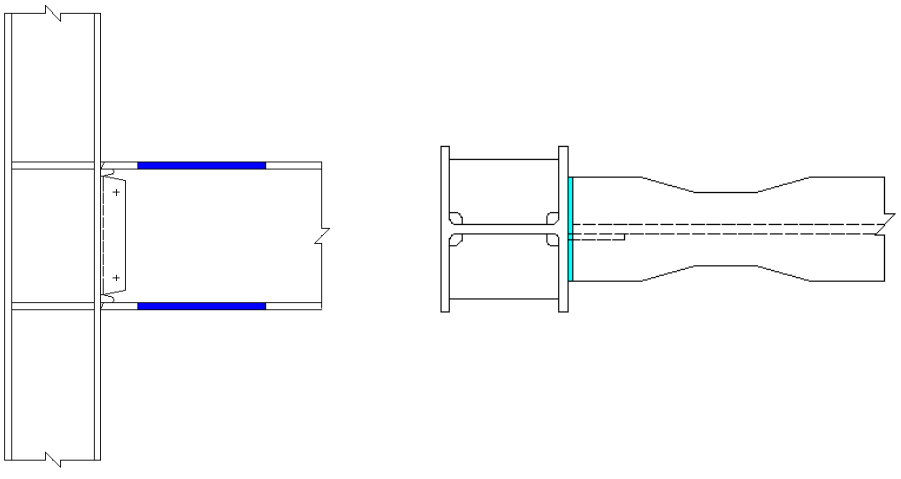
Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşimler: Başlık levhalı kaynaklı birleşim tiplerinde (WFP) kiriş başlıkları kolon başlığına dik şekilde kaynaklanmış plakaya oturacak şekilde kaynaklanmaktadır. Kiriş başlığı kolon başlığına temas etmeyecek şekilde teşkil edilir. Başlık levhası kolona kaynaklanır. Başlık levhaları kiriş başlıklarına köşe kaynak ile birleştirilir. Bu birleşim tipine dair detaylar Şekil 2.4.a ve Şekil 2.4.b' de gösterilmektedir. Kaynaklı birleşimlere benzer şekilde kolon başlıkları arasıda kiriş başlıklarını hizalayacak şekide berkitme levhaları bulunmaktdır.



a) Birleşimin Yan Görünüşü b) Birleşimin Üst Görünüşü

Şekil 2. 4 Başlık Levhalı Kaynaklı Birleşim Tipi

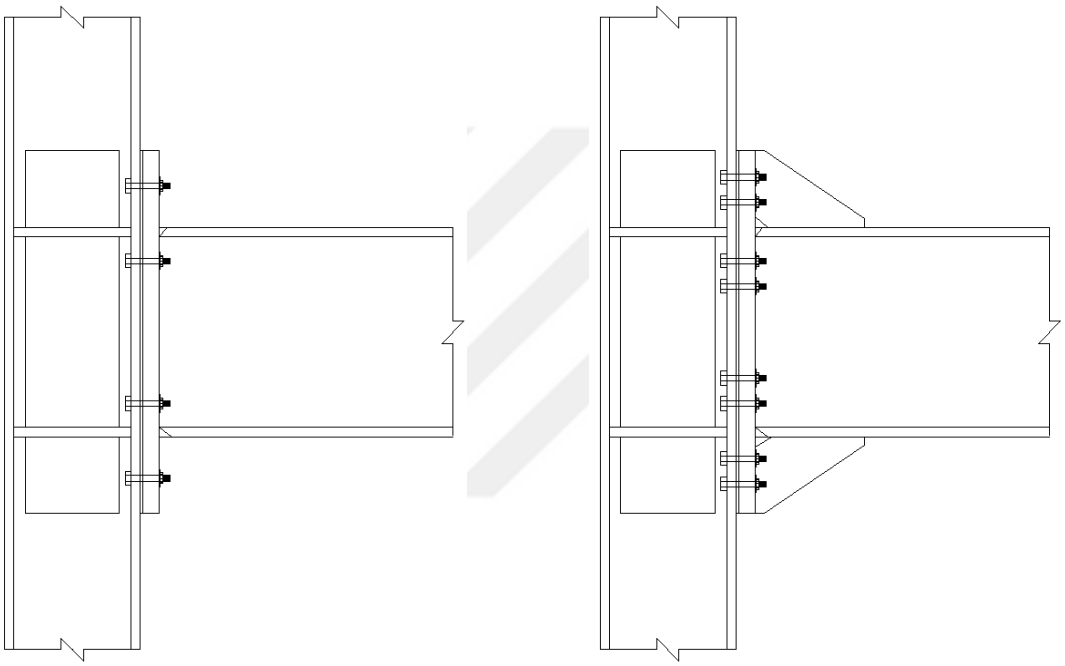
Azaltılmış Kesitli Kolon Kiriş Birleşim Tipi: Kayma levhası kaynaklı olan kaynaklı birleşim tipine benzer şekildedir. Azaltılmış kesitli birleşim tipinin (RBS), kaynaklı birleşim tipinden farkı kirişin eğilme davranışında plastik mafsalın oluşacağı bölgeyi tayin edebilmek amacıyla bu bölgede kesiti azaltılmıştır. Diğer birleşim tipleriyle aynı kaynak tipleri kullanılmaktadır. Diğer birleşimlerde olduğu gibi kolon berkitme levhaları da kullanılmaktadır. Bu birleşim tipine ait detaylar Şekil 2.5.a ve Şekil 2.5.b' de gösterilmektedir.



a) Birleşimin Yan Görünüşü b) Birleşimin Üst Görünüşü

Şekil 2. 5 Azaltılmış Kesitli Kiriş Birleşim Tipi

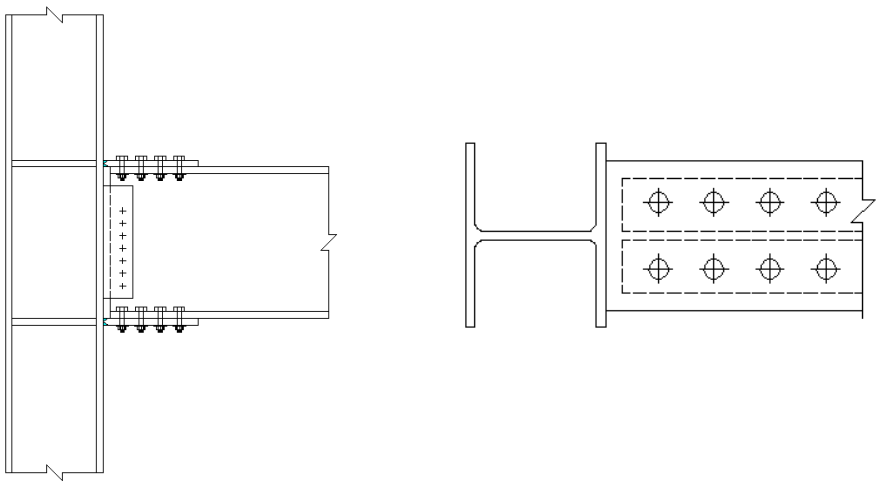
Alın Levhalı Birleşim Tipi: Takviyesiz alın levhalı birleşim tipi (BUEP) kirişin alın levhasına kaynakla birleştirlip, alın levhasının kolon başlığına 8 adet bulon vasıtasıyla bağlandığı kolon kiriş birleşim tipidir. Kolon başlıklarına kirişin başlıklarının hizasına gelecek şekilde süreklilik plakaları teşkil edilir. Kolonun gövdesinde panel bölgesini güçlendirecek şekilde takviye plakalar bulunur. En yaygın kullanılan bulonlu birleşim tiplerindendir. Şekil 2.6.a' da gösterilmektedir. Takviyeli alın levhalı birleşim tipi (BSEP) ise takviyesiz alın levhalı birleşim tipinin 16 bulonla kolon başlığına birleştirilerek, alın levhasında takviye ile güçlendirildiği birleşim tipidir. Şekil 2.6.b' de gösterilmektedir.



a)Takviyesiz Alın Levhalı Birleşim Tipi b) Takviye Alın Levhalı Birleşim Tipi

Şekil 2. 6 Alın Levhalı Birleşim Tipleri

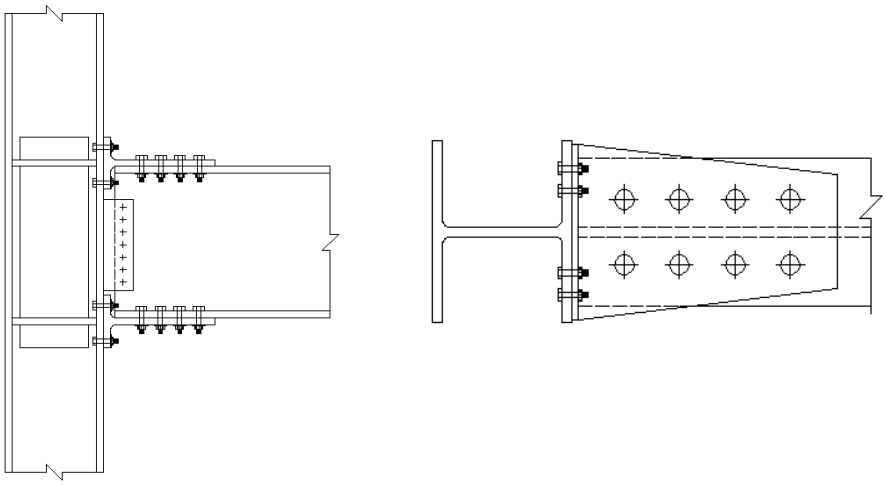
Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipi: Bulonlu başlık levhalı birleşim tipi (BFP) kolon başlıklarına dik bir şekilde kaynaklanmış plakalara kiriş başlıklarını mesnetleyecek şekilde teşkil edilmiş levhalardan oluşan birleşim tipidir. Kiriş başlıkları ile plaka birbirlerine bulonlar yardımıyla bağlanır. Tüm birleşim tiplerinde olduğu gibi kolon süreklilik plakaları mevcuttur. İhtiyaç duyulduğundan kolon panel bölgesi takviye plakalarla güçlendirilir. Kiriş kolon başlığına temas etmeyecek şekilde teşkil yapılır. Bu birleşim tipi Şekil 2.7' te gösterilmiştir.



a) Birleşimin Yan Görünüşü b) Birleşimin Üst Görünüşü

Şekil 2. 7 Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipleri

T Kesitli Birleşim Tipi: T kesitli birleşim tipinde (DST) kiriş T kesitli bir elemana bulonlar vasıtasıyla birleştirilir. T kesitinin dik kısmı ise yine bulonlarla kolon başlığına teşkil edilir. Bu işlem kirişin hem üst başlığı hem de alt başlığı için yapılır. Kiriş gövdesinde kayma levhası ile kolon başlığına kaynakla birleşim sağlanır. Kolon panel bölgesinde ve başlıklarında berkitme plakaları bulunur. Şekil 2.8.a ve Şekil 2.8.b' de T kesitli birleşim tipi detayları gösterilmektedir.



a) Birleşimin Yan Görünüşü b) Birleşimin Üst Görünüşü

Şekil 2. 8 Bulonlu Başlık Levhalı Birleşim Tipleri

Bu çalışmada kısaca açıklanmış olan moment aktaran kolon kiriş birleşim tiplerinden alın levhalı birleşim tipi incelenecektir.

2.2 Alın Levhalı Birleşimlerde Çeşitli Göçme Mekanizmaları

Alın levhalı birleşimlerin çevrimsel yükleme altında göçmesine sebep olabilecek mekanizmalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir [57]:

- Alın levhasında eğilmeden dolayı akma meydana geldiğinde çekme kuvvetine maruz kalan bulonlardan dolayı aşırı dönme meydana gelir. Bu durumda bulonlar ilave gerilmelere maruz kalırlar.
- Alın levhasında kayma gerilmelerinin oluşması yalnız başına gözlenmemekle birlikte eğilme ile beraber ortaya çıktığında alın levhasını eğilme kapasitesini azaltır.
- Manivela etkileriyle bulonlarda kopma gevrek kırılma mekanizması oluşturur. Alın levhalı birleşimler için en kritik göçme mekanizmasıdır.
- Alın levhasının bulon deliklerindeki kaymadan dolayı yırtılması.
- Bulonlar alın levhası ile kolon başlığını birbirine bağladığı için kesme kuvvetlerine maruz kalırlar. Kayma gerilmelerinden kaynaklanan kopma mekanizmaları oluşur.
- Bulonlar kolon başlığında veya alın levhasında taşıma gücü kaybına sebep olabilir.
- Kirişin çekme bölgesindeki başlığı veya gövdesi ile alın levhası arasıdaki kaynaklarda kırılmalar oluşabilir.
- Kiriş gövdesi ile alın levhası arasında kayma gerilmelerinden dolayı akma oluşabilir.
- Birleşen kirişin basınç veya çekmeye maruz kalan başlıklarının aksi bölgesinde kolon gövdesinde akma oluşabilir.
- Kirişin basınca maruz kalan başlığının tersi yönde kolon gövdesinde burkulma meydana gelebilir.

- Kolon başlığında çekmeye maruz kalan bulonların bulunduğu bölgede akma oluşabilir. Bu durum göçme mekanizmasını doğrudan etkilememesine rağmen bulonlarda ilave gerilmelere ve aşırı dönmelere sebep olabilir.
- Kolon gövdesindeki takviye levhada akma, burkulma veya kaynaklarında kırılma oluşabilir.
- Kolon başlıklarındaki berkitmeler akma veya kaynaklarında kırılma oluşabilir.
- Birleşimde eğilmeden dolayı aşırı dönmeler ortaya çıkabilir.
- Kolon gövdesinde burkulmadan dolayı panel bölgesi göçmesi gerçekleşebilir.

2.3 Alın Levhalı Birleşimlerin Tasarımı

Bu bölümde AISC 358-10 [58] ve FEMA 350 [50] şartnamelerindeki tasarım kriterleri belirtilecektir. Yürürlüğe girmiş olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği[54]'nde alın levhalı birleşim için gerekli şartlar da AISC 358-10[58]' da bulunan şartların özet halidir.

2.3.1 FEMA 350

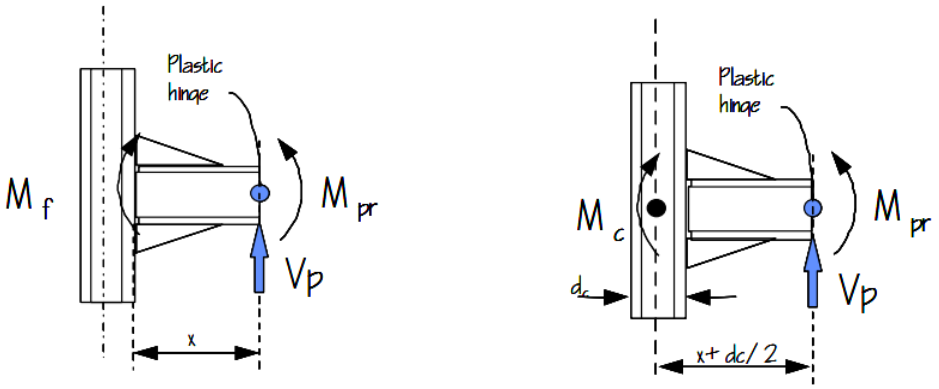
Alın levhalı birleşimler FEMA 350 [50] ' de takviyesiz (BUEP) ve takviyeli (BSEP) olmak üzere 2 şekilde tasarım kriterleri mevcuttur.

Takviyesiz Alın Levhalı Birleşimler: Bu birleşim tipi yüksek sünek ve normal sünek çerçevelere uygulanabilir. Yüksek sünek çerçevelerde açıklığın derinliğe oranı minimum 7, nomal sünek çerçevelerde ise bu oran 5 olduğunda uygundur. Bulonlara öngerilme uygulanması zorunludur. Başlık kaynaklarında kaynak ulaşım deliğine izin verilmez.

1. Adım: Şekil 2.9.a ve Şekil 2.9.b'de gösterilen Mf ve Mc hesaplanır. Mf, kirişe gelen yüklerden dolayı kiriş yüzünde, Mc ise kolon gövdesinde ortaya çıkan momentlerdir.

$$M_f = M_{pr} + V_p x \tag{2.1}$$

$$M_c = M_{pr} + V_p \left(x + \frac{d_c}{2} \right) \tag{2.2}$$



a) Kirişte oluşan Mf momenti b) Kirişte oluşan Mc momenti

Şekil 2. 9 FEMA 350' de belirtilen M_f ve M_c momentleri [50]

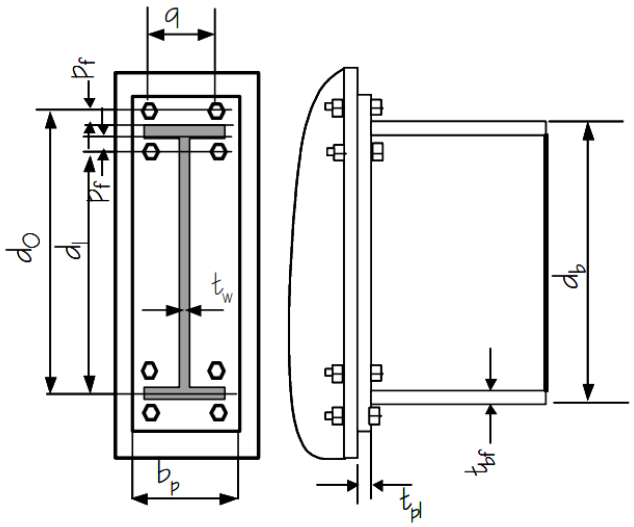
2. Adım: Denklem 2.3 çözülerek alın levhasında kullanılacak bulon çapı belirlenir. Bulon tipi seçilir.

$$M_f < 2T_{ub}(d_0 + d_i) \quad (2.3)$$

$T_{ub} = 90A_{bolt}\ (A325\ bulonları)$

$T_{ub} = 113A_{bolt}\ (A490\ bulonları)$

d_0 ve d_1 Şekil 2.10' da gösterilmektedir.



Şekil 2. 10 FEMA 350' de belirtilen d_0 ve d_1 mesafeleri [50]

3. Adım: Seçilen bulon çapının kesmeden göçmesini önleyecek yeterli alana Ab sahip olduğunun kontrolü yapılır.

$$A_b \geq \frac{\frac{2M_f}{L-d_c}+V_g}{3F_v} \tag{2.4}$$

4. Adım: Eğilmede akma durumu için minimum alın levhası kalınlığı tp belirlenir.
Alın levhası S235jr sınıfı çelik olmalıdır.

$$t_p = \sqrt{\frac{M_f}{0{,}8F_{yp}\left\{(d_b-p_t)\left[\frac{b_p}{2}\left(\frac{1}{p_f}+\frac{1}{s}\right)+(p_f+s)\frac{2}{g}\right]+\frac{b_p}{2}\left(\frac{d_b}{p_f}+\frac{1}{2}\right)\right\}}} \tag{2.5}$$

$$s = \sqrt{(b_p g)}$$

g= Şekil 2.10' da q ile gösterilen mesafe

5. Adım: Alın levhasının kaymada göçmesini önleyecek alın levhası kalınlığı belirlenir.

$$t_p = \frac{M_f}{1{,}1F_{yp}b_p(d_b-t_{bf})} \tag{2.6}$$

6. Adım: Çekme bölgesindeki kiriş başlığının eğilme etkilerini karşılayacak kolon başlığı kalınlığı belirlenir.

$$t_{fc} = \sqrt{\frac{M_f}{\frac{d_b-t_{fb}}{2}\left(\frac{g}{2}-k_1\right)}} \tag{2.7}$$

k_1= AISC'de tanımlanmış olan kolon gövdesinin başladığı yer ile kolon başlığının bitimiyle arasındaki en kısa mesafe.

Eğer kolon başlık kalınlığı hesaplanan gerekli kalınlıktan az ise süreklilik levhaları gerekir. Bu levhaların kalınlığı t_{cf} denklem 2.8 ile hesaplanır.

$$t_{cf} < 0{,}4\sqrt{1{,}8b_f t_f \frac{F_{yb}R_{yb}}{F_{yc}R_{yc}}} \tag{2.8}$$

$$t_{cf} < \frac{b_f}{6} \tag{2.9}$$

Burada;

tcf= Berkitme yapılmadığı durum için minimum kolon başlığı kalınlığı, inç

bf= Kiriş başlık genişliği, inç

tf=kiriş başlık kalınlığı, inç

Fyb (Fyc)= Kirişin veya kolonun minimum akma gerilmesi, ksi

Ryb (Ryc)=AISC 341-10' da belirlenmiş olan, kiriş veya kolonun beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranı.

Yukarıdaki tahkikler sonucunda süreklilik plakaları gerekli olursa plaka kalınlıkları şu şekilde belirlenir:

Kolona tek taraflı bağlanan birleşimlerde, kiriş başlık kalınlıklarının toplamının en az yarısı kadar olmalıdır.

Kolona iki taraflı bağlanan birleşimlerde, süreklilik plaka kalınlıkları en az, birleşimdeki kiriş başlık kalınlıklarından en fazla olanı kadar olmalıdır.

Süreklilik plakaları AISC-LRFD bölüm K1.9 'daki şartları da sağlamalıdır.

7. Adım: Eğer süreklilik plakaları gerekliyse kolon başlık kalınlıkları şu ilave şartı da sağlamalıdır.

$$t_{fc} > \sqrt{\frac{M_f}{\frac{2\left(d_b - t_{fb}\right)}{0{,}8\, F_{yc} Y_c}}} \tag{2.10}$$

$$Y_c = \left(\frac{c}{2} + s\right)\left(\frac{1}{C_2} + \frac{2}{C_1}\right) + (C_2 + C_1)\left(\frac{4}{c} + \frac{2}{s}\right) \tag{2.11}$$

$$C_1 = \frac{g}{2} - k_1$$

$$C_2 = \frac{b_{fc} - g}{2}$$

$$s = \sqrt{\left\{\frac{C_1 C_2}{C_2 + 2C_1}\left(2b_{fc} 4k_1\right)\right\}}$$

t_c değeri hesaplanan değerden daha az ise, kolon başlığı daha kalın seçilmelidir.

8. Adım: Kirişin basınç başlığının kısımdaki kolon başlık kalınlığının kontrolü:

$$t_{fc} > \frac{M_f}{\left(d_b - t_{fb}\right)\left(6k + 2t_{pl} + t_{bf}\right)F_{yc}} \qquad (2.12)$$

Eğer yukarıdaki şart sağlanmazsa kiriş berkitme plakaları gereklidir. Bu plakaların kalınlıkları kolonlarda berkitme plakalarının hesaplandığı şekilde hesaplanır.

9. Adım: Panel bölgesindeki kesme kapasitesi hesaplanır.

$$t = \frac{C_y M_c \frac{h - d_b}{h}}{(0{,}9)0{,}6F_{yc}R_{yc}d_c\left(d_b - t_{fb}\right)} \qquad (2.13)$$

h = Panel bölgesinin alt ve üstündeki ortalama kat yüksekliği

R_{yc} =1997 AISC sismic provisions' da belirlenmiş olan, kiriş veya kolonun beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranı.

Eğer hesaplanan t değeri kolon gövde kalınlığından fazla ise, panel bölgesinin ilave plakalarla kalınlaştırılması veya kolon kesitinin uygun gövde kalınlığını sağlayacak şekilde artırılması gerekir.

Takviyeli Alın Levhalı Birleşimler: Takviyesiz alın levhalı birleşimlerde olduğu gibi takviyeli alın levhalı birleşimlerde de yüksek sünek ve normal sünek çerçevelere uygulanabilir. Yüksek sünek çerçevelerde açıklığın derinliğe oranı minimum 7, nomal sünek çerçevelerde ise bu oran 5 olduğunda uygundur. Bulonlara öngerilme uygulanması zorunludur. Başlık kaynaklarında kaynak ulaşım deliğine izin verilmez.

Takviyeli alın levhalı birleşimler kiriş eğilmesinden kaynaklanan akmaya göre tasarlanması gerekir.

1. Adım: M_f ve M_c momentleri hesaplanır.

$$M_f = M_{pr} + V_p x \tag{2.14}$$

$$M_c = M_{pr} + V_p \left(x + \frac{d_c}{2} \right) \tag{2.15}$$

Bağıntılardaki değişkenler Şekil 2.9.a ve Şekil 2.9.b' de gösterilmektedir.

2. Adım: Denklem 2.3 çözülerek alın levhasında kullanılacak bulon çapı belirlenir. Bulon tipi seçilir.

$$M_f < 3{,}4 T_{ub} (d_0 + d_i) \tag{2.16}$$

$T_{ub} = 90 A_{bolt}$ $(A325\ bulonları)$

$T_{ub} = 113 A_{bolt}$ $(A490\ bulonları)$

d_0 ve d_1 Şekil 2.10' da gösterilmektedir.

Ayrıca T_{ub}' nin aşağıdaki bağıntıyı sağladığı gösterilmelidir.

$$T_{ub} \geq \frac{0{,}00002305\ p_f^{0{,}591} \left(F_{fu}\right)^{2{,}583}}{t_p^{0{,}895} d_{bt}^{1{,}909} t_s^{0{,}327} b_p^{0{,}965}} + T_b \tag{2.17}$$

T_b minimum bulon öngerilmesidir. (AISC-LRFD Tablo J3.1)

3. Adım: Seçilen bulon çapının kesmeden göçmesini önleyecek yeterli alana A_b sahip olduğunun kontrolü yapılır.

$$A_b \geq \frac{\frac{2M_f}{L - d_c} + V_g}{6F_v} \tag{2.18}$$

4. Adım: Alın levhasının eğilmede akmasını engelleyecek kalınlık için Denklem 2.19 ve Denklem 2.20'den büyük olanı seçilir.

$$t_p \geq \frac{0{,}00609 p_f^{0,9} g^{0,6} F_{fu}^{0,9}}{d_{bt}^{0,9} t_s^{0,1} b_p^{0,7}} \quad (2.19)$$

$$t_p \geq \frac{0{,}00413 p_f^{0,25} g^{0,15} F_{fu}}{d_{bt}^{0,7} t_s^{0,15} b_p^{0,3}} \quad (2.20)$$

$$F_{fu} = \frac{M_f}{d_b - t_{bf}}$$

Alın levhası ASTM A36 sınıfı çelik olmalıdır ayrıca bayrak levhası kalınlığı en az kirişin gövde kalınlığı kadar olmalıdır.

5. Adım: Kirişin çekme bölgesinde yeterli dayanımı sağlayan kolon başlık kalınlıkları Denklem 2.21 ile belirlenir.

$$t_{cf} > \sqrt{\left(\frac{a_m \, F_{fu} \, (C_3)}{0{,}9 \, F_{yc}(3{,}5 p_b + c)}\right)} \quad (2.21)$$

$$a_m = C_a \left(\frac{A_f}{A_w}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{C_3}{(d_{bt})^{\frac{1}{4}}} \quad (2.22)$$

$$C_3 = \frac{g}{2} - \frac{d_{bt}}{4} - k_1$$

A325 bulonları için C_a=1,45, A490 bulonları için ise C_a=1,48. Alın levhaları için A36 sınıfı çelik kullanılmalıdır.

Kolon başlıkları gereken kalınlıklardan daha inceyse Denklem 2.8'de belirtilen şartların sağlanması gerekmektedir.

6. Adım: Kiriş basınç bölgesindeki kolon başlıkları Denklem 2.23'ü sağlaması gerekmektedir.

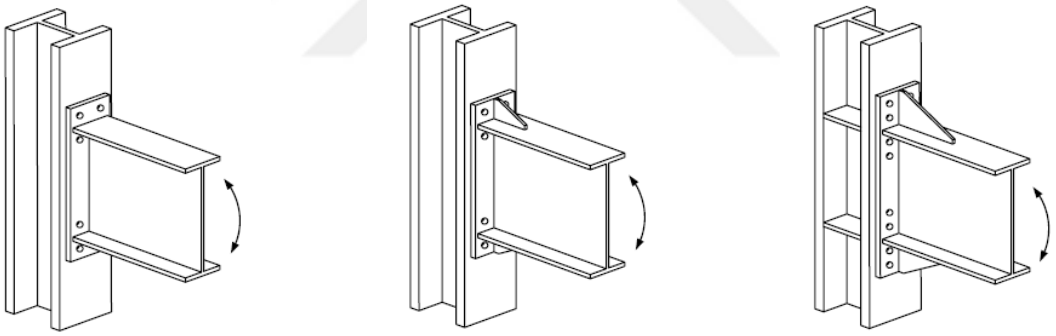
$$t_{wc} = \frac{M_f}{(d_b - t_{fb})(6k + 2t_p + t_{fb}) F_{yc}} \quad (2.23)$$

Kolon başlıkları gereken kalınlıklardan daha inceyse Denklem 2.8'de belirtilen şartların sağlanması gerekmektedir.

7. Adım: Kolonda süreklilik levhaları gerektiği durumlarda kolon başlık kalınlıkları en az 4. Adımda hesaplanan alın levhası kalınlıkları kadar olmalıdır.
8. Panel bölgesindeki kayma gerilmeleri kontrolü takviyesiz alın levhalı birleşimlerindeki gibi yapılır [59]

2.3.2 AISC 358-10

AISC 358-10 [58]a alın levhalı birleşimler 3 tip olarak verilmektedir. Şekil 2.11.a, Şekil 2.11.b ve Şekil 2.11.c' de bu birleşimler gösterilmektedir. Genişletilmiş alın levhalı moment aktaran birleşimler süneklik düzeyi yüksek ve süneklik düzeyi sınırlı birleşimlerde kullanılabilir. Ancak betonarme döşemeli süneklik düzeyi yüksek çerçeveler şu koşulları sağlamalıdırlar.



a) 4-Bulonlu Takviyesiz, 4E b) 4-Bulonlu Takviyeli, 4ES c) 8-Bulonlu Takviyeli, 8ES

Şekil 2. 11 AISC 358-10 [58]'da belirtilen alın levhalı birleşim tipleri

- Çizelge 2.1' de belirtilen geometrik kısıtlamalar dışında kirişin nominal derinliği 24 in (610 mm)' den daha az olmamalıdır.
- Kolon başlığının yüzünden itibaren kiriş derinliğinin 1,5 katı kadar mesafede kayma levhaları kullanılmamalıdır.
- Betonarme döşeme kolon başlıklarından en az 25 mm uzağında bitirilmelidir. Bu boşluklara sıkışabilen malzeme konulabilir.

Çizelge 2. 1 AISC 358-10' da alın levhalı birleşimler için geometrik ön koşullar

Alın Levhalı Birleşimlerde Geometrik Şartlar						
	Dört bulonlu takviyesiz (4E)		**Dört bulonlu takviyeli (4ES)**		**Sekiz bulonlu takviyeli (8ES)**	
Parametre	Maksimum in.(mm)	Minimum in. (mm)	Maksimum in.(mm)	Minimum in. (mm)	Maksimum in.(mm)	Minimum in. (mm)
t_{bf}	3/4 (19)	3/8 (10)	3/4 (19)	3/8 (10)	1 (25)	9/16 (14)
b_{bf}	9 1/4 (235)	6 (152)	9 (229)	6 (152)	12 1/4 (311)	7 1/2 (190)
D	55 (1400)	13 3/4(349)	24(610)	13 3/4(349)	36(914)	18(457)
t_p	2 1/4 (57)	1/2 (13)	1 1/2 (38)	1/2 (13)	2 1/2 (64)	3/4 (19)
b_p	10 3/4 (237)	7(178)	10 3/4 (273)	7(178)	15(381)	9(229)
G	6 (152)	4(102)	6(152)	3 1/4(83)	6(152)	5(127)
p_{fi},p_{fo}	4 1/2 (114)	1 1/2 (38)	5 1/2(140)	1 3/4 (44)	2(51)	1 5/8(41)
p_b	-	-	-	-	3 3/4(95)	3 1/2(89)

b_{bf} = Kiriş başlık genişliği in ,(mm)
bp = Alın levhasının genişliği in, (mm)
d = Kiriş derinliği in, (mm)
g= Bulonlar arasındaki yatay mesafe in,(mm)
P_b = 8ES birleşim tipi için iç ve dış bulon sıraları arasındaki düşey mesafe in, (mm)
P_{fi} = Kiriş çekme başlığının iç kısmının en yakın bulona düşey mesafesi in, (mm)
t_{bf} = Kiriş başlığının kalınlığı in, (mm)
P_{fo} = Kiriş çekme başlığının dış kısmının en yakın bulona düşey mesafesi in, (mm)
t_p =Alın levhası kalınlığı in, (mm)

Kiriş temiz açıklıklarının kiriş derinliğine oranları yüksek sünek çerçevelerde 7, sınırlı sünek çerçevelerde ise 5 değerlerini sağlamalı veya üzerinde olmalıdır. Takviyesiz alın levhalı birleşimlerde, kolon yüzüyle kiriş açıklığı arasında, kolon yüzünden itibaren kiriş derinliği kadar veya başlık genişliğinin 3 katı kadar mesafe (hangisi daha az ise) korunan bölge olarak tanzim edilecektir. Takviyeli alın levhalı birleşimlerde ise bu bölge kiriş derinliğinin 1,5 katı veya kiriş başlığının 3 katı kadar mesafede (hangisi daha az ise) hazırlanacaktır. Alın levhasının genişliği en az kiriş başlığı genişliği kadar olmalıdır. Ayrıca alın levhası genişliği kiriş başlığından en fazla 25 mm daha geniş olabilir.

Takviyeli birleşimlerde bayrak levhaları (rijitlik levhaları) kiriş eksenine paralel yöndeki uzunluğu Denklem 2.24 'de elde edilen değerden az olmamalıdır.

$$L_{st} = \frac{h_{st}}{\tan 30^0} \qquad (2.24)$$

Denklem 2.24' te belirtilen h_{st} alın levhası takviyesi yüksekliğidir. Bu tip birleşimlerde kaynak ulaşım delikleri bulunmamalıdır. Korunan bölge kısıtlamaları dışında kolon yüzünden kiriş derinliğinin yarısı kadar mesafe boyunca kiriş başlıklarına stud çivisi uygulaması yapılmamalıdır. Tasarım adımları:

1. Adım: Birleştirilecek elemanların kesitleri belirlenir (kolon-kiriş kesitleri). Kolon yüzündeki moment belirlenir, $M_{f.}$

$$M_f = M_{pr} + V_u S_h \quad (2.25)$$

M_{pr}= Plastik mafsal bölgesindeki olası en büyük moment,

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y Z_x \quad (2.26)$$

$$V_u = \frac{2M_{pe}}{L'} + V_{gravity} \quad (2.27)$$

S_h= Kolon yüzünden plastik mafsalın oluştuğu bölgeye mesafe. Bu değer takviyesiz alın levhalı birleşimlerde d/2 veya $3b_{bf}$ değerlerinden az olanıdır. 8E ve 8ES birleşimlerinde ise bu değer $L_{st} + t_p$ 'dir.

R_y=Beklenen akma gerilmesinin minimum akma gerilmesine oranı

d= Kirişin derinliği, in (mm)

b_{bf}= Kiriş başlığının genişliği in, mm

L_{st} =Alın levhası takviyesinin uzunluğu

L'= Plastik mafsallar arasındaki mesafe

$V_{gravity}$= Kirişin kesme kuvveti (1,2D+f_1L+0,2S-kar yüklerinin dökülmediği durumdaki çatılarda 0,2S yerine 0,7S alınmalıdır.)

C_{pr}=Pekleşmeyi içeren katsayı

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1{,}2 \quad (2.28)$$

F_y= Çeliğin minimum akma gerilmesi (MPa)

F_u= Çeliğin minimum kopma mukavemeti (MPa)

V_u= Kirişin ucundaki kesme kuvveti (N)

f_1= 0,5 'den az olmamak koşuluyla belirlenmiş yük katsayısı.

2. Adım: 4E, 8E, 8ES birleşim tiplerinden biri seçilir. Bu seçime göre ön boyutlandırma şartlarına uyacak şekilde boyutlar ve bulon kalitesi belirlenir.

3. Adım: Bulon çapı belirlenir (4E, 4ES):

$$d_{b\ req'd} = \sqrt{\frac{2\ M_f}{\pi \phi_y F_{nt}(h_0 + h_{1)}}} \tag{2.29}$$

8ES birleşimleri için bulon çapı ise:

$$d_{b\ req'd} = \sqrt{\frac{2\ M_f}{\pi \phi_y F_{nt}(h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}} \tag{2.30}$$

F_{nt} = AISC şartnamesince belirlenmiş nominal çekme mukavemeti (MPa)

h_i= Bulon i. sırasının kiriş basınç başlığına olan mesafesi

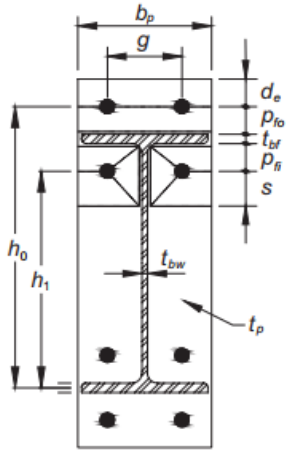
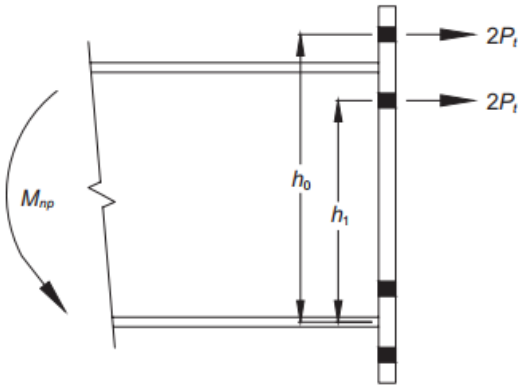
4. Adım: Bulon çapı 3. Adımdaki değerden küçük olmayacak şekilde belirlenir.

5. Adım: Alın levhası kalınlığı belirlenir, $t_{p\ req'd}$.

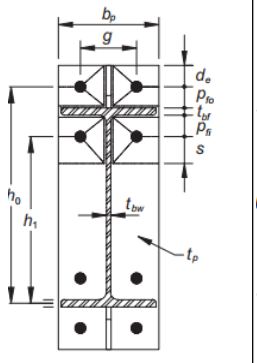
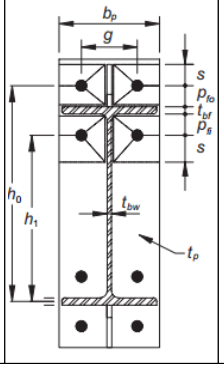
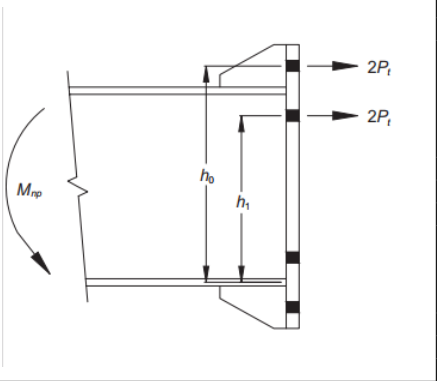
$$t_{p\ req'd} = \sqrt{\frac{1{,}11\ M_f}{\phi_d F_{yp} Y_p}} \tag{2.31}$$

F_{yp}= Alın levhası malzemesinin minimum akma gerilmesi

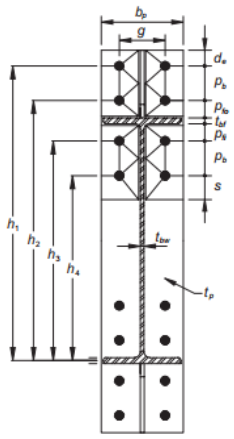
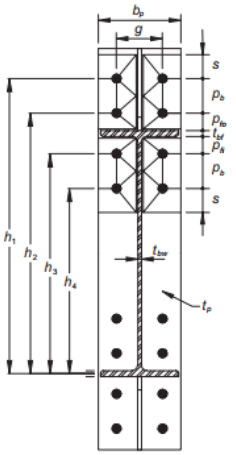
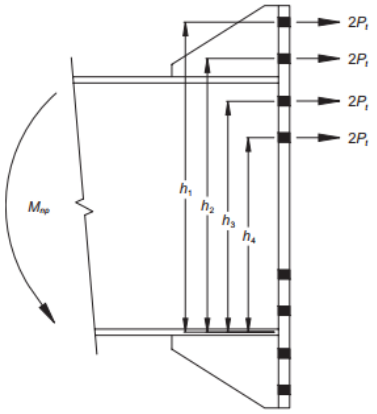
Y_p= Alın levhası akma mekanizması (Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil.14'te gösterilmektedir.)

Alın levhası geometrisi ve akma çizgileri deseni	Bulon Kuvvetleri Modeli
	
Alın Levhası	$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}}+\frac{1}{s}\right)+h_0\left(\frac{1}{p_{fo}}\right)-\frac{1}{2}\right]+\frac{2}{g}\left[h_1(p_{fi}+s)\right]$	
	$s=\frac{1}{2}\sqrt{b_p g}$	Eğer p_{fi}>s ise, p_{fi}=s olarak kullanılır.

Şekil 2. 12 Takviyesiz 4 bulonlu alın levhalı birleşimde alın levhası akma çizgileri deseni [58]

Alın levhası geometrisi ve akma çizgileri deseni		Bulon Kuvvetleri Modeli
Durum 1 (de≤ s)	Durum 2 (de≤ s)	
		
Durum 1 (de≤ s)	$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}}+\frac{1}{s}\right)+h_0\left(\frac{1}{p_{fo}}+\frac{1}{2s}\right)\right]+\frac{2}{g}\left[h_1(p_{fi}+s)+h_0(d_e+p_{fo})\right]$	
Durum 2 (de> s)	$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{p_{fi}}+\frac{1}{s}\right)+h_0\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{p_{fo}}\right)\right]+\frac{2}{g}\left[h_1(p_{fi}+s)+h_0(s+p_{fo})\right]$	
Eğer p_{fi}>s ise, p_{fi}=s olarak kullanılır.	$s=\frac{1}{2}\sqrt{b_p g}$	

Şekil 2. 13 Takviyeli 4 bulonlu alın levhalı birleşimde alın levhası akma çizgileri deseni [58]

Alın levhası geometrisi ve akma çizgileri deseni		Bulon Kuvvetleri Modeli
Durum 1 (de≤ s)	Durum 2 (de≤ s)	
		

Durum 1 (de≤ s)	$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{2d_e}\right)+h_2\left(\frac{1}{p_{fo}}\right)+h_3\left(\frac{1}{p_{fi}}\right)+h_4\left(\frac{1}{s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(d_e+\frac{3p_b}{4}\right)+h_2\left(p_{fo}+\frac{p_b}{4}\right)+h_3\left(p_{fi}+\frac{3p_b}{4}\right)+h4\left(s+\frac{p_b}{4}\right)\right]+g$
Durum 2 (de> s)	$Y_p = \frac{b_p}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}\right)+h_2\left(\frac{1}{p_{fo}}\right)+h_3\left(\frac{1}{p_{fi}}\right)+h_4\left(\frac{1}{s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(s+\frac{p_b}{4}\right)+h_2\left(p_{fo}+\frac{3p_b}{4}\right)+h_3\left(p_{fi}+\frac{p_b}{4}\right)+h4\left(s+\frac{3p_b}{4}\right)\right]+g$
Eğer p_{fi}>s ise, p_{fi}=s olarak kullanılır.	$s = \frac{1}{2}\sqrt{b_p g}$

Şekil 2. 14 Takviyeli 8 bulonlu alın levhalı birleşim alın levhası akma çizgileri deseni [58]

6. Adım: Alın levhası kalınlığı hesaplanan t_p' den az olmayacak şekilde belirlenir.

7. Adım: Kiriş başlığındaki tasarım yükü hesaplanır(F_{fu}).

$$F_{fu} = \frac{M_f}{d - t_{bf}} \tag{2.32}$$

d= Kiriş derinliği

T_{bf}=Kiriş başlık kalınlığı

8. Takviyesiz 4 bulonlu alın levhalı birleşimde kayma akması kontrolü yapılır.

$$\frac{F_{fu}}{2} \leq \phi_d R_n = \phi_d (0{,}6) F_{yp} b_p t_p \tag{2.33}$$

Eğer 2.33 bağıntısı sağlanamazsa alın levhasının malzeme sınıfı yükseltilir.

b_p değeri alın levhasının genişliğidir. Alın levhası genişliği kiriş başlığından 25 mm'den daha büyük alınamaz.

9. Adım: Alın levhasında kesmeden dolayı kopma kontrolü yapılır.

$$\frac{F_{fu}}{2} \leq \phi_d R_n = \phi_d (0{,}6) F_{up} A_n \qquad (2.34)$$

F_{up}= Alın levhasının minimum kopma mukavemeti

A_n= Alın levhasının net alanı (bulon delikleri düşülmüş kesit alan)

D_b= Bulon çapı

10. Adım: Seçilen birleşim tipi 8 veya 4 bulonlu takviyeli alın levhalı birleşim tipi ise alın levhası takviye plakası kalınlığı belirlenir. Ayrıca takviye-kiriş başlığı ve takviye alın levhası kaynaklarının tasarımı yapılır.

$$t_s \geq t_{bw} \left(\frac{F_{yb}}{F_{ys}} \right) \qquad (2.35)$$

T_{bw}= kiriş gövdesinin kalınlığı

T_s= Alın levhası takviyesi kalınlığı

F_{yb}= Kiriş malzemesinin minimum akma mukavemeti

F_{ys}= Takviye plakasının minimum akma mukavemeti

Takviyelerde yerel burkulmaların önlendiği kontrol edilir.

$$\frac{h_{st}}{t_s} \leq 0{,}56 \sqrt{\frac{E}{F_{ys}}} \qquad (2.36)$$

H_{st}= Takviyenin yüksekliği, kiriş başlığından alın levhasının bittiği noktaya kadarki mesafe

11. Adım: Bulonlarda kesme kopması kontrol edilir.

$$V_u \leq \phi_n R_n = \phi_n (n_b) F_{nv} A_b \quad (2.37)$$

N_b= Basınç başlığındaki bulonların adedi (4 bulonlu birleşimlerde 4, 8 bulonlu birleşimlerde 8 olarak alınır.)

A_b= Bulonun nominal brüt alanı

F_{nv}= Bulonun nominal kayma gerilmesi (AISC şartnamelerinde belirlenmiştir.)

V_u= Kirişin sonundaki kesme kuvveti

$$V_u = \frac{2M_{pe}}{L'} + V_{gravity} \quad (2.38)$$

12. Adım: Alın levhasında ve kolon başlığında bulon kopmasının kontrolü yapılır.

$$V_u < \phi_n (n_i) r_{ni} + \phi_n (n_0) r_{no} \quad (2.39)$$

n_i= İç bulonların adedi(4 bulonlu birleşimlerde 2, 8 bulonlu birleşimlerde 4)

n_o= Dış bulonların adedi (4 bulonlu birleşimlerde 2, 8 bulonlu birleşimlerde 4)

$r_{ni} = 1{,}2 L_c t F_u < 2{,}4 d_b t F_u$ iç bulonlarda (2.40)

$r_{no} = 1{,}2 L_c t F_u < 2{,}4 d_b t F_u$ dış bulonlarda (2.41)

L_c= Bulon deliğinin komşu bulona veya malzemenin köşesine olan uzaklığı

t= Alın levhası veya kolon başlığının kalınlığı

F_u= Alın levhası veya kolon başlığının minimum kopma mukavemeti

d_b= Bulonun çapı

Kolon Detaylarının tasarımı

13. Kolon başlığının eğilmede akmasının kontrolü

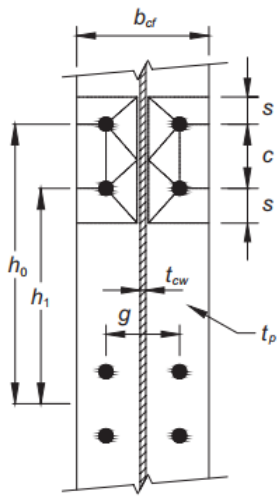
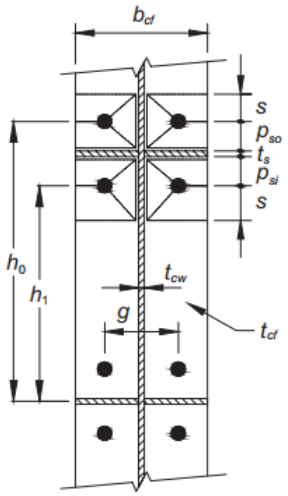
$$t_{cf\ req'd} = \sqrt{\frac{1{,}11\ M_f}{\phi_d F_{yc} Y_c}} \leq t_{cf} \qquad (2.42)$$

F_{yc}= Kolon başlık malzemesinin minimum akma mukavemeti

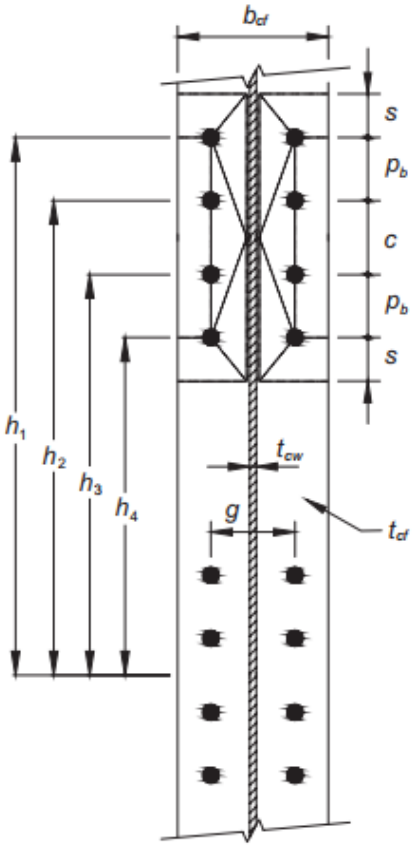
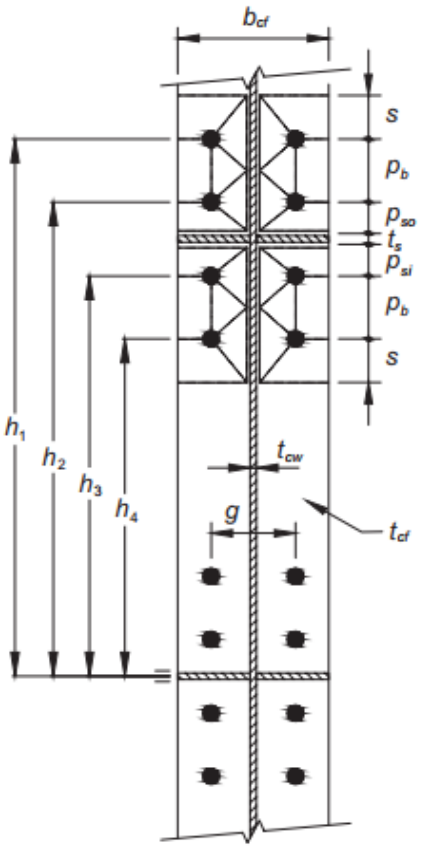
Y_c=Şekil 2.15 ve Şekil 2.16' da belirtilen takviyesiz kolon başlıklarında akma çizgileri parametresi

t_{cf}= Kolon başlığının kalınlığı

Eğer kolon başlığında yeterli eğilme rijitği sağlanamamışsa, kolon boyutu artırılır veya kolona gövde takviyesi kaynatılır.

Takviyesiz kolon başlığı geometrisi ve akma çizgileri deseni	Takviyeli kolon başlığı geometrisi ve akma çizgileri deseni
	
Takviyesiz kolon başlığı	$Y_c = \frac{b_{cf}}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}\right)+h_0\left(\frac{1}{s}\right)\right]+\frac{2}{g}\left[h_1\left(s+\frac{3c}{4}\right)+h_0\left(s+\frac{c}{4}\right)+\frac{c^2}{2}\right]+\frac{g}{2}$ $s=\frac{1}{2}\sqrt{b_{cf}g}$
Takviyeli kolon başlığı	$Y_c = \frac{b_{cf}}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{p_{si}}\right)+h_0\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{p_{so}}\right)\right]+\frac{2}{g}\left[h_1(s+p_{si})+h_0(s+p_{so})\right]$
	Eğer p_{fi}>s ise, p_{fi}=s olarak kullanılır.

Şekil 2. 15 Takviyesiz 4 bulonlu alın levhalı birleşimde kolon akma çizgileri deseni [58]

<table>
<tr><th>Takviyesiz kolon başlığı geometrisi ve akma çizgileri deseni</th><th>Takviyeli kolon başlığı geometrisi ve akma çizgileri deseni</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Takviyesiz kolon başlığı</td><td colspan="2">$$Y_c = \frac{b_{cf}}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}\right)+h_4\left(\frac{1}{s}\right)\right] + \frac{2}{g}\left[h_1\left(p_b+\frac{c}{2}+s\right)+h_2\left(\frac{p_b}{2}+\frac{c}{4}\right)+h_3\left(\frac{p_b}{2}+\frac{c}{2}\right)+h_4(s)\right]+\frac{g}{2}$$ $$s = \frac{1}{2}\sqrt{b_{cf}g}$$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Takviyeli kolon başlığı</td><td colspan="2">$$Y_c = \frac{b_{cf}}{2}\left[h_1\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{p_{si}}\right)+h_0\left(\frac{1}{s}+\frac{1}{p_{so}}\right)\right]+\frac{2}{g}\left[h_1(s+p_{si})+h_0(s+p_{so})\right]$$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Eğer p_{fi}>s ise, p_{fi}=s olarak kullanılır.</td></tr>
</table>

Şekil 2. 16 Takviyeli 8 bulonlu alın levhalı birleşimde kolon akma çizgileri deseni [58]

14. Adım: Eğer kolon gövde takviyelerine eğilmede ihtiyaç duyulursa, takviye için gerekli kuvvet bulunur.

$$\Phi_d M_{cf} = \phi_d F_{yc} Y_c t_{cf}^2 \quad (2.43)$$

Y_c=Takviyesiz kolon akma çizgileri parametresi, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18' den alınmaktadır.

Eşdeğer kolon başlığı tasarım kuvveti hesaplanır.

$$\Phi_d R_n = \frac{\phi_d M_{yc}}{(d - t_{bf})} \quad (2.44)$$

15. Takviyesiz kolon gövdesi durumu için, kolon gövdesinde yerel akma kontrolü yapılır.

Dayanım şartı: $\phi_d R_n \geq F_{fu}$

$$R_n = C_t(6k_c + t_{bf} + 2t_p)F_{yc}t_{cw} \quad (2.45)$$

Ct= Eğer kolon üstü ile kirişin üst başlığı arasındaki mesafe, kolon derinliğinden azsa bu değer 0,5 alınır. Aksi halde 1 olarak hesaba katılır.

k_c= Kolonun birleşime uzak başlığının kolon gövdesinin başladığı noktaya uzaklığı

t_p= Alın levhası kalınlığı

F_{yc}= Kolon gövdesinin belirlenen akma mukavemeti

t_{cw}=Kolon gövde kalınlığı

t_{bf}=Kiriş başlığının kalınlığı

Eğer $\phi_d R_n \geq F_{fu}$ şartı sağlanamazsa kolon gövde süreklilik levhaları gereklidir.

16. Adım: Kirişin basınç başlığının olduğu bölgede kolon gövde burkulma tahkiki yapılır.

$\Phi R_n \geq F_{fu}$

Φ=0,75

(a) F_{fu} uygulandığı nokta kolonun yüzünden dc/2 mesafesine eşit veya daha uzakta ise;

$$R_n = \frac{24t_{cw}^3\sqrt{EF_{yc}}}{h} \quad (2.46)$$

(b) F_{fu} uygulandığı nokta kolonun yüzünden dc/2 mesafesine eşit veya daha uzakta ise;

$$R_n = \frac{12t_{cw}^3\sqrt{EF_{yc}}}{h} \quad (2.47)$$

h= başlıklar arasındaki en kısa düz mesafe

$\Phi R_n \geq F_{fu}$ ise kolon gövde süreklilik levhaları gereklidir.

17. Takviyesiz kolon gövdesinde kirişin basınç başlığının bulunduğu bölgede buruşma tahkiki yapılır

$\Phi R_n \geq F_{fu}$

Φ=0,75

(a) F_{fu} değeri uygulandığı nokta kolonun yüzünden dc/2 mesafesine eşit veya daha uzakta ise;

$$R_n = 0{,}8t_{cw}^2\left[1 + 3\left(\frac{N}{d_c}\right)\left(\frac{t_{cw}}{t_{cf}}\right)^{1{,}5}\right]\sqrt{\frac{EF_{yc}t_{cf}}{t_{cw}}} \quad (2.48)$$

(b) F_{fu} değeri uygulandığı nokta kolonun yüzünden dc/2 mesafesinden daha yakın ise;

- N/dc<0.2 için,

$$R_n = 0{,}4t_{cw}^2\left[1 + 3\left(\frac{N}{d_c}\right)\left(\frac{t_{cw}}{t_{cf}}\right)^{1{,}5}\right]\sqrt{\frac{EF_{yc}t_{cf}}{t_{cw}}} \quad (2.49)$$

- N/dc>0.2 için,

$$R_n = 0{,}4t_{cw}^2\left[1 + \left(\frac{4N}{d_c} - 0{,}2\right)\left(\frac{t_{cw}}{t_{cf}}\right)^{1{,}5}\right]\sqrt{\frac{EF_{yc}t_{cf}}{t_{cw}}} \quad (2.50)$$

N= Kiriş başlığının kalınlığı ile kök kaynağı kalınlığının 2 katının toplamı

dc= Kolonun derinliği

$\Phi R_n \geq F_{fu}$ durumda kolon gövdesi süreklilik levhaları gereklidir.

18. Eğer kolondaki limit durumlardan dolayı takviye levhaları gerekirse, gerekli mukavemet F_{su} ile sağlanır.

$$F_{su} = F_{fu} - min\,\Phi R_n \qquad (2.51)$$

$min\,\Phi R_n$ = 15.adım, 16.adım,17.adım ve 18. adımdan elde edilen minimum tasarım dayanımı değeridir.

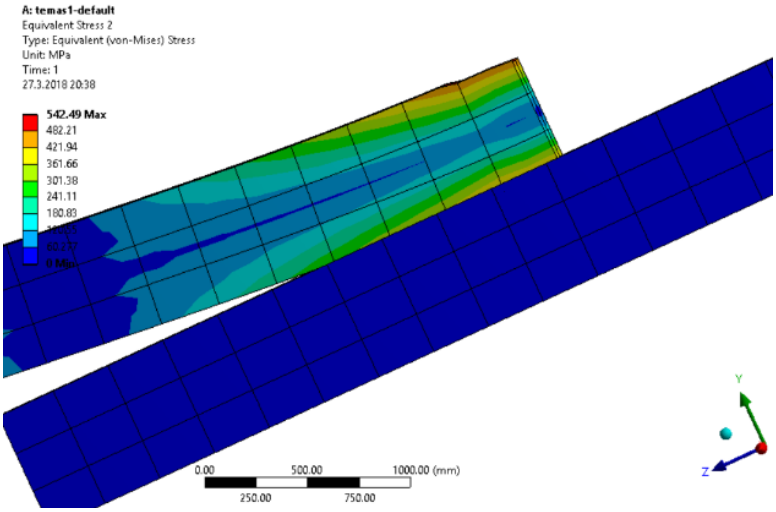
BÖLÜM 3

TEK TESİR YÜZEYLİ BİRLEŞİMDE FARKLI BULON DELİK ÇAPLARININ ARAŞTIRILMASI

Alın levhalı birleşim tipine ait problemin çözümünde bulon davranışlarını incelemek üzere birbirlerine bulonlar yardımıyla bağlanmış çekme kuvvetine maruz plakaların davranışları araştırılmıştır. Bu amaçla ilk önce literatürden alınan çalışma [51] yardımıyla modellemede kullanılan sonlu eleman tekniklerinin doğruluğu teyit edilmiştir. Daha sonra burada uygulanan teknikleri diğer modellerde de uygulayarak bulonlar ile bulon delikleri arasındaki farklara göre 4 adet model grubu hazırlanmış olup toplam 24 model oluşturulmuştur. Ayrıca bulon, bulon deliği arasındaki boşluğu ve bu boşluktaki bulon gövdesi davranışını doğru oluşturmak için temas modelleri de çalışılmıştır.

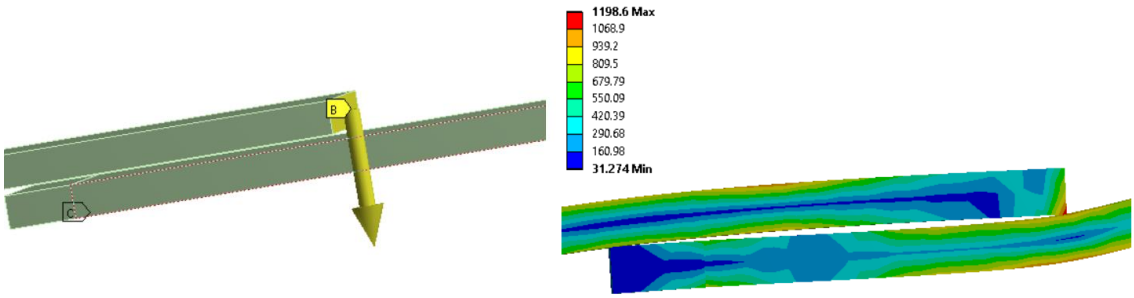
3.1 Doğrusal Olmayan Temas Davranışı

Temas modelleri, birbiri arasında küçük mesafe bulunan (örneğin bulon ve üzerinde bulon çapından büyük bulon deliği bulunan plaka gibi) elemanlarda ortaya çıkan temas doğrusal olmayan davranışını kavrayabilmek, doğru davranışı gözlemlemek amacıyla oluşturulmuştur. Aralarında boşluk bulunan iki plakadan birine uygulanan kuvvetle beraber, plakanın boşluk boyunca mesnetlenmeden hareket edip, diğer plakaya ulaştığında gerekli temas şartlarının oluşturulması amaçlanmıştır. Şekil 3.1’ de boşluğun tanımlanmadığı durumda kuvvet uygulanmayan plakanın teması algılamadığı, kuvvet uygulanan plakanın ise diğer plakanın rijitliğini algılamadığı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Temas probleminde boşluğun tanımlanmadığı durum

Yukarıdaki paragrafta açıklanan temas probleminin çözülmesi amacıyla ANSYS Workbench [59]' de iki plakanın arasında sürtünmeli temas özellikleri tanımlanarak pinball uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamaya ait 3 farklı (add offset- no ramping; add offset- ramping; adjust to touch) özellikten istenen davranışı elde edebilmek için hazırlanan farklı pek çok modelin çözümleri kıyaslanarak sonuca varılmıştır.



a) Modelin şekil değiştirmemiş hali b) Modelin şekil değiştirmiş hali

Şekil 3.2 Temas probleminde boşluğun tanımlandığı durum

Şekil 3.2' de aralarında 4 mm boşluk bulunan iki plakadan birine diğer plaka yönünde yer değiştirme etkitilerek yaptığı şekil değiştirme gösterilmektedir. Bu plakalardan yer değiştirme uygulananı bir ucundan ankastre mesnetlidir. Diğeri ise bir ucundan ankastre diğer ucundan sabit mesnetlidir. Bu modelde Frictional (sürtünmeli) teması için pinball uygulamasının add offset- no ramping özelliği kullanılmıştır. Pinball özelliğinin yarıçapı 2 mm seçilmiştir. Yer değiştirme uygulanan bir ucu ankastre mesnetlenmiş plaka boşluk boyunca hareket ederek, diğer plakaya ulaştığında hem kendinde hem de karşısındaki

plakada gerilme oluşturması amaçlanmıştır. Ayrıca hareket etmeyen plakaya hem temas edip hem de temas ettiği plakanın rijitliğiyle yerdeğiştirmenin bir miktar kısıtlanması istenmektedir. Yerdeğiştirme yüklemesinin uygulanmadığı plakada basit mesnetli ucun, yerdeğiştirmeye maruz plakanın etkisiyle dönerek, yerdeğiştirmeye maruz plakaya temas ederek bu plakada eğilme davranışı da gözlenmiştir. Şekil 3.2' den gözlemlenen bu davranış yeterli görülerek hazırlanacak diğer modellerde de boşluk bulunan sürtünmeli temaslarda bu uygulama ve özellikler kullanılacaktır.

3.2 Doğrulama Çalışmaları

Salt çekme altında bulonla bağlanmış plakaların davranışlarını irdelemek üzere Moze [51]' un çekme levhaları üzerine yaptığı deneysel çalışmalarda L9 isimli numunenin sonlu elemanlar modelleri oluşturularak, uygulanan tekniklerin doğruluğu irdelenmiştir. Deney sonuçları ile elde edilen sonlu eleman sonuçları karşılaştırılacaktır. Çalışmada malzemenin doğrusal olmayan davranış, geometriden kaynaklanan doğrusal olmayan davranış, temas özelliklerinden kaynaklanan doğrusal olmayan davranışlar dikkate alınmıştır.

3.2.1 Malzeme Özellikleri

Deneyde kullanılan malzeme EN 10025-6' da tanımlı S690 QL sınıfı çeliklerin özelliklerini karşılamaktadır. Kullanılan malzemelerin özelliklerini tayin etmek için çalışmada EN 10002-1 (CEN, 2001)' e uygun şekilde deneyler yapılmıştır. Çizelge 3.1 'de belirtilen gerilme-plastik gerinim değerleri elde edilmiştir. Sonlu eleman uygulamalarında da bu değerler kullanılmıştır. Bulonlar kaymada göçmeyi engelleyebilmek için 10.9 kalitesindedir.

Çizelge 3. 1 L9 numunesine ait malzeme mukavemet değerleri[51]

Gerilme(MPa)	799	826	893	928	994
Plastik Gerinim	0	0,009	0,053	0,090	0,700

3.2.2 Geometrik Özellikler

Çift tesirli kesme altındaki bulonlarla tutulan plakanın çekme deneylerinde, birbirine parallel duran rijit plakaların boyutları 195x500x10 mm'dir. Çekme kuvvetlerine maruz kalan plaka için Şekil 3.3 ve Şekil 3.4' de gösterilen geometrik özellikler kullanılmıştır. Hazırlanan modelde, 4 adet 20 mm çapında bulon kullanılmış olup, plakalarda bu bulonlar için 22 mm çapında delikler açılmıştır. Bulonlarda öngerilme bulunmamaktadır.

Specimen name	e_1/d_0	p_1/d_0	e_2/d_0	d_0 [mm]	b [mm]	t [mm]	d [mm]	No. of bolts
L01	1,5	2,0	4,5	22	198	10	20	3
L02	2,0	2,0	4,5	22	198	10	20	3
L03	3,0	2,0	4,5	22	198	10	20	3
L04	1,5	2,0	4,5	22	198	10	20	4
L04s	1,5	2,0	4,5	22	198	10	20	4
L05	2,0	2,0	4,5	22	198	10	20	4
L06	3,0	2,0	4,5	22	198	10	20	4
L06s	3,0	2,0	4,5	22	198	10	20	4
L07	1,5	2,5	4,5	22	198	10	20	3
L08	1,5	2,5	4,5	22	198	10	20	4
L09	2,5	2,5	4,5	22	198	10	20	4
L10	3,0	2,5	4,5	22	198	10	20	4
L11	2,0	3,0	4,5	22	198	10	20	3
L12	2,5	3,0	4,5	22	198	10	20	3
L13	3,0	3,0	4,5	22	198	10	20	3
L14	1,23	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L15	1,5	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L16	2,0	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L17	2,5	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L18	3,0	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L18s	3,0	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L19	5,0	3,0	4,5	22	198	10	20	4
L20	2,0	3,50	4,5	22	198	10	20	4
L20s	2,0	3,50	4,5	22	198	10	20	4
L21	2,0	3,50	4,5	22	198	10	20	3
L22	2,0	3,77	4,5	22	198	10	20	3

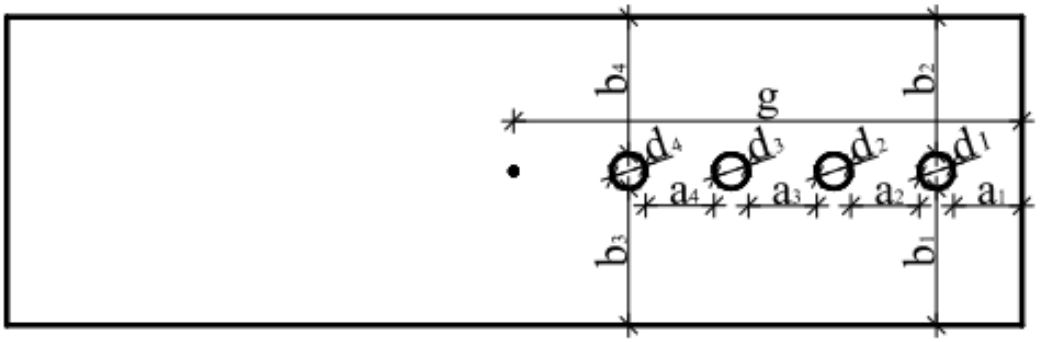
s – hole shifted for 2 mm
(L04s, L06s, L18s – bolt B1 activates first, L20s – bolt B3 activates first)

Şekil 3.3 L9 numunesinin geometrisi[51]

L Tipi Numunelerin boyutları

Specimen name	Connected to forks	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_3 [mm]	a_4 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]	d_1 [mm]	d_2 [mm]	d_3 [mm]	d_4 [mm]	t [mm]	g [mm]
L01	LF1	22,2	22,1	21,6		88,3	87,2	88,7	88,3	22,0	22,0	22,0		10,15	195,0
L02	LF1	33,7	21,6	22,1		88,3	87,6	88,3	87,6	22,0	22,0	22,0		10,20	206,0
L03	LF1	55,3	22,1	21,8		88,7	87,5	88,5	87,5	22,0	22,0	22,0		10,20	228,0
L04	LF1	22,8	21,5	21,9	21,5	88,4	87,9	88,4	87,6	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	239,0
L04s	LF1B	23,0	19,4	21,8	21,7	88,8	87,6	88,8	87,5	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	239,0
L05	LF1B	33,6	21,6	22,0	22,0	88,9	87,9	88,8	87,8	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	250,0
L06	LF1B	55,9	21,5	21,3	21,8	88,3	87,3	88,4	87,6	22,0	22,0	22,0	22,0	10,20	272,0
L06s	LF1B	55,0	19,4	22,2	21,8	88,2	87,6	88,0	88,0	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	272,0
L07	LF2B	22,0	32,7	32,7		88,5	87,5	88,7	87,3	22,0	22,0	22,0		10,15	206,0
L08	LF2A	21,8	33,6	33,0	33,0	88,9	87,0	88,3	87,0	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	261,0
L09	LF2A	43,9	32,7	32,9	32,8	88,6	87,4	87,9	88,2	22,0	22,0	22,0	22,0	10,20	283,0
L10	LF2A	55,1	32,7	33,3	32,9	88,0	88,1	88,4	88,7	22,0	22,0	22,0		10,15	294,0
L11	LF3E	32,8	44,2	44,0		88,5	87,7	NM	NM	22,0	22,0	22,0		10,15	250,0
L12	LF3E	44,1	44,0	43,7		88,0	88,0	88,3	88,7	22,0	22,0	22,0		10,20	261,0
L13	LF3B	55,2	43,7	44,0		88,0	88,3	87,7	88,2	22,0	22,0	22,0		10,15	272,0
L14	LF3B	16,3	43,5	43,5	43,8	88,3	87,9	88,3	87,7	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	299,0
L15	LF3B	22,0	43,6	44,2	43,8	88,7	87,4	88,7	87,1	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	305,0
L16	LF3B	32,7	43,7	44,0	43,7	88,4	87,6	88,2	88,1	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	316,0
L17	LF3B	43,9	43,5	44,2	43,8	88,2	88,1	88,4	87,9	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	327,0
L18	LF3C	55,1	43,5	44,1	43,5	87,7	88,6	88,1	87,9	22,0	22,0	22,0	22,0	10,15	338,0
L18s	LF3C	55,0	41,2	44,3	46,0	88,3	88,0	88,3	87,9	22,0	22,0	22,0	22,0	10,00	338,0
L19	LF3C	99,2	43,9	43,6	43,9	88,1	88,0	88,0	88,0	22,0	22,0	22,0	22,0	10,10	384,0
L20	LF4	33,0	54,6	54,5	55,0	88,5	87,8	88,6	87,7	22,0	22,0	22,0	22,0	10,10	360,0
L20s	LF4	33,0	54,8	55,0	56,9	88,3	87,7	88,3	87,7	22,0	22,0	22,0	22,0	10,10	362,0
L21	LF4	33,5	55,4	55,1		88,4	87,8	88,5	87,6	22,0	22,0	22,0		10,10	283,0
L22	LF5	33,3	60,9	60,9		88,3	87,8	88,5	87,6	22,0	22,0	22,0		10,10	301,0

NM not measured

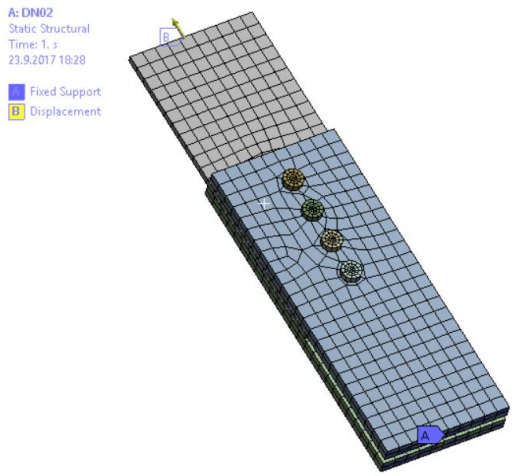


Şekil 3.4 L9 numunesinin geometrisi ve boyutları için kullanılan semboller [51]

3.2.3 Sonlu Elemanlar Ağ Çalışmaları

L9 numunesi için 3 farklı sonlu eleman ağ çalışması yapılarak, ağ yapısının sıklıkları değiştirilmiştir. Bu modellerin isimleri ağ yapısı sıklığı azdan çoka göre DN01, DN02, DN03 olarak oluşturulmuştur. DN01 isimli modelde sonlu eleman ağ çalışması yapılmayıp, program özelliklerine göre varsayılan ağ yapısı uygulanmış, DN02'de homojen bir ağ yapısı elde edebilmek için kenarları 20 mm' lik eleman boyutuna bölen (body sizing) uygulaması yapılmıştır. Bunun yanısıra bulon ve bulon deliğinin temasını irdelemek amacıyla teması modelleyen ara eleman (contact sizing, 10 mm) uygulaması da yapılmıştır. Bulon deliği etrafında ağ yapısı sıkılaştırılarak bu bölgedeki gerilme akışları daha detaylı incelenmeye çalışılmıştır. DN03 modeli ise DN02'de kullanılan ağ yapılarının

sıklaştırılmış halidir. Buna göre kenar eleman boyutu 12 mm ve teması modelleyen ara elemanlar ise 2 mm boyutundadır. Şekil 3.5' te DN02'ye ait sonlu eleman ağ çalışması görülmektedir. Çizelge 3.2' de ise hazırlanan modellerdeki eleman sayıları ve düğüm noktası sayıları görülmektedir.



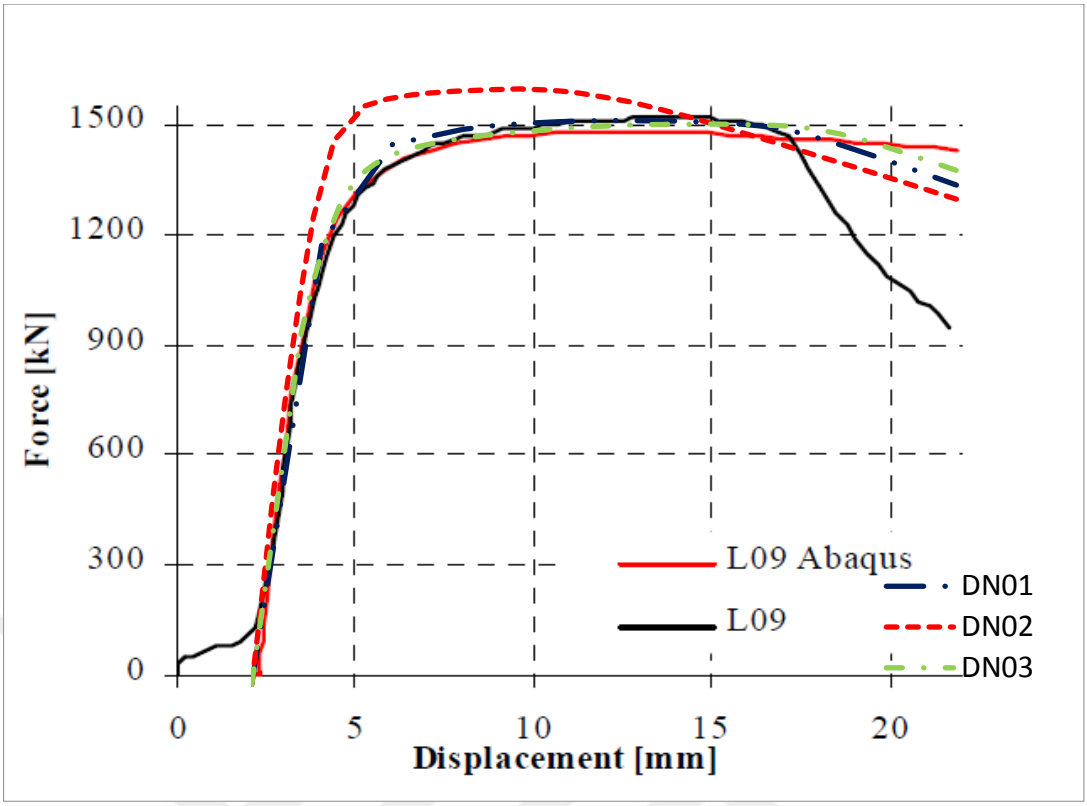
Şekil 3.5 DN02 modelinin sonlu eleman ağ yapısı

Çizelge 3. 2 Modellere göre eleman sayıları, düğüm noktası sayıları ve modellerin yük taşıma kapasiteleri

	DN01	**DN02**	**DN03**	**Numune L9 [51]**
Eleman sayısı	6176	7066	27824	-
Düğüm noktası sayısı	38114	40126	118832	-
Yük kapasiteleri (kN)	1504	1588	1495	1521

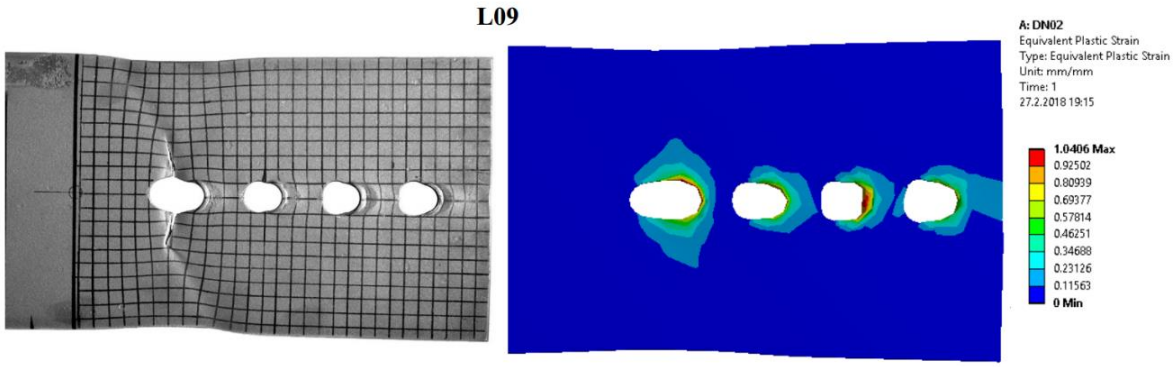
3.2.4 Deneysel Sonuçlar ile Sonlu Eleman Model Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneylerden elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme ile sonlu eleman kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri birlikte Şekil 3.6' da gösterilmektedir. Grafikten de görüleceği üzere kuvvet-yerdeğiştirme bakımından birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.6 Kuvvet- Yerdeğiştirme Grafikleri

DN01 modelinin taşıdığı maksimum çekme kuvveti değeri 1504 kN'dur. DN02 için bu değer 1588 kN ve DN03 için ise bu değer 1495 kN'dur. Deneylerden elde edilen maksimum çekme kuvveti değeri ise 1521 kN'dur. Buna göre DN01 modeline göre %1,1, DN02 modeline göre %4,4, DN03 modeline göre ise %1,7 farklılık bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 3.7' plakanın deneylerden sonraki hali (Şekil 3.7.a) ile sonlu eleman çalışmasından elde edilen plastik şekildeğiştirme diyagramı (Şekil 3.7.b) arasındaki benzerlik görülmektedir.



a) Deneyden elde edilen sonuç [51] b) Sonlu elemanlar ile elde edilen sonuç

Şekil 3. 7 L9 numunesinin deney hasarı ve DN02'nin plastik şekildeğiştirme grafiği

Bu verilerden hareketle sonlu eleman incelemelerinde uygulanan yöntemlerin geçerli olacağı sonucuna varılmıştır. Burada uygulanan yöntemler kullanılarak farklı geometrilerde ve özelliklerde 4 grup altında 24 adet model oluşturularak bulonlu plaka birleşimlerinin davranışları hakkında incelemeler yapılmıştır.

3.3 Tek Tesirli Kesme Altında Plaka Bulonlu Plaka Birleşimleri

Tek tesirli kesmede bulonlardaki kesme düzlemi sayısı 1'dir. Bu tip birleşimlerdeki bulonlarda çekme kuvvetleri bulunmaz. Bunun yerine bulon kesme kuvvetlerine ve çeperinde basınca maruz kalır. Bu bölümde tek tesirli kesme etkisindeki bulonla bağlanmış plakaların sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Bu amaçla bulonlar ile bulon delikleri arasındaki boşluk miktarına göre 4 adet grup oluşturulmuştur. İlk grup D0, bulon ile bulon deliği arasında hiç mesafe bulundurmayan modeller grubudur. İkinci grup D1' de bulon deliğinin çapı bulon çapından 1 mm, D2' de 2mm ve D3' te 3 mm büyük olacak şekilde sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Her bir grup ise kendi içinde 6 adet model içerecek şekilde toplam 24 adet sonlu eleman modeli hazırlanmıştır.

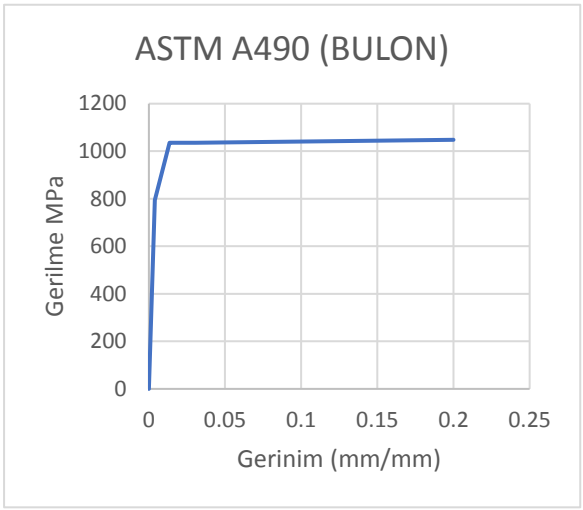
3.3.1 Malzeme Özellikleri

Modellere ait malzeme yapı çeliğidir. Yapı çeliği basit çekme altında belirli bir gerilme değerine kadar elastik davrandığı yani gerilme ve gerinim oranının sabit kaldığı, bu değer aşılmadıkça yük ortadan kalktığında gerinimin de ortadan kalktığı kabul edilen malzemedir. Bu gerilme değeri aşıldıktan sonra değişken eğimli bir akma bölgesi başlar.

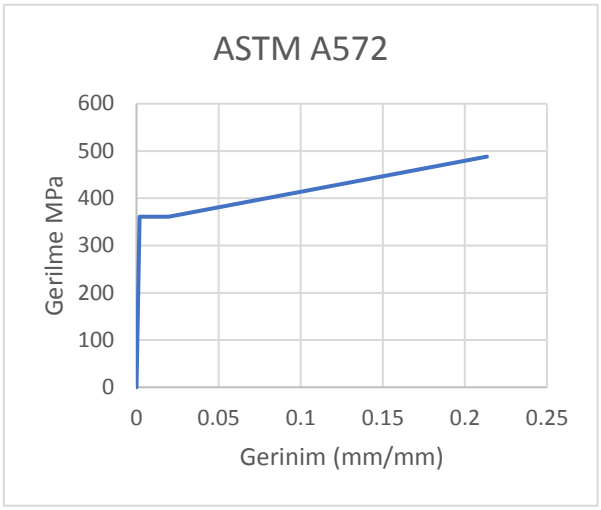
Gerilme - gerinim oranın değiştiği bu bölgeden sonra malzemenin dayanımında nisbi bir artış gözlenir ve bu bölgenin sonunda kopma meydana gelir. Yapı çeliğine ait bu özellikleri göz önünde bulunduran malzeme mekanik/mukavemet özellikleri literatürden[39] alınmıştır. Bu değerler Çizelge 3.3' te gösterilmektedir. Yapı çeliği olarak kullanılan malzemelerin elastisite modülü 210 GPa, Poisson oranı ise 0,3 olarak tanımlanmıştır. Mesnet plakasında S235JR, çekme plakasında S355J2 ve bulonlarda ise ASTM A490 sınıfı çelik malzeme tanımlanmıştır. Buna göre malzemenin doğrusal olmayan, multilineer (çok doğrulu) özellikleri Ansys Workbench 18.2 programında tanımlanarak çözümlemelerde göz önünde bulundurulmaktadır. Oluşturulan tüm modellerdeki elemanların malzeme özellikleri aynı alınmıştır. Şekil 3.8' de malzemelere ait gerilme-gerinim diyagramları gösterilmektedir.

Çizelge 3. 3 Hazırlanan modellere ait malzeme mukavemet değerleri [39]

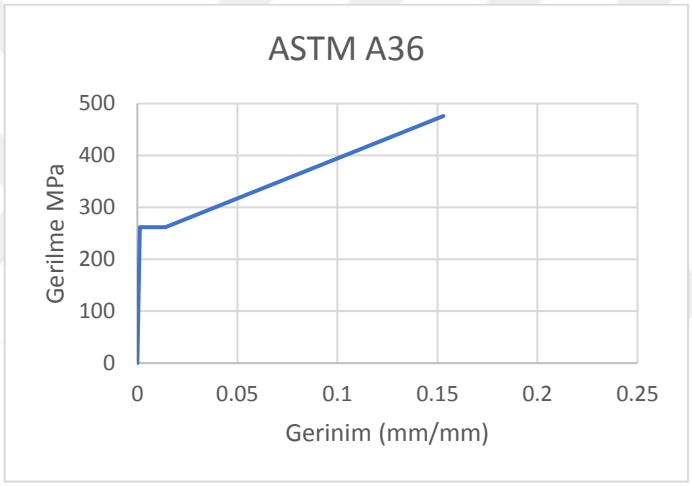
	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)
ASTM A490 (BULON)	794	0,00386
	1035	0,01350
	1035	0,03090
	1048	0,20000
ASTM S235JR (MESNET PLAKASI)	262	0,00128
	262	0,01403
	476	0,15300
ASTM S355J2 (ÇEKME PLAKASI)	361	0,00178
	361	0,01960
	488	0,21340



a) Bulonlarda kullanılan malzeme



b) Çekme plakalarında kullanılan malzeme



c) Mesnet plakalarında kullanılan malzeme

Şekil 3. 8 Kullanılan malzemelere ait gerilme-gerinim grafikleri

3.3.2 Model Geometrileri

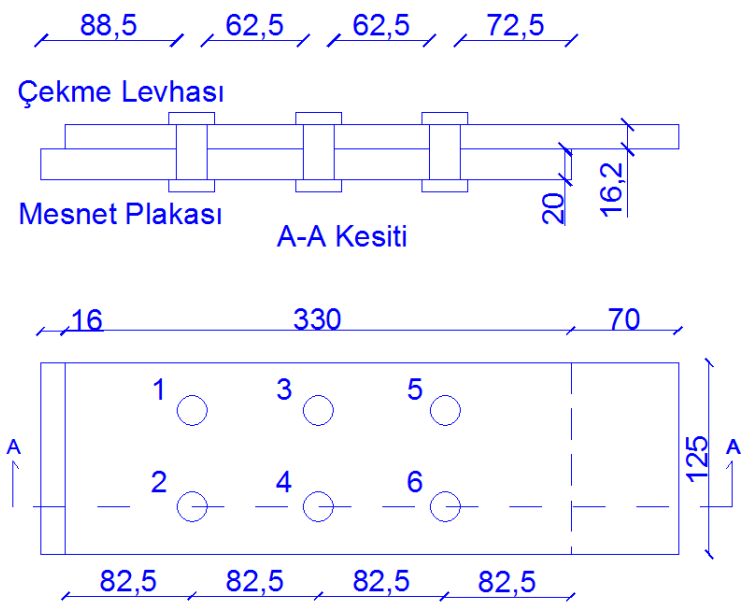
İncelenen probleme dair geometri oluşturmada sonuçlara etkisi nispeten az olan karmaşık bölgelerin basitleştirilmesi elzemdir. Bu basitleştirmeler hem sonlu eleman sayısını azaltacağından çözüm süresini kısaltır, hem de daha homojen ve düzgün sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmasını sağlar. Buna örnek olarak bulon başlıklarının altıgen yerine dairesel formda hazırlanması veya bulonlarla plakalar arasındaki pulların modele dahil edilmemesi örnek verilebilir

Hazırlanmış olan her bir model için bulon çapları dışında tüm geometrik özellikler özdeştir. Bu geometriler Ansys Workbench [59] programının Design Modeller modülünde oluşturulmuştur. 6 adet tek tesirli kesmeye maruz M20 bulon ile tutulmuş iki plakadan oluşan sistemde bulonların geometrik özellikleri Çizelge 3.4' te gösterilmektedir.

Çizelge 3. 4 Bulonların geometrik özellikleri

Model group	Bulon çapı (mm)	Bulon delik çapı (mm)
D0	20	20
D1	20	21
D2	20	22
D3	20	23

Hazırlanan modellerin geometrik özellikleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne [53] uygun olarak tasarlanmıştır. Plakalara ait geometrik özellikler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 9 Tek tesirli kesme etkisindeki buonlu birleşimlere ait boyutlar

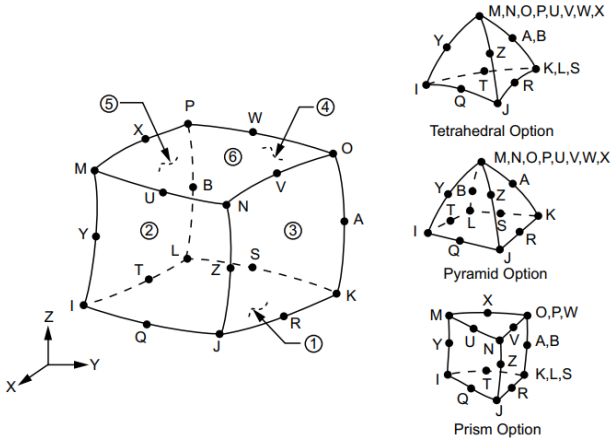
3.3.3 Temas Özelliklerinin Belirlenmesi

Problemlerdeki temas özellikleri, problemin doğrusal olmayan davranışlarını belirlemektedir. Bu davranışların çözümleri genelde yüksek bilgisayar kapasitelerine ihtiyaç duyar. Problemin temas şartlarındaki her doğrusal olmayan özellik problemin çözümü için gerekli süreyi artırır. Bu sebeple problemin temas özelliklerinde yeterince yaklaşık olarak sadeleştirmeler yapmak zaman ve bilgisayar gücünden tasarrufu sağlayacaktır. Temas problemleri rijit-esnek ve esnek-esnek temaslar olarak ikiye ayrılabilirler. Rijit- esnek temaslarda, temas yüzeylerinden biri veya birkaçı hedef yüzeye göre çok daha rijittir. Esnek-esnek temas şekli ise hem temas yüzeyinin hem de hedef yüzeyin esnek olduğu temas şeklidir. Bu temas şeklinde temas eden yüzeylerin rijitlikleri birbirlerine yakındır. Temas problemlerinde iki ana unsur çözümü zorlaştırmaktadır. Bunlardan ilki çözüm yapılana kadar belirlenen yükler, yerdeğiştirmeler ve sınır koşullar altında tam olarak hangi bölgelerin temas halinde olacağının bilinememesi, diğeri ise pek çok temas bir miktar sürtünmeyi içerir ve bunu tanımlayacak pek çok sürtünme modeli mevcuttur ve hepsi doğrusal olmayan çözümler içerir. Sürtünme davranışının çözümün yakınsamasını zorlaştıran etkileri olabilir. Ansys Workbench 18.2 programında temas yüzey-yüzey teması, düğüm noktası-yüzey teması, 3-boyutlu çizgi-çizgi teması, çizgi-yüzey teması ve düğüm noktası-düğüm noktası teması şeklinde tanımlanabilir. [60]. Bu sebeplerden dolayı Bölüm 3.1’ de problemin doğrusal olmayan temas davranışı irdelenmiştir. Problemde sürtünmeli temas, yüzey elemanları arasında tanımlanmıştır. Hazırlanan modellerde çekme ve mesnet levhaları arasına, bulon başlığı ile levhalar arasına ve bulon gövdesi ile levha arasına sürtünmeli temas özelliği atanmıştır. D0 modelleri dışındaki modellerde yani, bulon gövdesi ile levha arasında boşluk bulunan durumlarda Bölüm 3.1’ den elde edilen pinball uygulamaları yapılmıştır. Temaslarda kullanılan sürtünme katsayıları 0,44 olarak literatürden[39] alınmıştır.

3.3.4 Sonlu Eleman Ağ Yapısı ve Modellerin Özellikleri

Sonlu eleman ağ yapısı oluşturmak, herhangi bir fiziksel problemi çözebilmek için küçük parçalara ayırmak anlamına gelmektedir. Ağ yapısının parçalanmış her bir elemanı geometrik özelliklerine, düğüm noktası, köşe ve kenar sayısına göre programda tanımlanmıştır. Tanımlanmış her bir elemanın şekil fonksiyonları farklı olup program

içinde bu şekil fonksiyonları dikkate alınarak sonlu eleman çözümleri yapılmaktadır. Modellerdeki sonlu eleman çeşidi SOLID186'dır. SOLID186, 6 yüzü olan, 20 düğüm noktası bulunan elemandır. Şekil 3.10' da SOLID186' nın şekli, düğüm noktaları ve yüzeyleri görülmektedir. Düğüm noktalarının birleştirilmesi ile kübik yapısı tetrahedral, piramit ve üçgen prizma şekillerine de dönüşebildiği için, tek tesirli kesme etkisindeki bulonlu modeler için uygun bir elemandır[60].

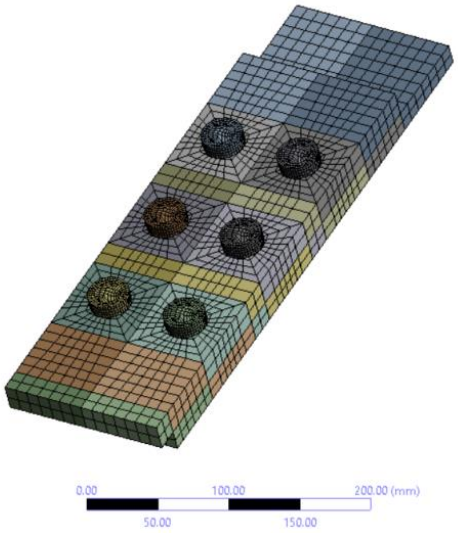


Şekil 3. 10 D0-1 SOLID186 elemanına ait geometri ve düğüm noktaları[60]

Sonlu eleman ağ yapısı problemin fiziksel durumunu yeterli doğrulukta yansıtacak kadar detaylı, çözüm süresini gereksizce artırmayacak, bilgisayar kapasitesini aşmayacak kadar da sade olmalıdır. Bu sonlu eleman ağ yapısına kolayca karar verilemeyeceği için, aynı geometriye ait farklı sonlu eleman çalışmaları genelde gereklidir. Bu nedenle her bir grup içinde farklı sonlu elemanlar ağ yapıları bulunmaktadır.

Sonlu elemanlar ağ yapılarını yeterince homojen oluşturabilmek için geometriler kübik parçalara bölünmüştür. Bu parçalara ise kenar boyutlandırılması (edge size meshing) uygulaması yapılmıştır. Bulon delikleri levhalarda süreksizlikler oluşturduğundan homojen eleman ağı yapısı oluşturabilmek için map face meshing ile bulon deliği etrafında farklı bir eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Bu uygulamalar her modelde ortak olarak bulunmaktadır. Bu sonlu eleman ağ yapısına göre kenar uzunlukları 10 mm olacak şekilde bölünmüştür. Şekil 3.11'de oluşturulan ağ yapısı görülmektedir. Ayrıca a ve b uzantılı modellerde (örneğin D3-4a) kenar boyunca eleman boyutu (6,4 mm) ve teması

modelleyen ara eleman boyutları (1,5 mm) küçültülmüş olup sonlu eleman ağ yapısı sıklaştırılarak yakınsama çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 3. 11 Sonlu eleman ağ yapısı

Yukarıda açıklanan ağ yapısı özelliklerine ilave olarak teması modelleyen ara eleman uygulamaları modeller arasında değişken özellik olarak uygulanmıştır. Buna göre Çizelge 3.5'de bu uygulama yapılmış modeller ve uygulama boyutları gösterilmiştir.

Çizelge 3. 5 Modellerde teması modelleyen ara eleman uygulamaları

D0 Grubu	**Teması modelleyen ara elaman boyutu**	**D1 Grubu**	**Teması modelleyen ara elaman boyutu**
D0-1	-	D1-1	-
D0-2	2 mm	D1-2	2 mm
D0-3	-	D1-3	-
D0-4	2 mm	D1-4	2 mm
D0-4a	2 mm	D1-4a	2 mm
D0-4b	1,5 mm	D1-4b	1,5 mm
D2 Grubu	**Teması modelleyen ara elaman boyutu**	**D3 Grubu**	**Teması modelleyen ara elaman boyutu**
D2-1	-	D3-1	-
D2-2	2 mm	D3-2	2 mm
D2-3	-	D3-3	-
D2-4	2 mm	D3-4	2 mm
D2-4a	2 mm	D3-4a	2 mm
D2-4b	1,5 mm	D3-4b	1,5 mm

Yapılan sonlu eleman ağ yapılarında önemli fakörlerden biri oluşan toplam eleman sayısı ve düğüm noktası sayıdır. Farklı teması modelleyen ara eleman uygulamalarının

yapılması, modellerde farklı eleman adedi ve düğüm sayıları oluşturmuştur. Elemanların adedi ve düğüm noktası sayıları Çizelge 3.6’ da sunulmuştur.

Çizelge 3. 6 Modellerde eleman adetleri ve düğüm sayıları

D0 Grubu	**Eleman adedi**	**Düğüm sayısı**	**D1 Grubu**	**Eleman adedi**	**Düğüm sayısı**
D0-1	2658	15486	D1-1	2438	14236
D0-2	18770	97752	D1-2	21984	110696
D0-3	2658	15486	D1-3	2438	14236
D0-4	18770	97752	D1-4	21984	110696
D0-4a	23142	118995	D1-4a	26995	135376
D0-4b	28816	146790	D1-4b	55244	261378
D2 Grubu	**Eleman adedi**	**Düğüm sayısı**	**D3 Grubu**	**Eleman adedi**	**Düğüm sayısı**
D2-1	2584	16453	D3-1	3030	18978
D2-2	32128	159840	D3-2	32968	163630
D2-3	2584	16453	D3-3	3030	18978
D2-4	32142	159917	D3-4	22980	117602
D2-4a	33404	163142	D3-4a	28002	142097
D2-4b	36951	183365	D3-4b	34880	175229

3.3.5 Yüklemeler

Bir ucu ankastre şekilde mesnetlenmiş mesnet plakası bulonlar yardımıyla diğer plakaya bağlanmıştır. Diğer plakanın uç kısmından plakaların uzun doğrultusunda çekme

kuvvetleri oluşturmak amacıyla 30 mm yerdeğiştirme uygulanmıştır. 30 mm değeri plakaların plastik şekildeğiştirmelerini gözlemleyebilmek için seçilmiştir. Yerdeğiştirme uygulanmasının amacı ise kuvvetin uygulandığı bölgelerde yerel gerilme yığılmalarından kaçınmaktır.

Bulonlardaki öngerilmeden kaynaklanan davranış farklılıklarını gözlemlemek amacıyla bazı modellere öngerilme uygulanmamıştır. Bu tip modellerde yükleme tek aşamadan ibaret olup, bu aşamada 30 mm yerdeğiştirme uygulanmıştır. Öngerilme bulunan modellerde ise yükleme 2 aşamada yapılmaktadır. Buna göre öngerilme kuvvetleri bulonlara uygulanır, daha sonra ise 30mm yerdeğiştirme monotonik olarak modellere etki ettirilir. Çizelge 3.7'de öngerilme uygulanan modeller gösterilmektedir.

Çizelge 3. 7 Modellerde öngerilme

D0	**Bulonlarda öngerilme durumu**	**D0**	**Bulonlarda öngerilme durumu**
D0-1	Yok	D1-1	Yok
D0-2	Yok	D1-2	Yok
D0-3	Var	D1-3	Var
D0-4	Var	D1-4	Var
D0-4a	Var	D1-4a	Var
D0-4b	Var	D1-4b	Var
D2	**Bulonlarda öngerilme durumu**	**D3**	**Bulonlarda öngerilme durumu**
D2-1	Yok	D3-1	Yok
D2-2	Yok	D3-2	Yok
D2-3	Var	D3-3	Var
D2-4	Var	D3-4	Var
D2-4a	Var	D3-4a	Var
D2-4b	Var	D3-4b	Var

Çelik yapılarda bulonlarda öngerilme kuvvetleri, bulonların bir arada tuttuğu levhaların birbirleri arasında sürtünme kuvveti oluşturmak için kullanılmaktadır. Ansys Workbench Programında bu durum temas yüzeylerinde sürtünme katsayıları ile sağlanmakla beraber yüzeylerin birbirlerine temas etmedikleri durum veya öngerilme ile temasın artırıldığı durumdaki sonuçları gözlemlemek için bazı modellerde öngerilme uygulanıp, diğerlerinde uygulanmamıştır. Sonuçlarda bu durumlar kıyaslanarak, öngerilmelerin modellere etkileri irdelenecektir. Modellerin tamamı M20 bulonları kullanıldığı için öngerilme kuvvetleri 160 kN olarak etkitilmiştir[61].

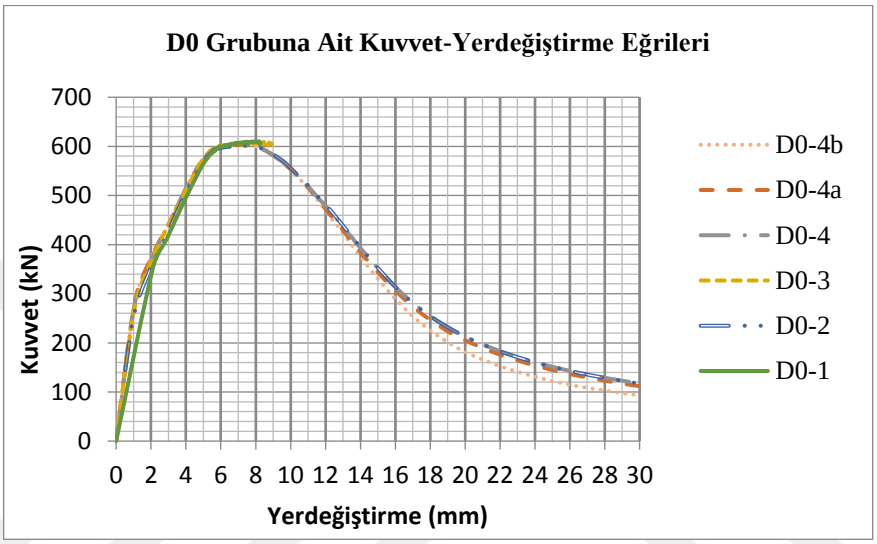
3.3.6 Modellerin Çözümleri Ve Elde Edilen Sonuçlar

Modellerin sonuçlarının tartışılmasında, modeller ilk önce kendi grupları arasında incelenmiştir. Bu yaklaşımla, 30 mm yerdeğiştirme için gereken kuvvet, mesnet plakaları, çekme plakaları ve bulonlardaki eşdeğer gerilme ve gerinim değerleri kıyaslanmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar ve çıkarımlara göre gruplar arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Modellerde kullanılan malzeme için verilen gerilme-gerinim değerlerinin modellerde dikkate alınan yüklemeden dolayı aşıldığı durumlar mevcuttur. Modellerin aynı yükleme anında kıyaslanabilmesi için bu duruma izin verilmiştir. Bu durumlarda malzeme gerilme ve gerinim değerlerinin üzerinde, gerçekçi olmayan sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi programın en son tanımlanan gerilme-gerinim eğilimini (elastisitesi) dikkate alarak hesabı devam ettirmesidir.

3.3.6.1 D0 Grubuna Ait Sonuçlar

D0 grubuna ait kuvvet- yerdeğiştirme diyagramı Şekil 3.12’ de gösterilmektedir. Şekil 3.12’den görüleceği üzere bulon deliğinin bulon çapı ile tam uyumlu olduğu durumlarda sonuçlar, teması modelleyen ara eleman uygulamalarından ve bulondaki öngerilmelerden etkilenmemektedirler. Çizelge 3.8’den görüleceği üzere, mesnet plakasındaki en büyük eşdeğer gerilmeler mesnete en yakın bulon delikleri etrafında oluşmuştur. Buna ilave olarak, D0-1 modeli dışında, çekme levhalarındaki en büyük eşdeğer gerilmeler çekme kuvvetlerine en yakın bulon delikleri civarındadır. Şekil 3.13’te Model D0-2’ye ait eşdeğer gerilme diyagramı görülmektedir. D0 grubunda yapılan analizler sonucunda hazırlanan modellerde çekme plakalarındaki eşdeğer gerilmelerin

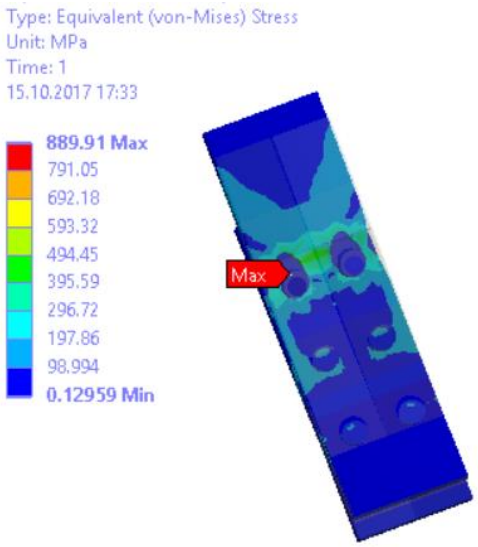
ortalaması, ankastre mesnetlenmiş mesnet plakasına göre %11,25 daha fazla çıkmaktadır. Buna göre mesnet plakalarındaki eşdeğer gerilmelerin ortalama değeri 463.74 MPa'dır. Buna ek olarak, D0-2 ve D0-4b modelleri kıyaslandığında, bulonlardaki öngerilmelerin mesnet ve çekme plakalarının gerilme dağılımına etkisi olmamıştır. Dolayısıyla tek tesirli kesme etkisindeki plakalarda bulon deliği çapı ile bulon çapı aynı olduğu durumda, öngerilme ihmal edilebilir. Bu nedenle plakalar arasında temas yüzeyi için sürtünmeli temas tanımlanması gerekli değildir.



Şekil 3. 12 D0 Grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri

Çizelge 3. 8 D0 Modellerine ait gerilmeler

Model	Çekme Kuvveti	Mesnet Plakasındaki Maksimum Eşdeğer Gerilme		Çekme Plakasındaki Maksimum Eşdeğer Gerilme	
	Değeri (kN)	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge
D0-1	610,17	441,68	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	581,83	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D0-2	601,57	475,21	4 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	487,97	5-6 Numaralı Bulon Deliklerinin
D0-3	609,94	439,38	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	596,14	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D0-4	602,42	475,28	3 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	493,43	5-6 Numaralı Bulon Deliği Arasında
D0-4a	602,97	475,19	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	487,99	5-6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D0-4b	602,69	475,70	2 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	487,98	5-6 Numaralı Bulon Delikleri ortasında
Ortalama Değerler	604,96	463,74	-	522,55	-



Şekil 3. 13 D0-2 Modeline ait eşdeğer gerilme diyagramı

D0 grubunda mesnet plakalarında açığa çıkan plastik gerinim değerlerinin ortalaması 0,1676 mm/mm iken, çekme kuvvetine maruz plakada ortaya çıkan ortalama plastik gerinim değeri ise 1,6348 mm/mm'dir. Plastik gerinim değerlerini ve oluştukları bölgeleri

gösteren veriler Çizelge 3.9’ da belirtilmiştir. Plastik gerinim oluşan bölgeler mesnetlenmenin yapıldığı plakada mesnete en yakın bulon delikleri civarında, yerdeğiştirmenin verildiği plakada ise yerdeğiştirmeye en yakın bulonların bulunduğu bölgede oluşmaktadır. Tüm sistem ele alındığında en büyük plastik gerinim değerleri yerdeğiştirme kuvvetlerine en yakın bulon delikleri etrafında oluşmaktadır.

Çizelge 3. 9 D0 Modellerine ait gerinim değerleri ve yerleri

Model	Mesnet Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim		Çekme Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim	
	Değeri	Oluştuğu Bölge	Değeri	Oluştuğu Bölge
D0-1	0,1305	1 Numaralı Bulon	0,2963	6 Numaralı Bulon Deliği
D0-2	0,1583	1 Numaralı Bulon	1,9849	5-6 Numaralı Bulon
D0-3	0,1286	1 Numaralı Bulon	0,3380	1 numaralı bulon deliği
D0-4	0,1555	2 Numaralı Bulon	1,9855	5-6 Numaralı Bulon
D0-4a	0,1630	2 Numaralı Bulon	2,5380	5-6 Numaralı Bulon
D0-4b	0,1676	1 Numaralı Bulon	2,6660	5-6 Numaralı Bulon

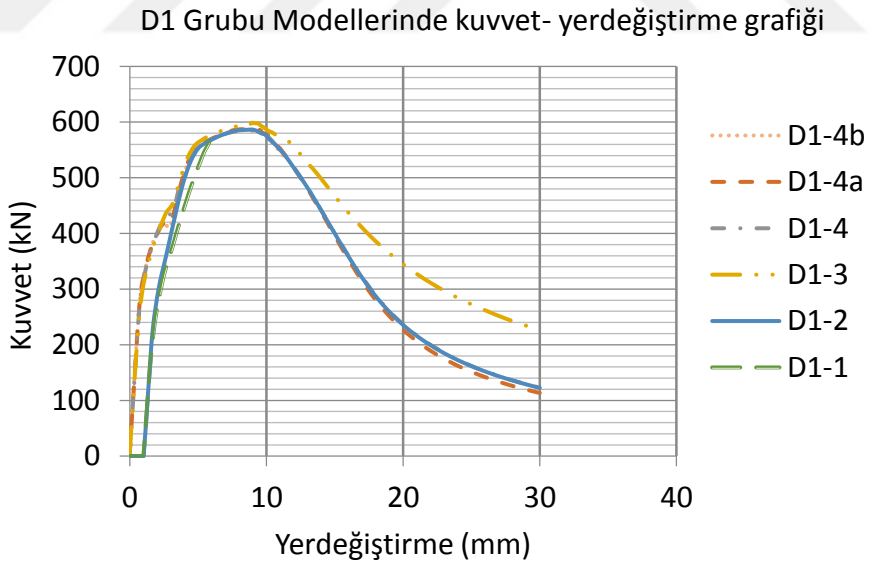
Bulonlarda maksimum eşdeğer gerilme ve gerinim değerleri Çizelge 3.10' da gösterilmektedir. Bulon gerilme değerleri bulon malzeme nihai dayanım değerine göre yüksek görünmesine rağmen sitemin göçmesi çekme levhalarında gözlenmektedir. Bu durumun sebebi çekme levhalarının bulon nihai taşıma gücüne erişmeden çok daha önce nihai gerilme değerlerine ulaşmasıdır. Bu durum çekme levhalarının plastik şekideğiştirme değerlerinden de anlaşılabilmektedir. Modellerde maksimum eşdeğer gerilme ve gerinim değerlerinin oluştuğu bulonlar farklılık göstermektedir. Ayrıca D0-3 ve D0-1 modellerinde 30 mm yerdeğiştirme değerlerine ulaşılamamıştır.

Çizelge 3. 10 D0 Modellerindeki bulonlara ait gerinim değerleri ve yerleri

Model	**Eşdeğer gerilme**		**Eşdeğer plastik gerinim**	
	Bulon ismi	**Değeri (MPa)**	**Bulon ismi**	**Değeri (mm/mm)**
D0-1	2	1262,60	5	0,063074
D0-2	5	1256,00	5	0,266800
D0-3	2	1306,20	6	0,069000
D0-4	3	1296,10	5	0,257780
D0-4a	4	1165,10	5	0,177385
D0-4b	4	1293,10	5	0,163860

3.3.6.2 D1-D2-D3 Gruplarına Ait Sonuçlar

D1 grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 3.14' te verilmiştir. Şekil 3.14' ten görüleceği gibi kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi bulon öngerilme durumundan etkilenmektedir. Ayrıca çekme kuvveti taşıma kapasitesi D0 modellerine kıyasla gözle görülür derecede azalmıştır. D1 grubuna ait maksimum gerilme ve gerinim değerleri Çizelge 3.11' de sunulmuştur. Mesnet plakası ve çekme plakasındaki en büyük eşdeğer gerilme değerlerinin ortaya çıktığı bölgeler mesnet plakasında mesnete en yakın bulon delikleri etrafında, çekme plakasındaki en büyük eşdeğer gerilmeler ise çekme kuvvetlerine en yakın bulon delikleri etrafında gözlenmektedir. D1 grubuna ait sonuçlar incelendiğinde 30 mm yerdeğiştirme meydana getiren ortalama çekme kuvveti 586,70 kN' dur. Mesnet plakasında ortaya çıkan maksimum eşdeğer (von-Mises) gerilmelerin ortalaması 458,99 MPa iken çekme kuvvetine maruz plakada bu gerilmelerin ortalama değeri 551,94 MPa'dır. Buna göre D1 grubu modellerinde çekme plakasında oluşan maksimum eşdeğer gerilme, mesnet plakasında oluşan maksimum eşdeğer gerilmeden ortalama olarak %16,8' oranında daha fazladır

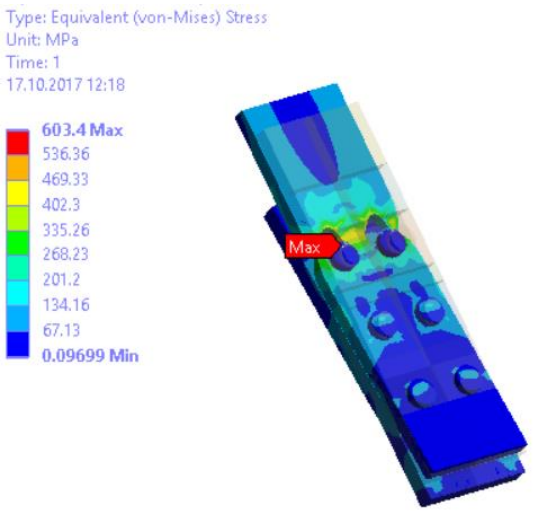


Şekil 3. 14 D1 Grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı

Çizelge 3. 11 D1 Modellerine ait gerilme değerleri ve yerleri

Model	Gerekli	Mesnet Plakasındaki		Çekme Plakasında Maksimum	
	Değeri (kN)	Değeri	Oluştuğu Bölge	Değeri	Oluştuğu Bölge
D1-1	574,83	411,9	2 Numaralı Bulon	503,2	6 Numaralı Bulon
D1-2	586,06	474,96	5 Numaralı Bulon	542,38	5-6 Numaralı Bulon
D1-3	598,79	442,79	3 Numaralı Bulon	608,12	5-6 numaralı bulon
D1-4	586,85	473,29	1 Numaralı Bulon	527,53	5-6 Numaralı Bulon
D1-4a	587,18	475,44	2 Numaralı Bulon	531,76	5-6 Numaralı Bulon
D1-4b	586,48	475,56	1-2 Numaralı	598,63	5-6 Numaralı Bulon
Ortalama	586,70	458,99	-	551,93	-

D1 grubu için plastik gerinim değerleri Çizelge 3.12'de verilmiştir. Çekme plakaları açısından D1-3 ve D0-3 modelleri dışında D1 grubu ile D0 grubu arasında belirgin bir farklılık yoktur. D1 grubunda plastik gerinim verileri incelendiğinde mesnet plakalarında ortaya çıkan plastik gerinim değerlerinin ortalaması 0,14333 mm/mm iken, çekme kuvvetine maruz kalan plakada bu değer 1,7113 mm/mm' dir. Bu değerler D0 grubu için yaklaşık olarak aynıdır. D1-2 modeline ait eşdeğer gerilme diyagramı Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3. 15 D1-2 Modeline ait eşdeğer gerilme diyagramı

Çizelge 3. 12 D1 Modellerine ait plastik gerinim değerleri ve yerleri

	Mesnet Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim		Çekme Plakasında Maksimum Plastik Gerinim	
	Değeri	Oluştuğu Bölge	Değeri	Oluştuğu Bölge
D1-1	0,11283	2 Numaralı Bulon	0,11925	5-6 Numaralı Bulon
D1-2	0,15493	2 Numaralı Bulon	2,0819	5-6 Numaralı Bulon
D1-3	0,13213	2 Numaralı Bulon	0,9443	5-6 Numaralı Bulon
D1-4	0,15021	1 Numaralı Bulon	2,0726	5-6 Numaralı Bulon
D1-4a	0,15423	2 Numaralı Bulon	2,4123	5-6 Numaralı Bulon
D1-4b	0,15566	1 Numaralı Bulon	2,6373	5-6 Numaralı Bulon

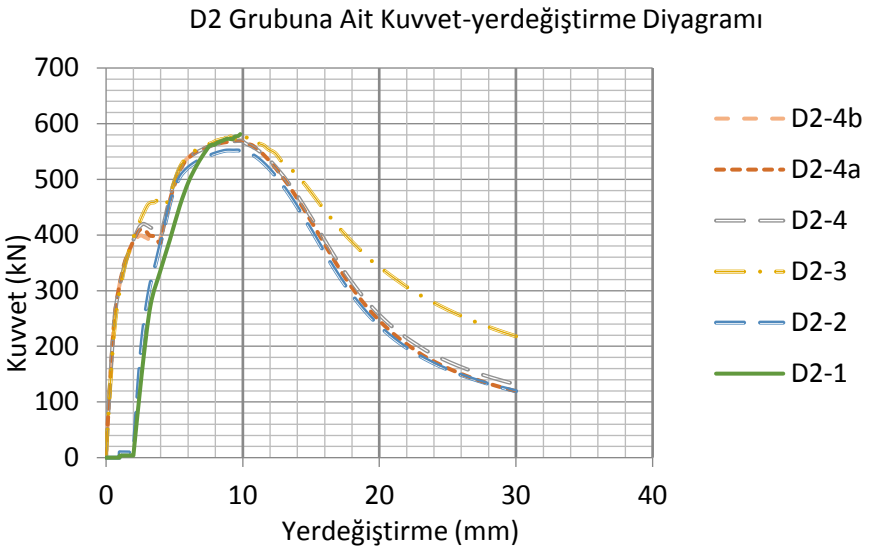
D1 grubuna ait bulonlarda maksimum eşdeğer gerilme ve plastik gerinim değerleri Çizelge 3.13' te gösterilmektedir. Çizelge 3.13'ten görüleceği üzere bulonlarda öngerilme bulunmadığı durumlarda (D1-2 ve D0-2 modelleri) maksimum plastik gerinim ve eşdeğer gerilme değerleri azaldığı gözlemlenmektedir. Öngerilme dikkate alındığında (D1-4b ve D0-4b) maksimum eşdeğer gerilme azalıp, eşdeğer gerinim değerleri ise artmıştır. Ayrıca, D0 grubunda olduğu gibi, D1 grubunda da göçme çekme plakasında oluşmaktadır.

Çizelge 3. 13 D1 Modellerinde bulonların eşdeğer gerilme ve plastik gerinim değerleri

	Eşdeğer Gerilme		Eşdeğer Plastik Gerinim	
	Bulon	Değeri (MPa)	Bulon	Değeri (mm/mm)
D1-1	2	1228,90	6	0,038649
D1-2	3	1215,10	2	0,166420
D1-3	4	1260,80	6	0,064355
D1-4	4	1065,70	6	0,179640
D1-4a	3	1073,50	6	0,143950
D1-4b	6	1047,90	6	0,353630

D2 grubuna ait kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.16' da verilmiştir. Kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi bulonlardaki öngerilme bulunma durumundan etkilenmektedir.

Bulonlardaki öngerilme etkisi grafikteki eğrilerde en büyük kuvvete ulaşmadan önce kaymalar oluşturmuştur. Modellere etkiyen en büyük çekme kuvvetleri D1 grubuna göre azalmıştır.



Şekil 3. 16 D2 Grubuna ait kuvvet-yerderdeğiştirme diyagramları

D2 grubundaki maksimum eşdeğer gerilme değerleri ve bu değerlerin oluştuğu bölgeler Çizelge 3.14' de gösterilmektedir. Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.11'den görüleceği üzere, bulonlardaki öngerilmenin ihmal edildiği modellerde (D2-2 ve D1-2 modelleri) mesnet plakası ve çekme plakasındaki gerilme değerleri yaklaşık olarak aynıdır. D2-4b ve D0-4b incelendiğinde ise mesnet plakalarındaki gerilme dağılımları benzer değerlerde iken, çekme plakalarındaki gerilmelerde azalmalar gözlenmiştir.

Çizelge 3. 14 D2 Grubunda plakalardaki eşdeğer gerilme değerleri ve yerleri

Model	Çekme Kuvveti	Mesnet Plakasındaki Maksimum Eşdeğer Gerilme		Çekme Plakasındaki Maksimum Eşdeğer Gerilme	
	Değeri (kN)	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge
D2-1	581,23	422,78	2 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	554,09	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D2-2	551,91	451,12	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	534,16	5-6 Numaralı Bulon Deliklerinin ortasında
D2-3	577,00	436,61	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	625,25	5-6 Numaralı Bulon Deliği Arasında
D2-4	568,90	468,27	3 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	689,17	5-6 Numaralı Bulon Deliği Arasında
D2-4a	569,64	470,98	3 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	501,62	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D2-4b	570,56	471,54	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	540,54	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
Ortalama Değerler	569,87	453,55	-	574,13	-

Benzer şekilde mesnet plakaları ve çekme plakalarındaki plastik gerinim değerleri mukayese edildiğinde; mesnet plakalarındaki plastik gerinim ortalama değeri 0,13464 mm/mm ve çekme plakasında ise bu değer 1,5141'dir. Bu veriler Çizelge 3.15' te sunulmaktadır. Çizelge 3.15 ve Çizelge 3.12' den görüleceği üzere öngerilmenin bulunmadığı modellerde (D2-2 ve D1-2) mesnet plakalarındaki gerinim az oranda azalmıştır. Öngerilme dikkate alındığında ise (D2-4b ve D1-4b) plastik gerinim bakımından mesnet plakalarında az oranda, çekme plakalarında ise belirgin oranda azalma gözlenmiştir.

Çizelge 3. 15 D2 Grubu modellere ait plakalardaki plastik gerinim değerleri ve yerleri

Model	Mesnet Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim		Çekme Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim	
	Değeri	Oluştuğu Bölge	Değeri	Oluştuğu Bölge
D2-1	0,1166	2 Numaralı Bulon	0,2224	6 Numaralı Bulon Deliği
D2-2	0,1361	2 Numaralı Bulon	2,3269	5-6 Numaralı Bulon
D2-3	0,1096	2 Numaralı Bulon	1,5725	5-6 numaralı bulon
D2-4	0,1468	1 Numaralı Bulon	2,2836	5-6 Numaralı Bulon
D2-4a	0,1483	1 Numaralı Bulon	2,3437	5-6 Numaralı Bulon
D2-4b	0,1504	1 Numaralı Bulon	0,3354	5 Numaralı Bulon Deliği
Ortalama	0.1346	-	1.5141	-

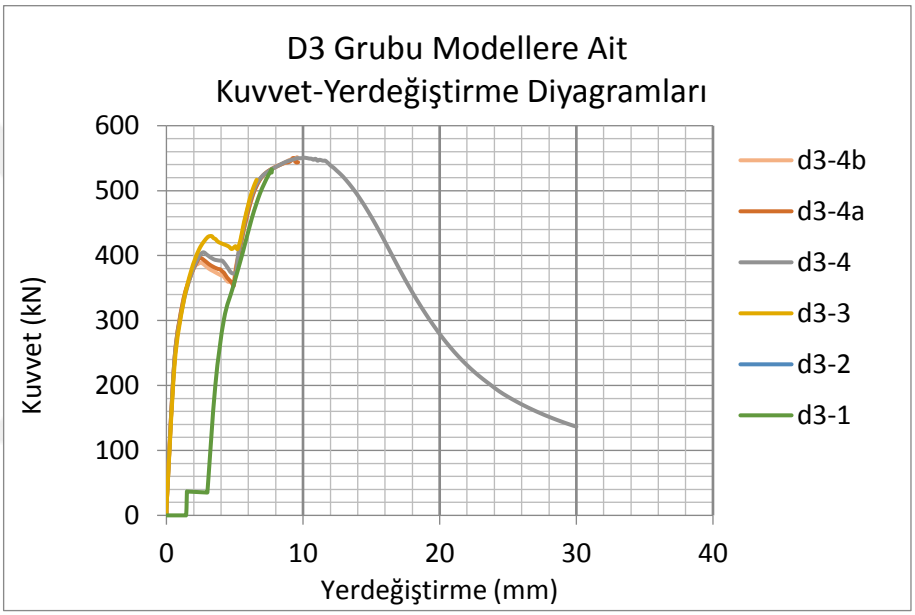
D2 modellerindeki bulonlara ait maksimum eşdeğer gerilme ve gerinim değerleri Çizelge 3.16' da gösterilmektedir. Öngerilme bulunmayan modellerde gerilme ve gerinim plastik bölgenin başlangıcında geri dönerken, öngerilme bulunan durumda plastik bölgenin son kısmında bulunmaktadır.

Çizelge 3. 16 D2 Grubu bulonlarda eşdeğer gerilme plastik gerinim değerleri ve yerleri

	Eşdeğer Gerilme		Eşdeğer Plastik Gerinim	
	Bulon	Değeri (MPa)	Bulon	Değeri (mm/mm)
D2-1	2	1033,30	5	0,001519
D2-2	3	979,40	1	0,005537
D2-3	4	1040,00	3	0,009691
D2-4	3	1034,70	4	0,160560
D2-4a	4	1034,60	4	0,014041
D2-4b	4	1034,80	4	0,010628

D3 grubuna kuvvet-yerdeğiştirme diyagramları Şekil 3.17' de gösterilmektedir. D3 grubuna ait modelleri incelediğinde D2 grubuna benzer şekilde en büyük kuvvetlere ulaşmadan önce grafik eğrilerinde kayma görülmektedir. Eğrilerdeki kayma bulon çapı

ile bulon deliği çapı arasındaki boşlukla doğru orantılıdır. Ayrıca modellerin ulaştığı en büyük kuvvet değerleri diğer gruplara göre nispeten azalmıştır. Eşdeğer gerilmelerin oluştuğu bölgeler diğer gruplardaki bölgelerle benzerlik göstermektedir D3 grubundaki plakalara ait kuvvet, gerilme değerleri ve yerleri Çizelge 3.17' de gösterilmektedir. Öngerilme dikkate alınmayan modellerde (D3-1 ve D2-1) gerilme değerleri mesnet plakalarında oldukça yaklaşık değerler almaktadır. Öngerilmenin dikkate alındığı durumlarda gerilmeler çekme plakalarında nisbi olarak artmaktadır. Buna göre bulonlardaki öngerilme mesnet plakalarındaki gerilmelerde benzer değerler ortaya çıkarırken, çekme plakalarında ihmal edilmeyecek artışlara neden olmaktadır.



Şekil 3. 17 D3 Grubuna ait kuvvet-yerderdeğiştirme diyagramları

Çizelge 3. 17 D3 Grubu Modellere Ait Plakalarda Kuvvet, Gerilme Değerleri ve Yerleri

	Gerekli Çekme Kuvveti	Mesnet Plakasındaki Maksimum Eşdeğer Gerilme		Çekme Plakasında Maksimum Eşdeğer Gerilme	
	Değeri (kN)	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge	Değeri (MPa)	Oluştuğu Bölge
D3-1	533,03	438,00	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	585,67	2 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-2	-	-	-	-	-
D3-3	516,77	439,50	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	618,33	5 numaralı bulon deliği etrafında
D3-4	550,73	461,20	4 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	536,39	5-6 Numaralı Bulon Delikleri Etrafında
D3-4a	550,23	461,80	1 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	564,88	6 Numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-4b	551,75	467,80	1-2 Numaralı Bulon Deliği Etrafında	625,88	5-6 Numaralı Bulon Delikleri Etrafında
Ortalama Değerler	540,50	453,70	-	586,23	-

D3 Grubuna ait plakalardaki gerinim değerleri incelendiğinde mesnet plakalarındaki maksimum plastik gerinim değerlerinin ortalaması 0,12379 mm/mm iken, çekme plakasında bu değer 0,59073 mm/mm olarak bulunmuştur. Bu veriler Çizelge 3.18' de gösterilmektedir. Bu gerinim değerlerinin açığa çıktığı bölgeler de daha önceki gruplardaki verilerle yaklaşık olarak örtüşmektedir.

Öngerilmenin dikkate alındığı modellerde (D3-4b ve D2-4b), plastik gerinim değerleri az oranda, çekme plakalarında ise belirgin ölçüde azalmıştır.

Çizelge 3. 18 D3 Grubu Modellere Ait Plakalarda gerinim Değerleri ve Yerleri

	Mesnet Plakasındaki Maksimum Plastik Gerinim		Çekme Plakasında Maksimum Plastik Gerinim	
	Değeri	Oluştuğu Bölge	Değeri	Oluştuğu Bölge
D3-1	0,1020	2 numaralı Bulon Deliği Etrafında	0,1112	6 numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-2	-	-	-	-
D3-3	0,0897	2 numaralı Bulon Deliği Etrafında	0,0867	2 numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-4	0,1421	1 numaralı Bulon Deliği Etrafında	2,1915	5-6 numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-4a	0,1423	1 numaralı Bulon Deliği Etrafında	0,2804	6 numaralı Bulon Deliği Etrafında
D3-4b	0,1428	2 numaralı Bulon Deliği Etrafında	0,2838	5-6 numaralı Bulon Deliği Etrafında
Ort.	0,1238	-	0,5907	-

D3 Grubuna ait bulonlardaki eşdeğer gerilme değerlerinin ortalaması ise 1023,3 MPa'dır. Bulonlardaki plastik gerinim değerlerinin ortalaması 0,0071844 mm/mm'dir. Bu veriler Çizelge 3.19'dan alınmıştır. D3 grubuna ait modellerdeki çözümlerde 30 mm yerdeğiştirme değerlerine sadece D3-4 modelinde ulaşılabilmiştir. Ayrıca D3-2 modelinde çözüme ulaşılamamıştır. Bulon gövdesi ile plaka arasındaki boşluk mesafesinin artması ve öngerilme bulunmayan durumlarda teması modelleyen ara elemanlar uygulaması lineer olmayan temaslarda yakınsama sorunlarına sebep olmaktadır.

Çizelge 3. 19 D3 Grubu Modellere ait bulonlarda eşdeğer gerinim değerleri ve yerleri

	Eşdeğer Gerilme		Eşdeğer Plastik Gerinim	
	Bulon	Değeri (mpa)	Bulon	Değeri (mm/mm)
D3-1	6	1021,4	2	0,000797
D3-2	-	-	-	-
D3-3	4	1015,1	3	0,005605
D3-4	3	1034,8	3	0,011224
D3-4a	4	1029,9	4	0,009439
D3-4b	6	1015,3	3	0,008857
Ortalama	-	1023,3	-	0,007184

Çizelge 3.20' de tüm modellere ait bulonlara gelen kesme kuvvetleri değerleri bulunmaktadır. D3-2 modelinde çözüme ulaşılamadığı için Çizelgelerde bu modele ait veriler bulunmamaktadır. Bulonlara gelen kesme kuvvetleri incelendiğinde plakaların ortasında bulunan bulonların (3-4 numaralı bulonlar) diğer bulonlara göre daha fazla

kesme kuvvetlerine maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Buna göre mesnete en yakın bulonlar (1-2 numaralı bulonlar) orta kısımdaki bulonlardan %15, çekme kuvvetlerine en yakın olan bulonlar (5-6 numaralı bulonlar) ise %30 daha az kesme kuvvetlerine maruz kalmışlardır.

Çizelge 3. 20 Bulon kesme kuvvetleri

		Bulon kuvvetleri (kN)					
	Model	Bulon 1	Bulon 2	Bulon 3	Bulon 4	Bulon 5	Bulon 6
D0	D0-1	90,35	81,91	97,73	107,92	79,95	91,33
	D0-2	92,99	92,98	112,80	112,82	91,67	91,67
	D0-3	77,64	69,38	84,54	90,86	64,30	72,66
	D0-4	76,66	76,69	84,10	84,17	67,03	67,00
	D0-4a	77,80	77,80	86,54	86,57	67,68	67,74
	D0-4b	81,67	81,91	94,99	95,21	75,78	75,29
D1	D1-1	90,31	86,02	96,25	96,00	90,69	93,90
	D1-2	89,64	89,93	103,95	104,10	87,90	87,03
	D1-3	81,45	79,73	95,58	96,28	72,06	72,85
	D1-4	81,30	82,26	95,60	96,23	71,11	69,70
	D1-4a	83,84	84,57	97,49	98,10	72,51	71,77
	D1-4b	81,85	81,84	96,22	96,69	74,15	73,76
D2	D2-1	83,86	83,35	99,10	97,85	84,34	83,32
	D2-2	88,99	86,40	99,38	96,96	79,69	78,17
	D2-3	73,14	73,16	89,10	89,36	62,28	62,23
	D2-4	80,27	80,07	92,88	93,81	66,85	66,49
	D2-4a	82,56	82,47	95,77	96,41	69,94	69,88
	D2-4b	81,93	81,82	94,35	95,20	71,29	71,22
D3	D3-1	73,96	77,86	93,86	89,83	76,01	73,54
	D3-2	-	-	-	-	-	-
	D3-3	57,73	67,88	76,55	75,27	56,16	55,53
	D3-4	80,73	80,44	91,94	92,47	66,57	66,55
	D3-4a	77,29	77,18	89,16	90,02	69,39	69,40
	D3-4b	79,07	78,87	89,76	90,42	70,05	69,71

Genel anlamda bulonlu birleşimlerin sonlu eleman analizlerinden şu sonuçlara erişilmiştir:

- Bütün grupların 30 mm yerdeğiştirme yapması için gereken kuvvetler incelendiğinde bulon deliği ile bulon çapı arasındaki mesafe arttıkça birleşimin rijitliğini kaybettiği gözlenmiştir. Buna göre D0 ile D1 grubu modeller arasıda %3, D0 ile D2 arasında %5,8 ve D0 ile D3 arasında %10,35 oranında rijitlik kayıpları oluşmuştur.

- Tüm birleşim ele alındığında en büyük plastik gerinim değerleri çekme levhalarında, çekme kuvvetlerine en yakın bulon delikleri etrafında gözlemlenmiştir.
- 3 sıra bulon arasında en büyük kesme kuvvetlerine ortada bulunan bulonlar maruz kalırken mesnete en uzak bulonlar en az kesme kuvvetlerine maruz kalmışlardır.
- Bulon çapı ile bulon deliği arasındaki mesafe arttıkça bulonlardan plakalara gerilme akışı etkilenerek bulondaki gerilme yığılmaları azalmaktadır. 1 mm' den az boşluk bulunan modellerdeki bulonlarda gerilme yığılmaları daha fazla gözlenmektedir.
- Bulon çapı ile bulon deliği arasında mesafe bulunmayan durumlarda bulon gövdesi ile plaka arasındaki sürtünmeli temas özellikleri ihmal edilebilir.

BÖLÜM 4

TAKVİYELİ ALIN LEVHALI BULONLU KİRİŞ KOLON BİRLEŞİMİ

Alın levhalı birleşimlerin sonlu elemanlar yöntemiyle irdeleyebilmek için literatürden deneysel bir çalışma [62] seçilmiştir. Çalışmada hazırlanan 2 adet deney numunesi FEMA 350 [50]' de belirlenen çevrimsel yükleme şartlarına uyularak yüklenmiştir. Sonlu elemanlar çalışması olarak bu 2 çalışma birebir oluşturulmuştur. Bunun yanısıra 2 farklı model de oluşturulmuştur. Bu modellerden elde edilen moment-dönme ilişkileri, yük taşıma kapasiteleri ve göçme modları birbirleriyle karşılaştırılarak genel sonuçlar oluşturulacaktır. Sonlu eleman modelleri Bölüm 3'teki ön çalışmalarla belirlenen yöntemlere sadık kalınarak yapılmıştır. Benzer şekilde malzeme, geometri, temas doğrusal olmayan davranışları dikkate alınmıştır.

4.1 Malzeme Özellikleri

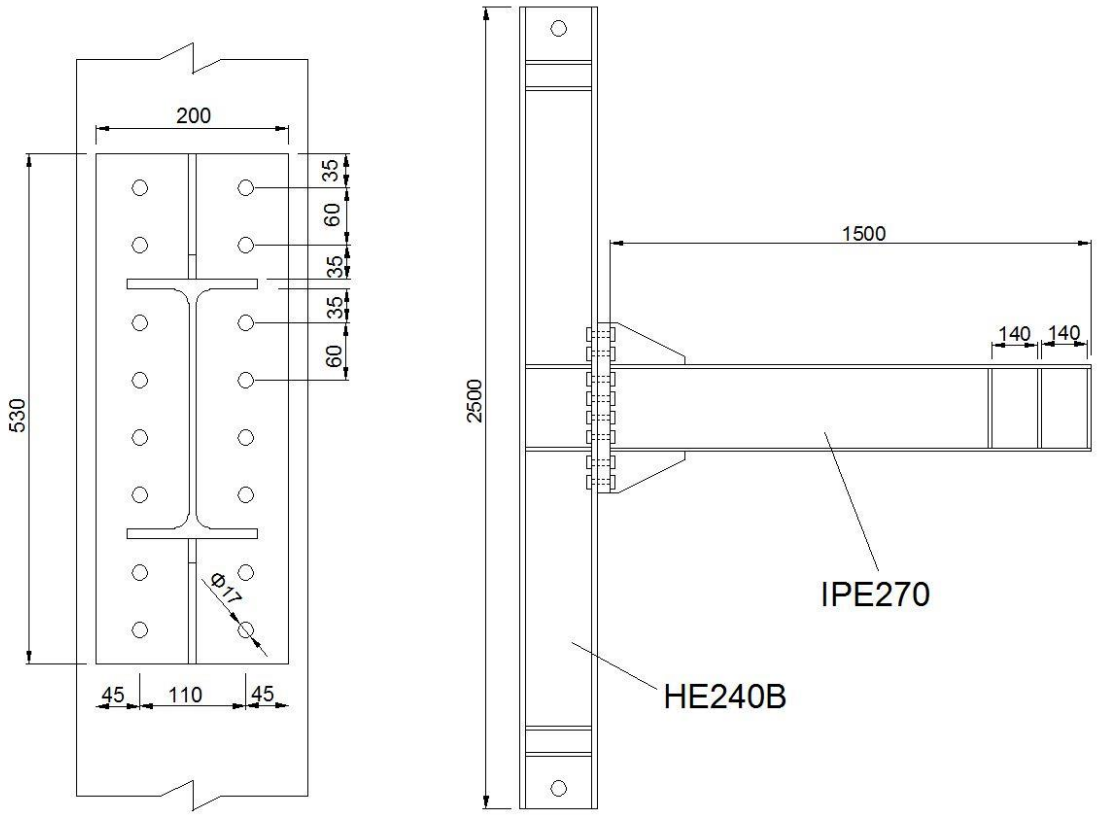
Birleşimlerin alın levhası ve takviye levhaları ST37 (S255JR), profilleri ST52 (S355J2) olarak seçilmiştir. Ayrıca bulonlar 10.9 kalitesindedir. Bu malzemelerin mukavemet özellikleri Çizelge 4.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 1 Hazırlanan modellere ait malzeme mukavemet değerleri [39]

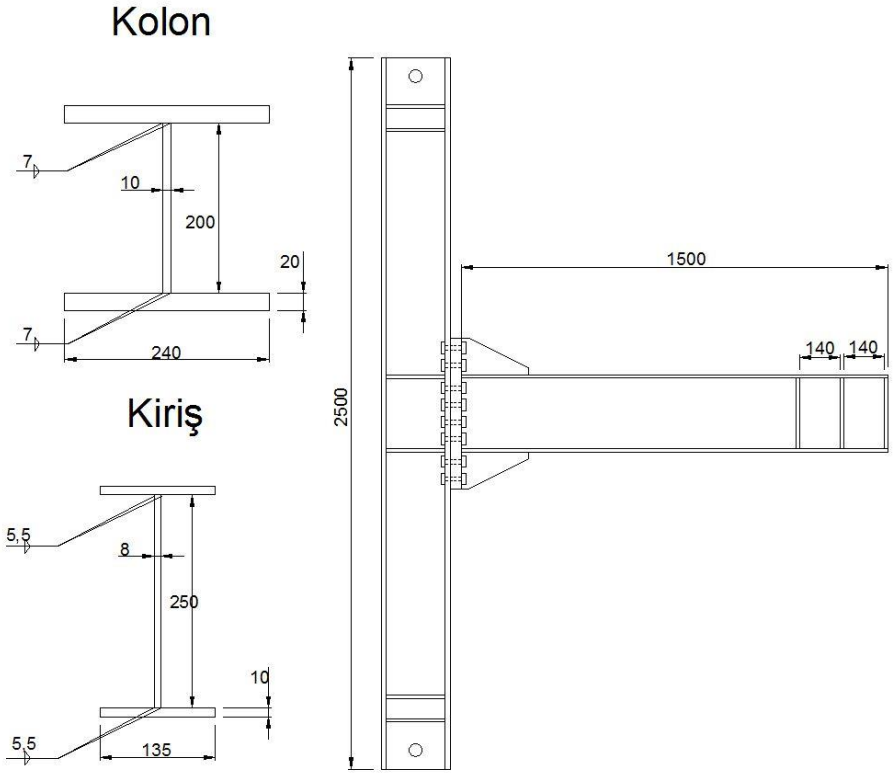
	Gerilme (MPa)	Gerinim (mm/mm)
Bulon	794	0,00386
	1035	0,01350
	1035	0,03090
	1048	0,20000
S235JR (Plakalar)	262	0,00123
	262	0,01403
	476	0,15300
S355J2 (Profiller)	361	0,00178
	361	0,01960
	488	0,21340

4.2 Model Geometrileri

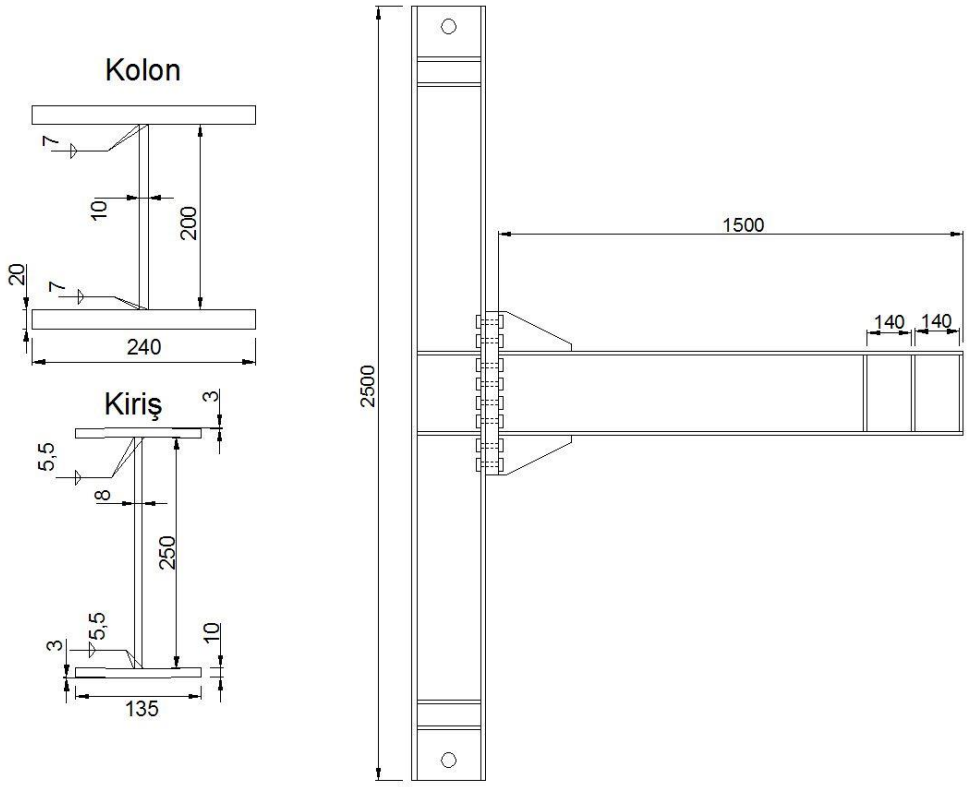
Alın levhalı birleşim tiplerinden ikisinin boyutları literatürdeki [62] çalışmadan alınmıştır. İki adet geometriden ilki hadde profillerle oluşturulmuş takviyeli alın levhalı kolon kiriş birleşim tipi, diğeri ise yapma profillerle oluşturulmuş takviyeli alın levhalı birleşim tipidir. Hadde profillerle oluşturulan takviyeli alın levhalı birleşim TALB-P1 ismiyle anılacaktır. Yapma profillerle oluşturulan birleşim ise TALB-Y1 ismiyle anılacaktır. Literatürden farklı oluşturulan modellerden biri geometrik olarak TALB-P1 ile aynı fakat kirişin mesnetlenme şartları farklıdır. Bu nedenle, bu model TALB-P2 ismiyle anılacaktır. Dördüncü sonlu eleman modeli ise yapma profillerde kaynakla birleştirme işlemlerinden dolayı profil başlıklarının yatayda 3 mm eğrildiği durum düşünülerek oluşturulmuş model olup, bu modelin ismi de TALB-Y2 olarak anılacaktır. Modellerin geometrik detayları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' te gösterilmektedir. Alın levhası ile kolon başlığı birbirine M16 bulonlarıyla bağlanmış olup, bulon deliği ile bulon çapı arasında 1 mm fark vardır. Alın levhası kalınlığı tüm birleşimlerde 40 mm'dir. Alın takviye levhası bütün modellerde 8 mm kalınlığındadır. Tüm modellerde kolon ve kirişlerde bulunan berkitme levhaları kalınlığı 12 mm'dir. Design Modeller ile hazırlanmış 3 boyutlu geometri Şekil 4.5' te görülmektedir.



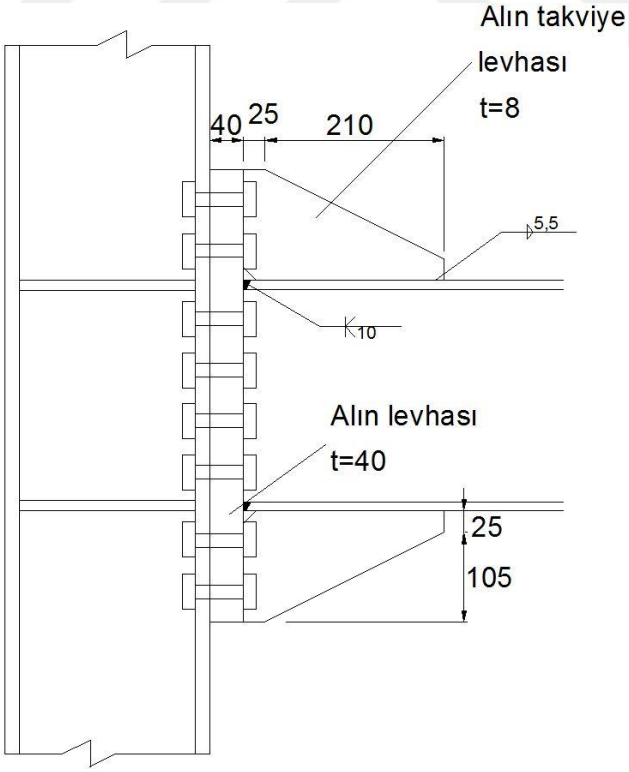
Şekil 4.1 TALB-P1 ve TALB-P2 modellerine ait geometri



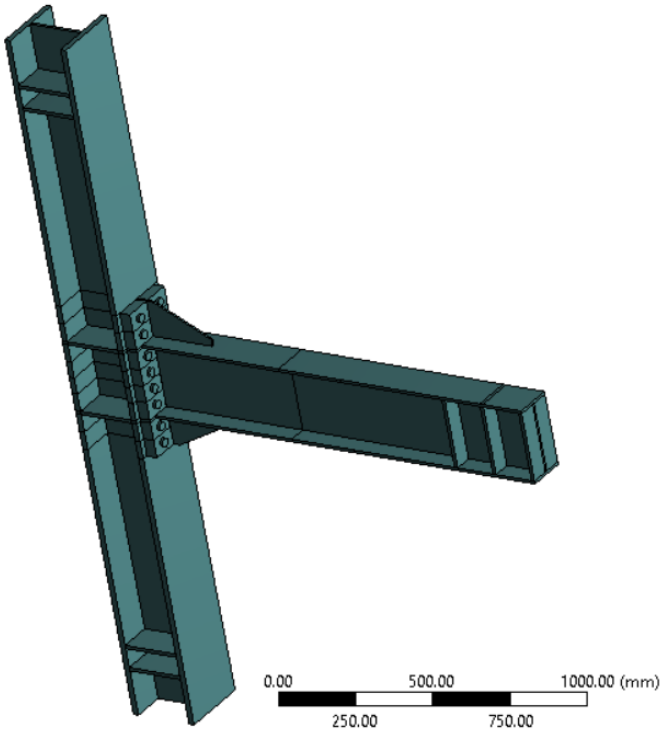
Şekil 4. 2 TALB-Y1 modeline ait geometri



Şekil 4. 3 TALB-Y2 modeline ait geometri



Şekil 4. 4 Alın levhası takviye detayı

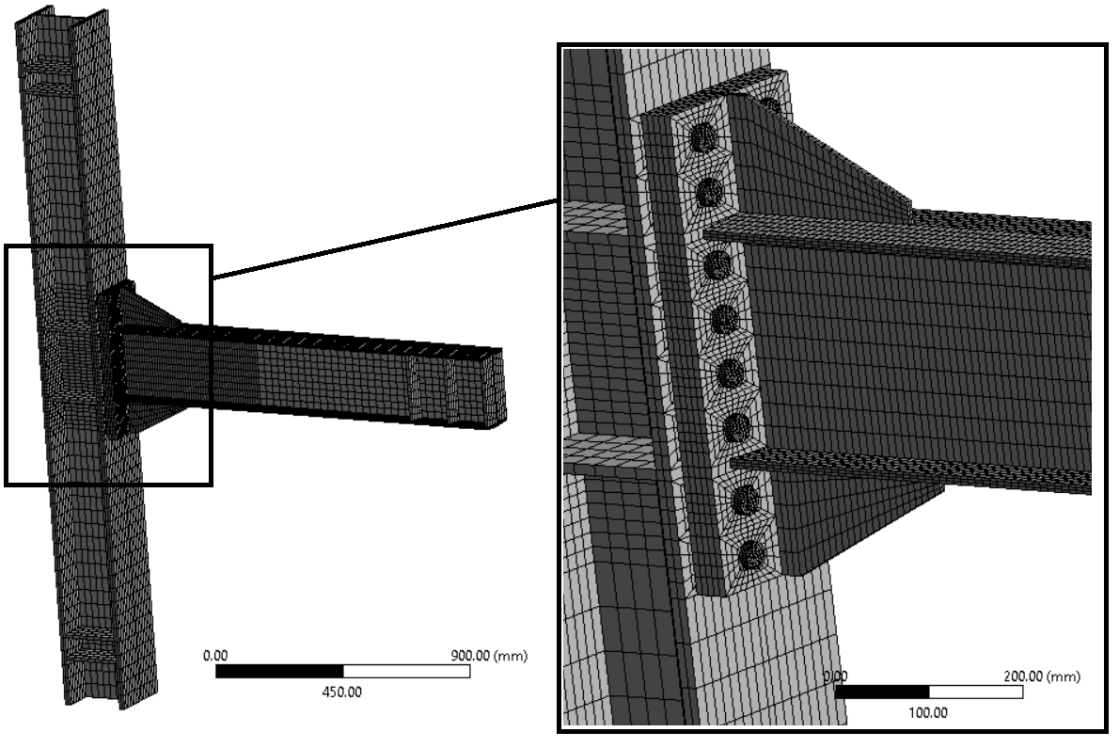


Şekil 4. 5 Ansys Workbench Design Modeller[59] ile hazırlanan 3 boyutlu model

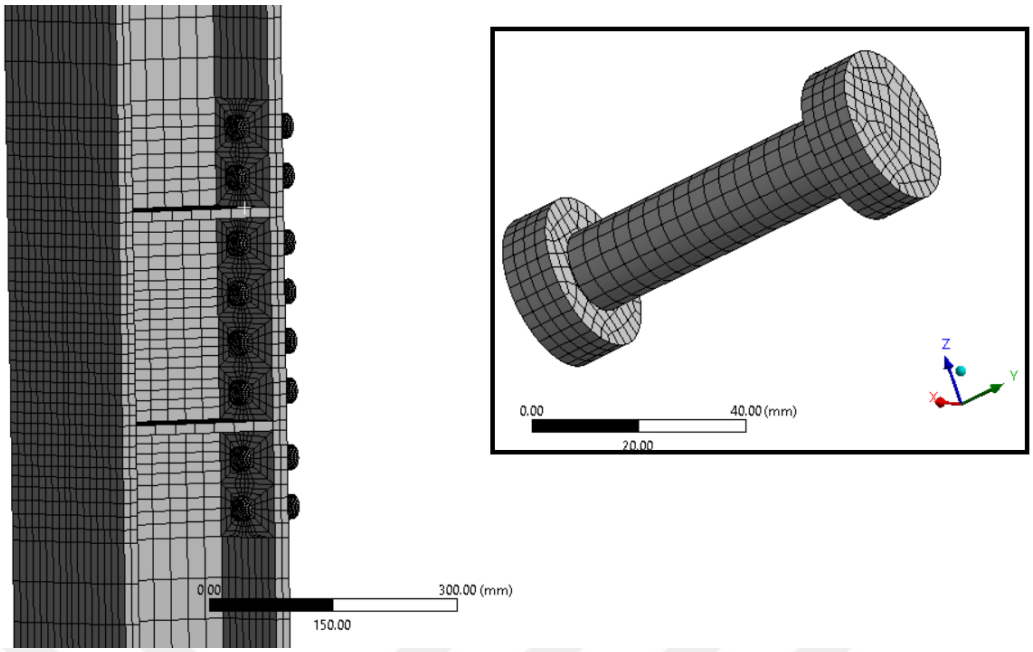
4.3 Sonlu Elemanlar Ağ Yapısı

Sonlu elemanlar ağ yapısı, oluşturulan modelin geometrisiyle doğrudan ilgili ve çözüm için önemli bir adımdır. Sonlu eleman ağ yapısının genel mantığı, Bölüm 3.3.4' te detaylıca açıklandığı için bu kısımda alın levhalı modellerde yapılan uygulamalar üzerinde durulacaktır. Alın levhalı modeller, Bölüm 3' te açıklanan modellere göre daha büyük geometrilere sahip olduğundan, sık ağ yapısı problem için görece daha önemli olan alın levhası ve kolon başlığında bulunan bulon delikleri etrafında bulunmaktadır. Birleşim bölgesinden uzaklaşıldıkça kolon ve kirişin ağ yapısı seyrekleştirilmiştir. Bunun birkaç sebebi vardır. İlk olarak birleşim bölgesi dışındaki bölgeler sürekli ve daha basit geometriye sahip olduğundan kenar boyutlandırılması (edge sizing) uygulamalarıyla kolayca homojen bir ağ yapısı elde edilebilir. Ayrıca sistem genel olarak ele alındığında bu bölgelerin birleşimin davranışına etkileri alın levhası ve kolon ile kirişin birleştiği bölgelere nazaran daha azdır. Bu sebeplerle çözüm süresinden tasarruf etmek, bilgisayar gücünü etkili kullanmak için bu bölgelerde sonlu eleman yapısı seyrektir. Kolonlarda alın levhasından uzaklaşan bölgelerde kenar boyutlandırması (edge sizing) uygulaması 50 mm olarak yapılmıştır. Kirişlerde ise bu uygulama iki aşamada yapılmış olup, alın

levhasından kiriş ucuna doğru 550 mm boyunca, plastik mafsal davranışı bu bölge içinde gözleneceği için 10 mm, bu bölgeden sonra ise 30 mm olarak tanımlanmıştır. Alın levhasında ve kolonun panel bölgesi ile kolon başlıklarında yaklaşık 10x10x10 mm boyutunda kübik elemanlar oluşacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Bulon deliklerinin bulunduğu kolon başlığı ve alın levhasında süreksizlikler oluştuğu için bu bölgelere face meshing uygulaması yapılmıştır. Bulon gövdesinin çevresi yaklaşık 3 mm olacak şekilde parçalara ayırarak bölünmüştür. Ayrıca bulon ile bulon deliği arasında teması modelleyen ara eleman (contact sizing, 3 mm) uygulamaları da yapılmıştır. Bulonlarda daha homojen ağ yapısı oluşturmak için multizone ataması yapılmıştır. 4 modelin sonlu eleman ağ yapıları aynı teknikler kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.6' te bu ağ yapıları görülmekedir. Kolon panel bölgesinin diğer bölgelere göre daha sık ağ yapısı ve bulonlara ait ağ yapısı Şekil 4.7' da gösterilmektedir. Modellerin sonlu eleman sayıları ve düğüm noktaları Çizelge 4.2'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 6 TALB-Y2' ye ait sonlu eleman ağ yapısı



Şekil 4. 7 Kolon panel bölgesi ve bulonlarda ağ yapısı

Çizelge 4. 2 Modellere ait sonlu eleman sayıları ve düğüm noktası sayıları

	TALB-P1	TALB-P2	TALB-Y1	TALB-Y2
Eleman sayısı	48486	48486	38944	41413
Düğüm noktası sayısı	261513	261513	215363	227177

4.4 Temas Özellikleri

Alın levhası ile kolon yüzeyinde sürtünmeli temas olmasından dolayı bu bölgelerde sürtünmeli temas özellikleri dikkate alınmıştır. Sürtünmeli yüzeylere ait sürtünme katsayısı 0,44 olarak literatürden [39] alınmıştır. Bulon başlıkları ile plakalar arasında da sürtünmeli temas özellikleri dikkate alınmıştır. Bulonlar çapları ile bulon delikleri çapları arasında 1 mm boşluk bulunduğu için bu bölgelerde sürtünmeli temas özelliklerine ilave Bölüm 3.1'de ve Bölüm 3.3.3' te irdelenmiş olan 1 mm çaplı pinball (add offset, no ramping) uygulamaları yapılmıştır. Kiriş ile alın levhası ve takviyelerin diğer elemanlarla kaynaklı birleşimlerindeki teması tanımlamak için birbirine tam bağlı temas özelliği olan bonded uygulaması yapılmıştır. Belirtilen özellikler tüm modellerde özdeştir.

4.5 Yüklemeler Ve Birleşimlerin Mesnetlenmesi

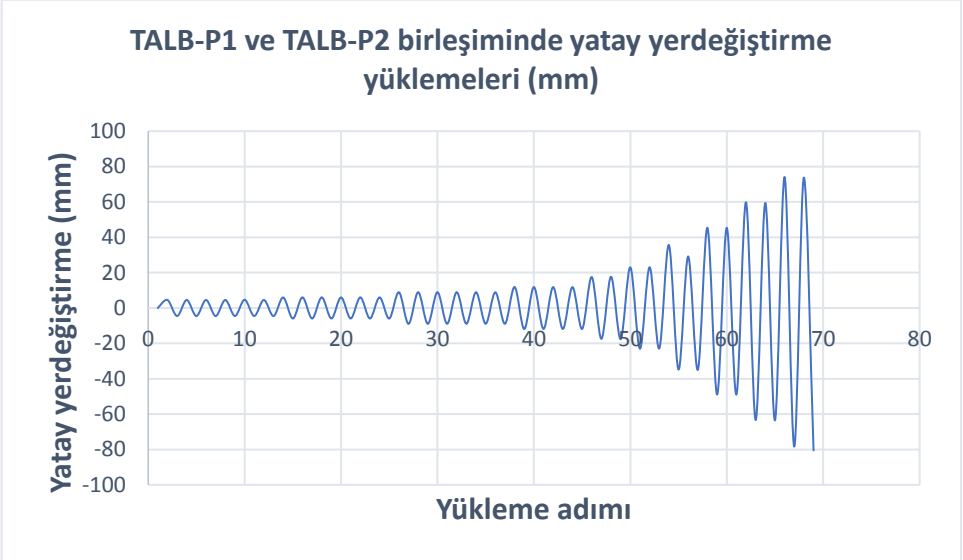
Birleşimin mesnetlenmesi kolon uçları ile yapılmaktadır. Kolonun alt ve üst uçları ankastre olarak bağlanmıştır. TALB-P1, TALB-Y1 ve TALB-Y2' de kiriş alın levhası yüzünden 745 mm uzaklıkta alt ve üst başlıklarının yatayda hareketi de engellenmiştir. TALB-P2' de kiriş başlıklarında yatay yönde hareket engellenmemiştir. Bütün bulonlara M16 bulon için gerekli olan 100 kN öngerilme kuvveti uygulanmıştır. Literatürden alınan çalışma [62] dikkate alınarak çevrimsel yükleme yapılmıştır. Çalışmada kirişler alın levhası yüzünden 1335 mm mesafeden FEMA 350' de belirtilmiş olan çevrimsel yükleme ile yüklenmiştir. Ancak çalışmada beklenmeyen bir durum oluşarak kolon üst mesneti tam tutulu olması gerekirken istenen ankastrelik sağlanamadığı için birleşimde serbest dönmeler oluşmuştur. Bu nedenle FEMA 350' de belirtilen dönme değerlerinden Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da belirtilen dönme değerleri çıkarılıp elde edile değerlerin yükleme noktasından kolonun eksenine olan mesafesine bölünmesiyle elde edilen Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' deki yatay yerdeğiştirme yüklemeleri yapılmıştır. Yükleme 70 adımda gerçekleşmektedir. Bu adımlardan ilki bulonların öngerilmesi daha sonraki adımlar ise kirişin artan dönmelerle pozitif ve negatif yönde yüklenmesidir. Yüklemeler yerdeğiştirme şeklinde etkitilmiştir.



Şekil 4. 8 TALB-P1 ve TALB-P2 numunelerinde deneysel şartlardan kaynaklanan serbest dönme değerleri



Şekil 4. 9 TALB-Y1 ve TALB-Y2 numunelerinde deneysel şartlardan kaynaklanan serbest dönme değerleri



Şekil 4.10 TALB-P1 ve TALB-P2 birleşimlerinde yerdeğiştirme yüklemeleri



Şekil 4. 11 TALB-Y1 ve TALB-Y2 birleşimlerinde yerdeğiştirme yüklemeleri

4.6 Analiz Ayarları

İkinci mertebe etkileri, malzemeden kaynaklanan doğrusal olmayan davranış ve temas özelliklerinden ortaya çıkan doğrusal olmayan davranışlar tüm modellerde özdeş olarak dikkate alınmıştır. Bu nedenle yüklemeler tek seferde değil alt adımlara bölünerek yapılmıştır. Bu adımlar Çizelge 4.3' te gösterilmektedir

Çizelge 4. 3 Yükleme alt adımları

Çevrimsel yükleme adımları	ilk adım	En az alt adım	En çok alt adım
2-…49	10	10	100
50-…57	20	20	150
58-…61	25	25	150
62-…70	40	40	200

4.6.1 Analiz Sonuçlarinin İrdelenmesi

Çevrimsel yükleme altında sonlu eleman sonuçları göçme modları, kuvvet yer değiştirme eğrileri, moment- dönme eğrileri çevrimsel yüklemede tüketilen enerji, bulonlardaki kuvvetler ve eşdeğer gerilmeler (von- Misses) bakımından incelenecektir.

Bölüm 3'te bahsi geçen malzeme gerilme ve gerinim değerlerinin üzerinde sonuçlar ortaya çıkması durumu bu bölümdeki çözümler için de geçerlidir. Bu durumun sebebi

programın en son adımlar için tanımlanan elastisite modülüne sadık kalarak gerçekçi olmayan gerilme- gerilme sonuçları hesaplamasıdır.

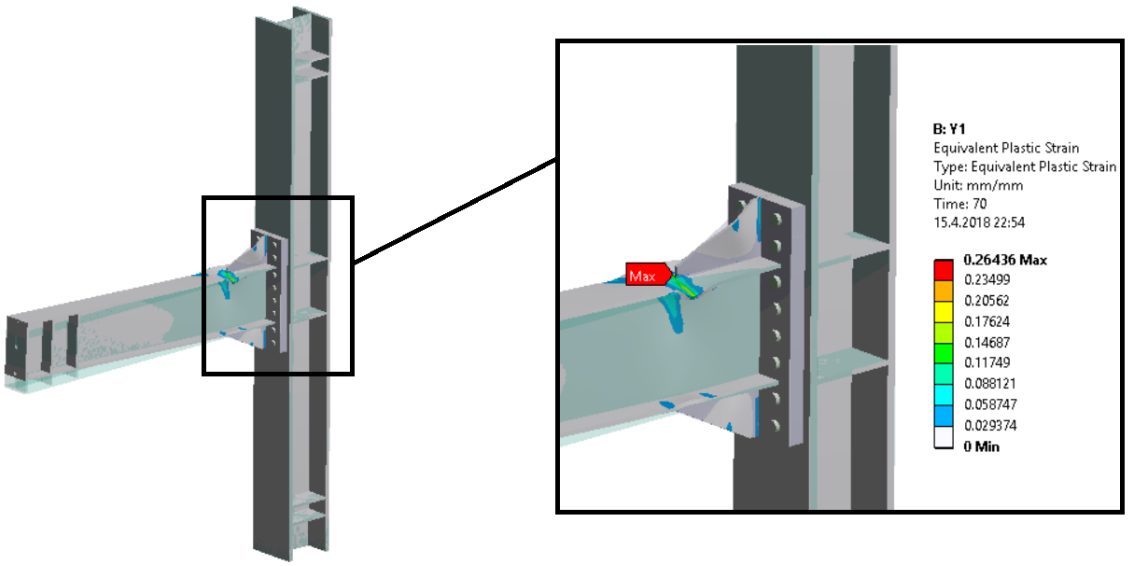
4.6.2 Göçme Modları

Depreme dayanıklı yapı tasarımı açısından göçme veya plastikleşme mekanizmalarının birleşimden uzakta, kiriş üzerinde oluşması hedeflenir. TALB-P1, TALB-P2, TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerinde plastik gerinim diyagramları Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15' te gösterilmektedir.

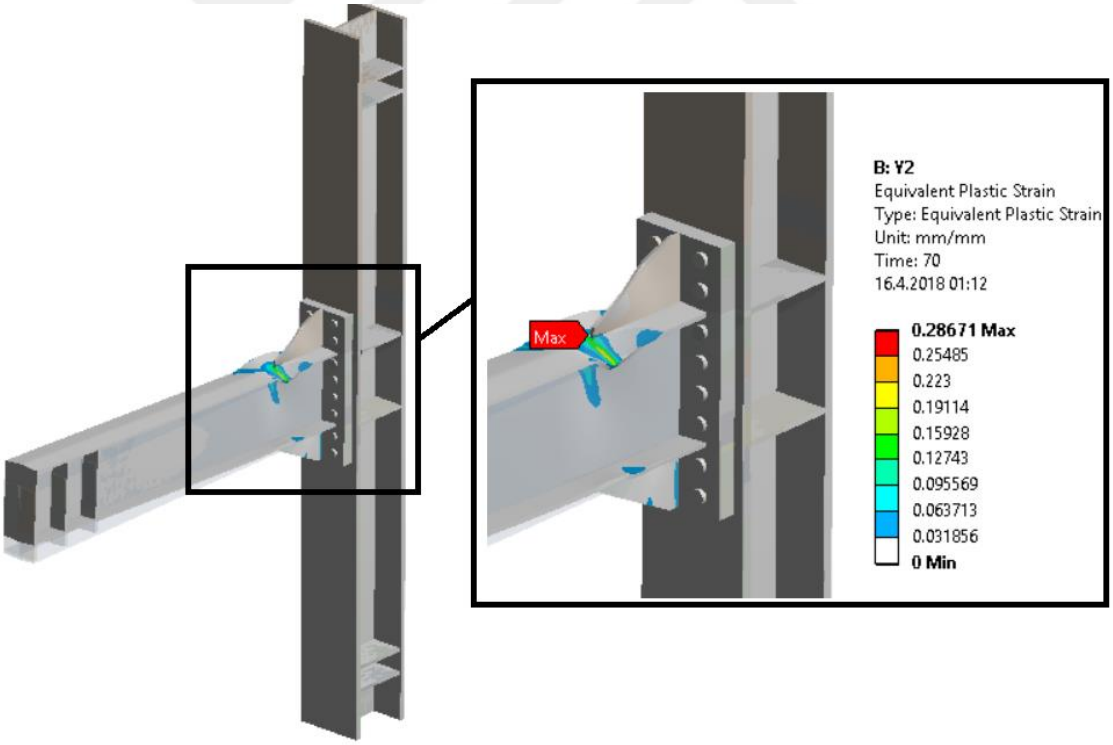
Bütün modellerde ortak olarak plastikleşen bölge, birleşimden en az alın levhası takviyesi kadar uzakta oluşmuştur. TALB-P1 ve TALB-P2 modellerinde TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerine göre daha fazla plastik gerinim oluşmuştur. Ayrıca TALB-P1 ve TALB-P2 modellerinde en büyük plastik gerinim kiriş başlıklarında ve kiriş gövdesinde alın levhasından yaklaşık 250 mm uzaklıkta gözlenirken, TALB-Y1 ve TALB-Y2' de ise alın levhası takviyesinin kiriş ile birleştiği noktalarda, alın levhasından yaklaşık 230 mm uzaklıkta gözlenmiştir.

Mesnetlenme özellikleri dışında tüm özellikleri aynı olan TALB-P1 ve P2 modellerinde mesnetlenmenin kiriş davranışına etkisi Şekil 4.14 ve Şekil 4.15' te gözlenmektedir. TALB-P2 modeli kiriş başlıklarından yatayda tutulmadığı için yatay ekseninden saparak plastik gerinim değerlerinde artış oluşmuştur. TALB-P2 modelinde çevrimsel yüklemeler tamamlandığında en büyük plastik gerinim değeri 0,4927 mm/mm'dir. Bu değer kiriş başlığında alın levhası takviyesinin yakınında oluşmuştur. TALB-P1 modelinde ise en büyük plastik gerinim değeri 0,4850 mm/mm'dir. Bu plastik gerinim değerleri tanımlı malzeme için kopma gerinim değerinin üzerindedir.

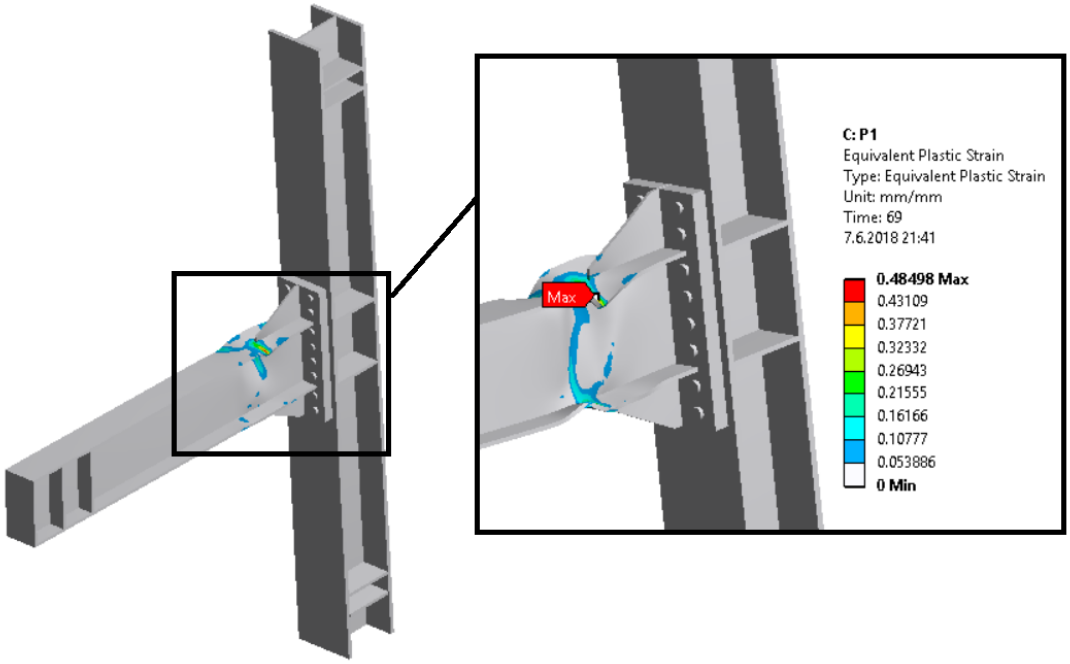
TALB-Y1' de çevrimsel yüklemenin sonundaki en büyük plastik gerinim değeri 0,2644 mm/mm'dir. TALB-Y2' de ise bu değer 0,2867'dir. Yapma profilli modellerde kaynaklardan dolayı başlık levhalarındaki eğilmenin göz önünde bulundurulduğu durumda başlıklardaki plastik gerinim artmıştır. Bu plastik gerinim değerleri yapma kiriş için tanımlanan malzemenin kopma gerinim değerinin üzerindedir.



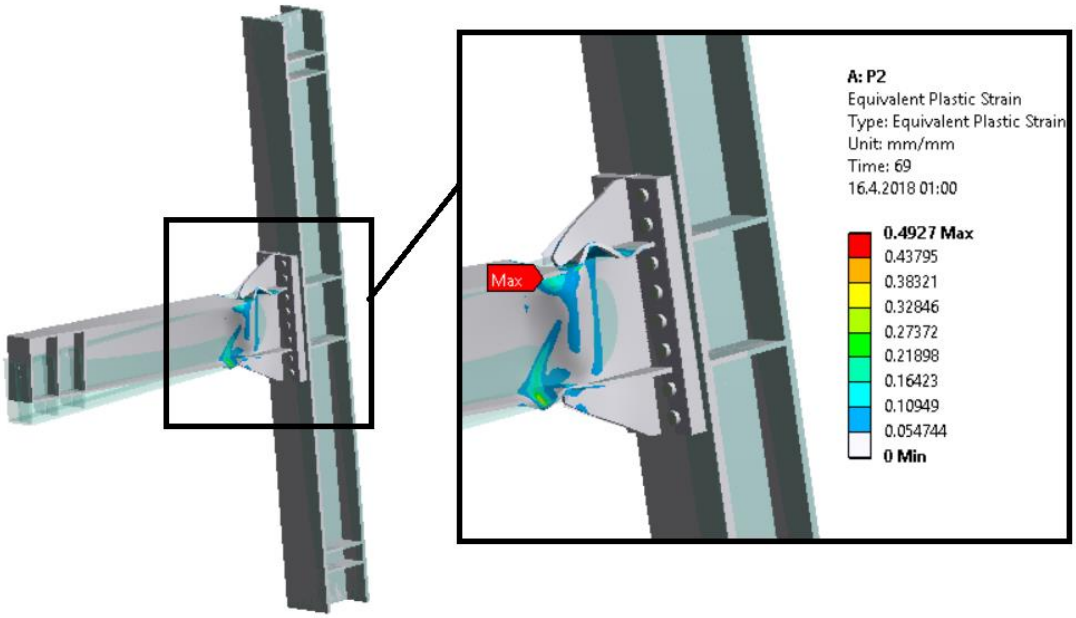
Şekil 4. 12 TALB-Y1' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı



Şekil 4. 13 TALB-Y2' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı



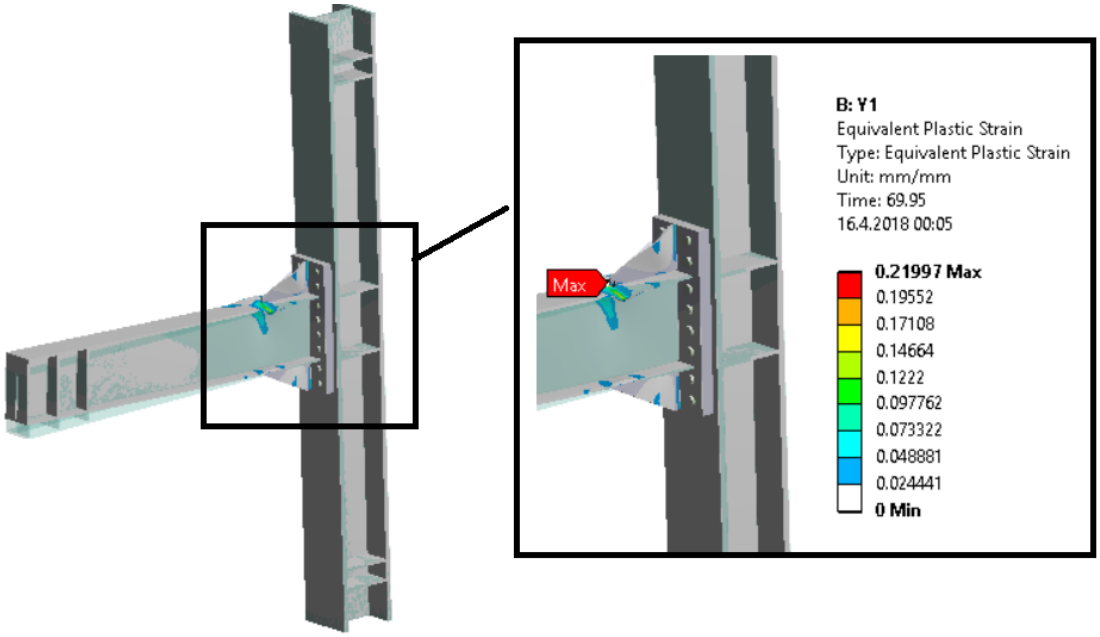
Şekil 4. 14 TALB-P1' e ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı



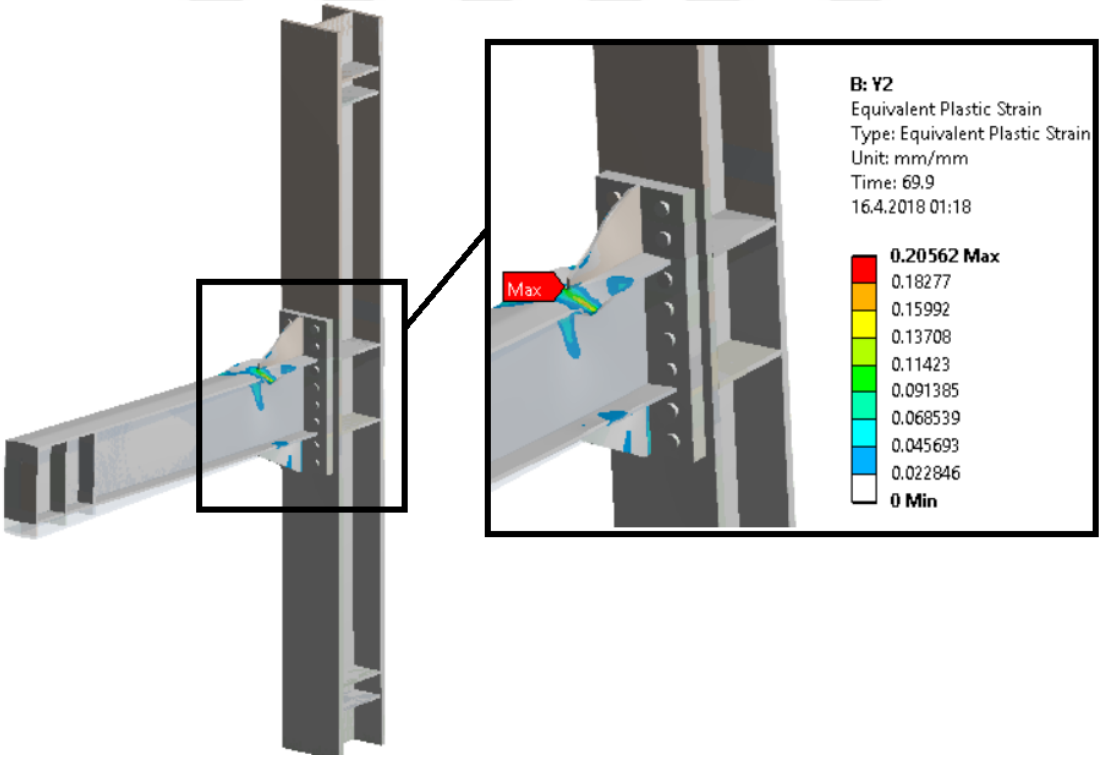
Şekil 4. 15 TALB-P2' ye ait eşdeğer plastik gerinim diyagramı

Belirtilen maksimum tüm birleşimlerde gerinim değerleri, tanımlanan malzemelerde maksimium kopma gerinim değerlerinden yüksektir. Bundan dolayı, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19' da tanımlanmış kopma birim şekildeğiştirme değerleri ve bu değerlerin ortaya çıktığı adımlar gösterilmektedir. Burada aynı plastik gerinim

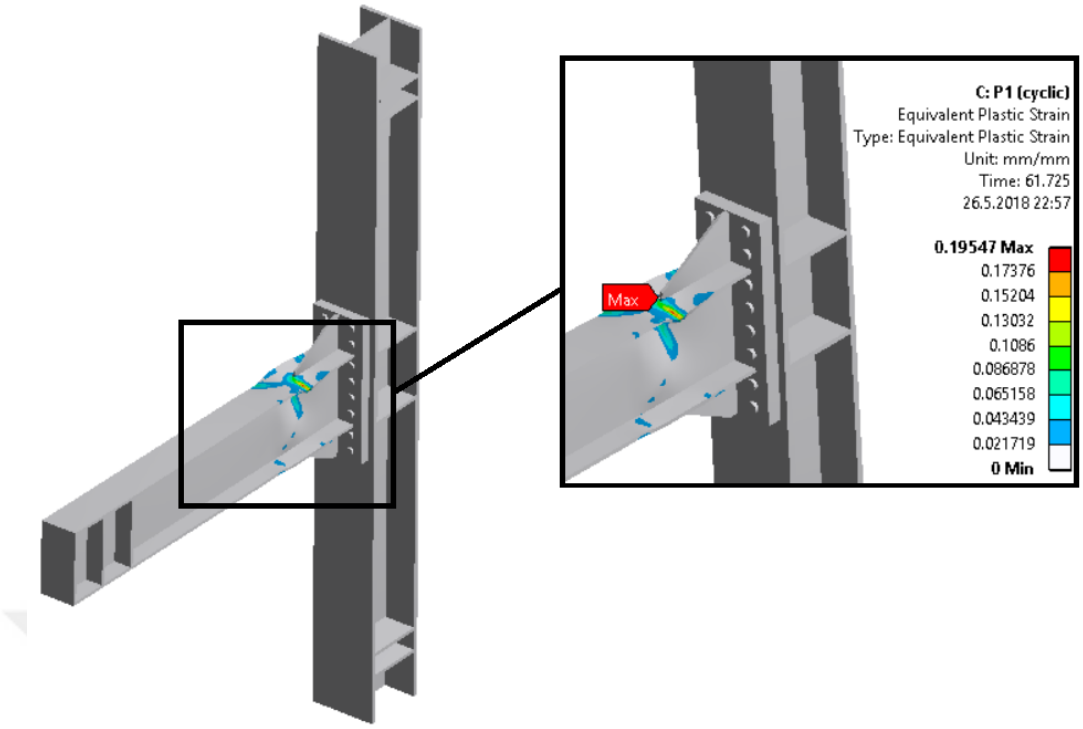
durumlarında da TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerinde daha fazla plastik gerinim olduğu görülmektedir.



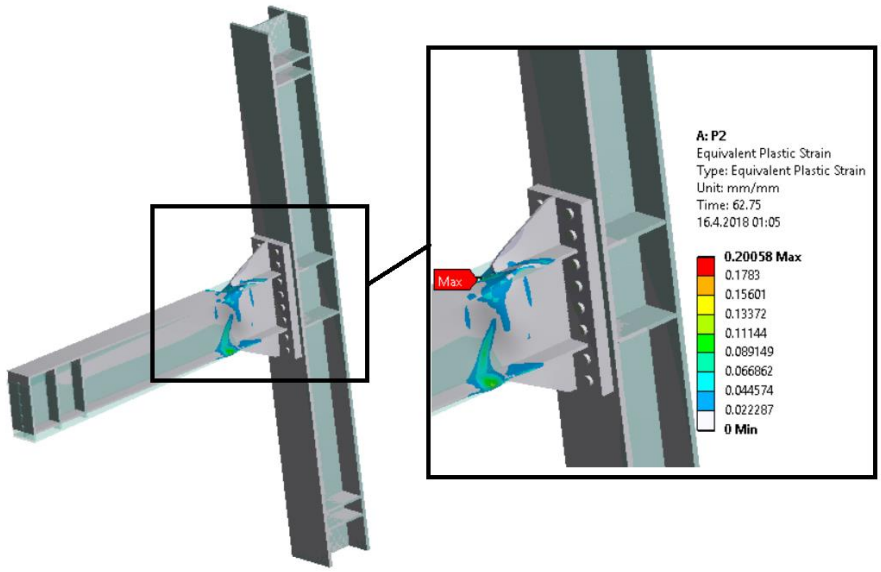
Şekil 4.16 TALB-Y1 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı



Şekil 4. 17 TALB-Y2 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı



Şekil 4. 18 TALB-P1 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı

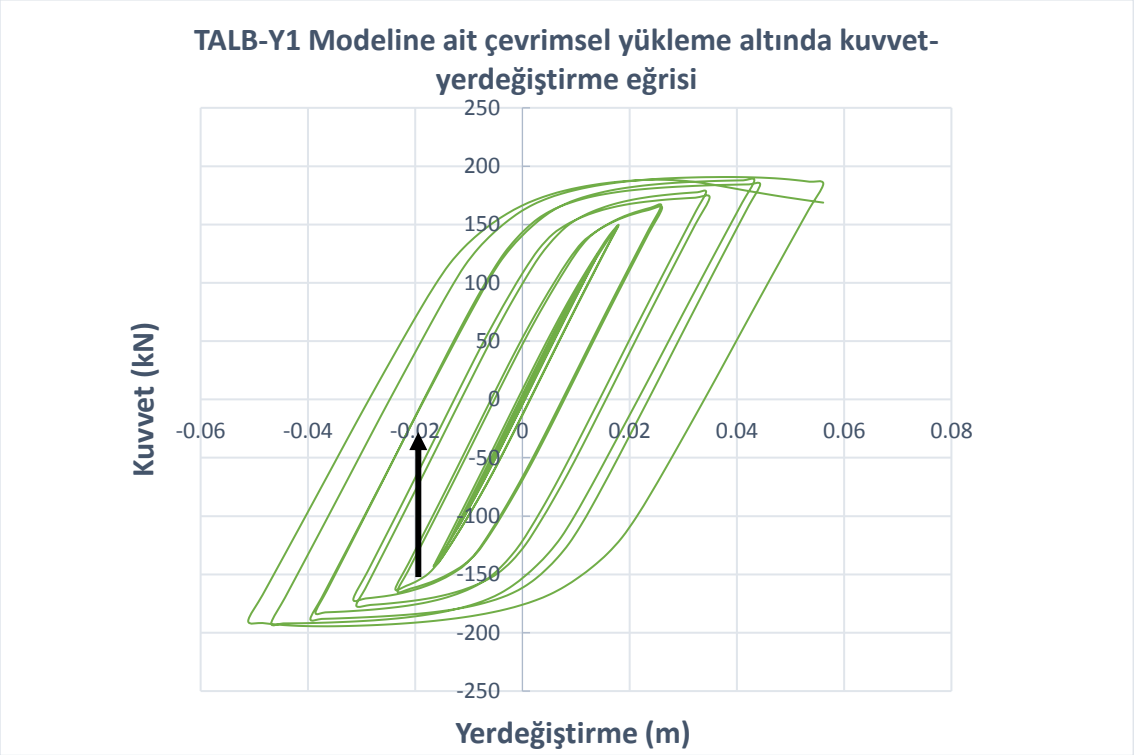


Şekil 4. 19 TALB-P2 0,2 değerindeki eşdeğer plastik gerinim diyagramı

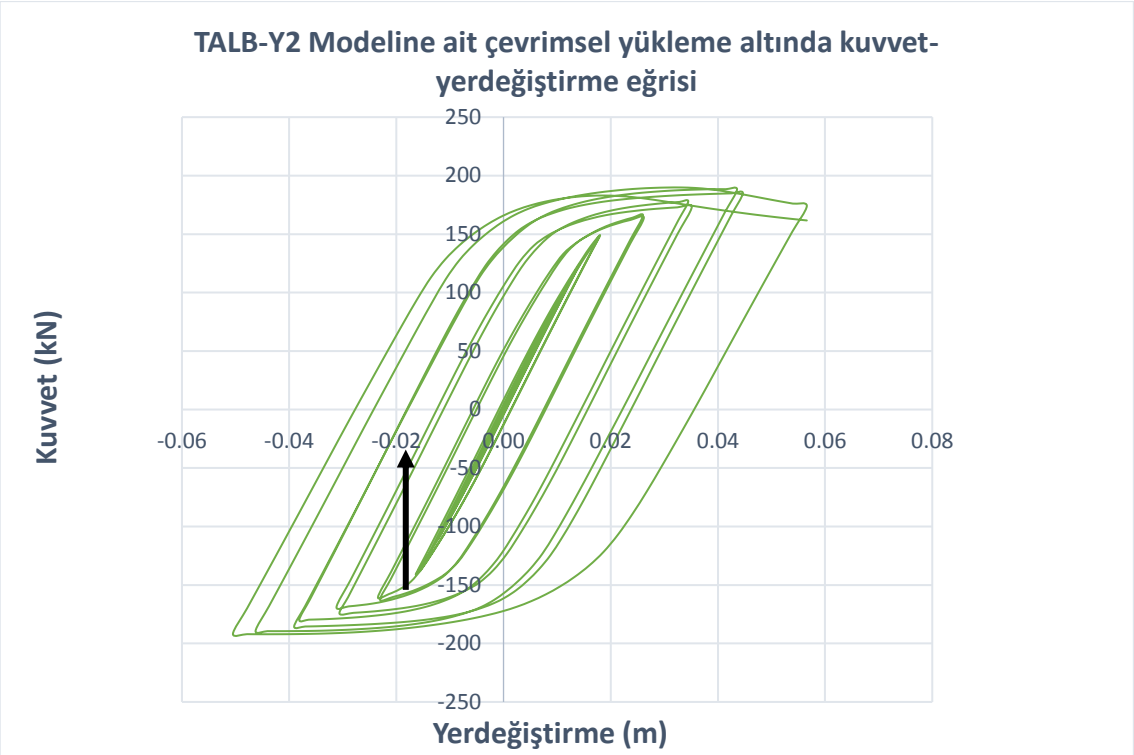
4.6.3 Birleşimlerin Maksimum Kuvvet Kapasiteleri

Birleşimlere uygulanan kuvvet karşılığında oluşan yerdeğiştirmelerin diyagramları şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23' de gösterilmektedir. Bu diyagramlar yardımıyla

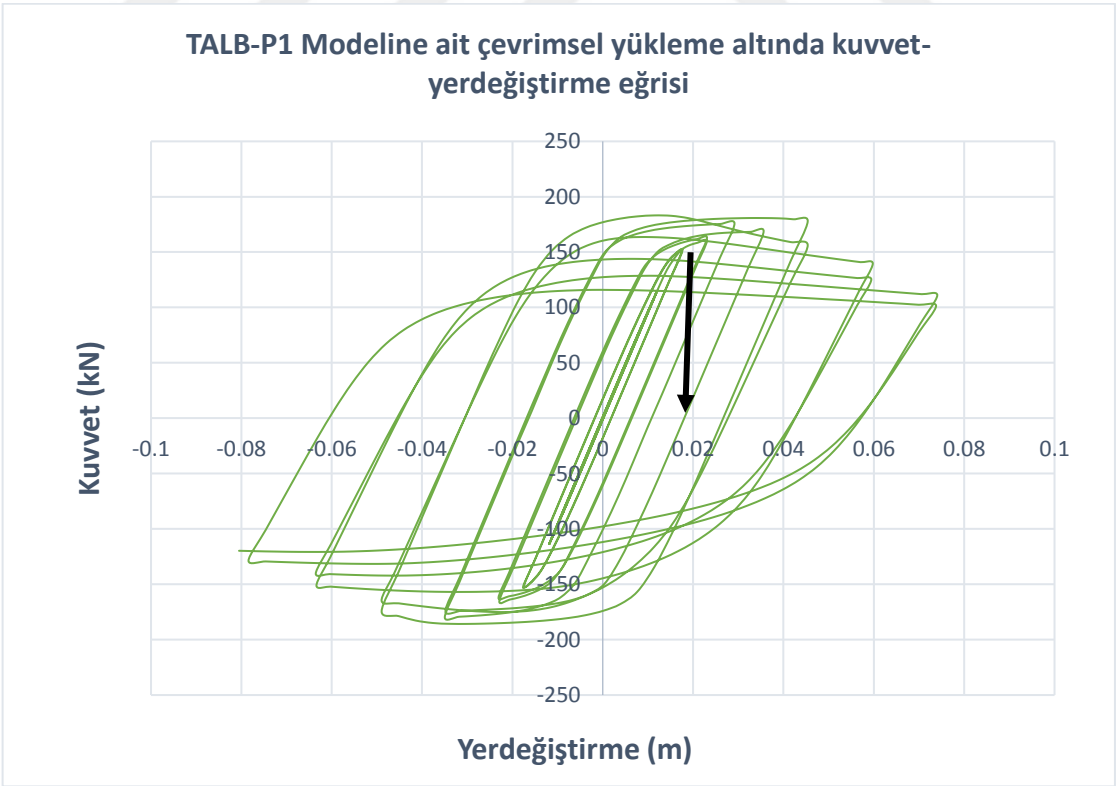
birleşimlerin hangi yükleme adımında yük taşıma kapasitelerinde büyük miktarda azalma olduğu tespit edilmiştir. Buna göre TALB-P1 birleşimi 50. Adımda, TALB-P2 birleşimi 49. Adımda, TALB-Y1 birleşimi 55. Adımda ve TALB-Y2 birleşimi 54. Adımda yük taşıma kapasitelerinde azalmalar gözlenmiştir.



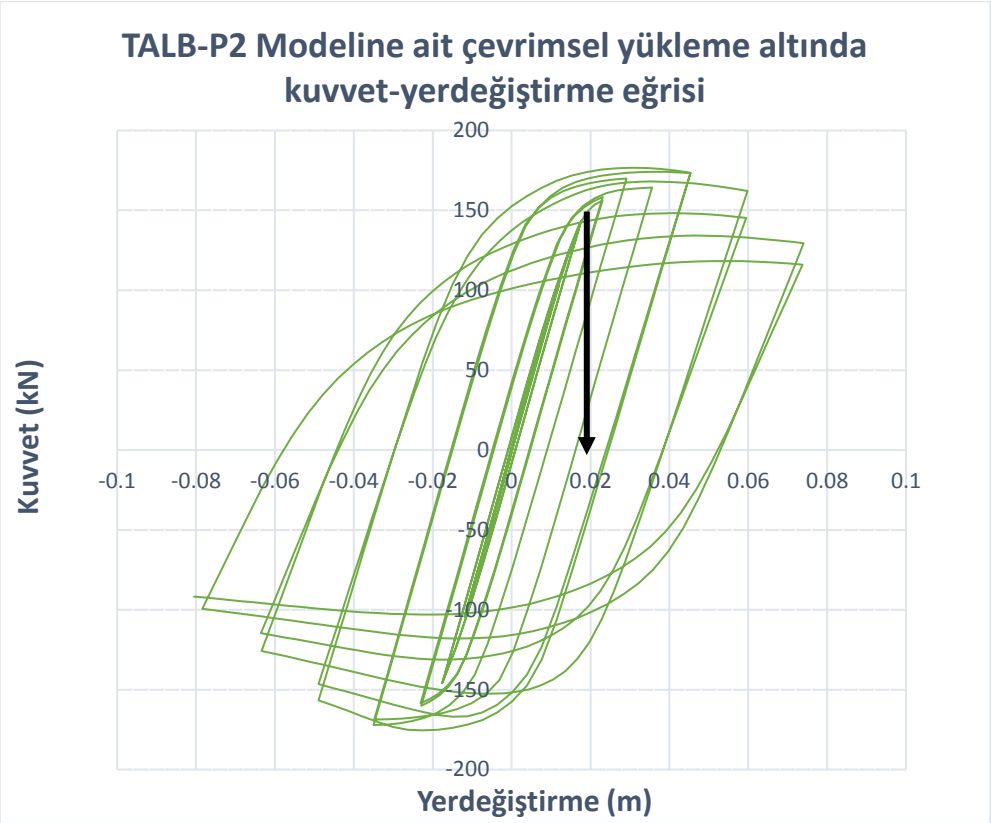
Şekil 4. 20 TALB-Y1' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 4. 21 TALB-Y2' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 4.22 TALB-P1' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı



Şekil 4.23 TALB-P2' e ait kuvvet-yerdeğiştirme diyagramı

TALB-Y1 ve TALB-Y2 birleşimlerindeki kiriş atalet momentleri TALB-P1 ve TALB-P2 modellerine göre daha büyüktür. Bu sebeple bu birleşimlerde yük taşıma kapasitelerinde azalma daha büyük kuvvetlerde oluşmaktadır. TALB-P1 ve TALB-P2 kendi içinde kıyaslandığında ise kirişin belirli bir uzaklıkta yatayda tutulmaması kirişin az kuvvet taşımasına sebep olmuştur.

Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27' de birleşimlerde yük adımlarına karşılık gelen kuvvet değerleri verilmiştir. Buna göre TALB-P1 ve TALB-P2 birleşimleri 59. Adımda maksimum kuvvet kapasitesine ulaşmaktadır. Bu adımdan sonra kuvvet kapasiteleri azalmaktadır. TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerinde ise kuvvet taşıma kapasitesi 69. Adımda en büyük değerine ulaştığı için azalma gözlenmemiştir. Bu değerler Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 4 Birleşimler taşıdığı maksimum kuvvetler

	Birleşimin taşıdığı maksimum kuvvet (kN)	Yükleme adımı
TALB-Y1	194,45	69
TALB-Y2	192,11	69
TALB-P1	185,77	59
TALB-P2	176,66	59



Şekil 4. 24 TALB-Y1' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı



Şekil 4. 25 TALB-Y2' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı



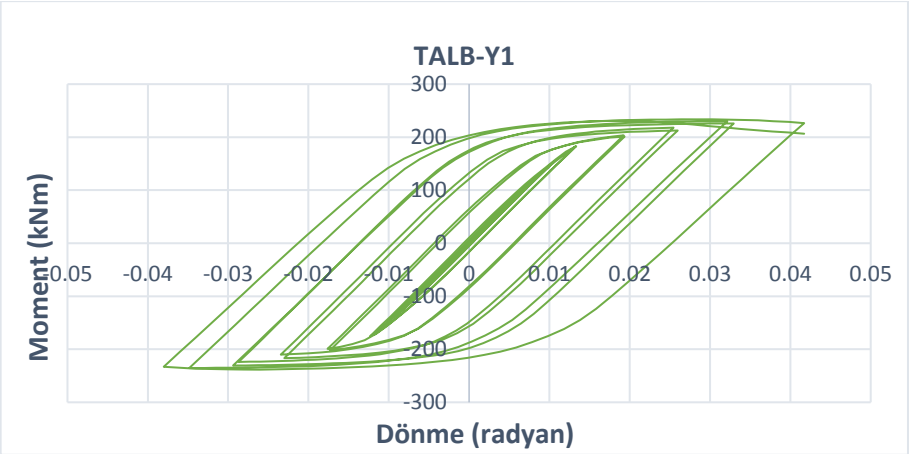
Şekil 4.26 TALB-P1' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı



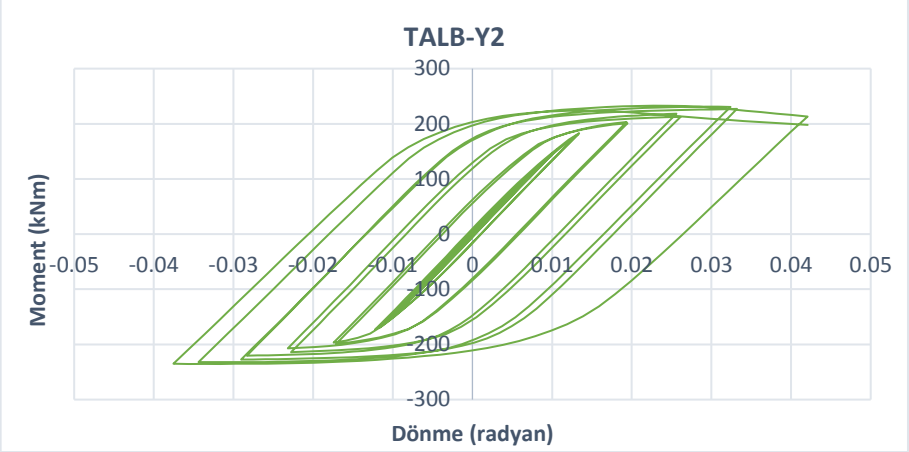
Şekil 4.27 TALB-P2' e ait kuvvet-yük adımı diyagramı

4.6.4 Moment Dönme Eğrileri

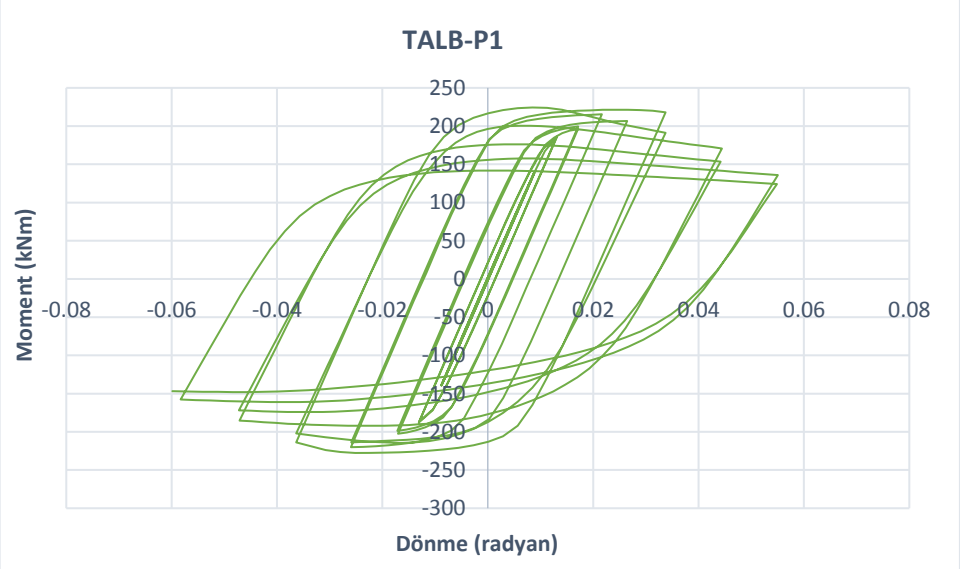
Birleşimlerin moment kapasiteleri ve bunun karşılığındaki dönme değerleri Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30, Şekil 4.31' da verilmiştir.



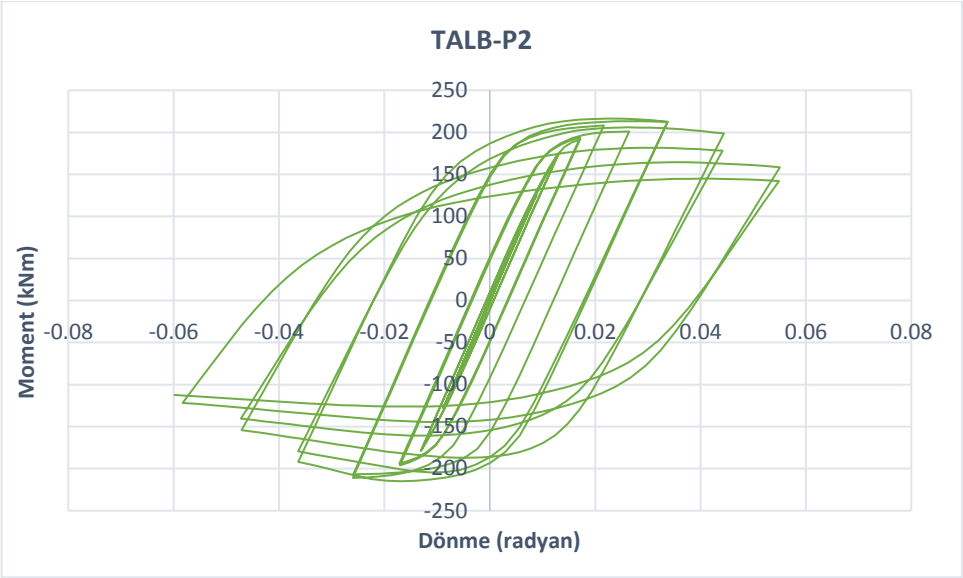
Şekil 4. 28 TALB-Y1' e ait moment -dönme eğrileri



Şekil 4. 29 TALB-Y2' e ait moment -dönme eğrileri



Şekil 4. 30 TALB-P1' e ait moment -dönme eğrileri



Şekil 4. 31 TALB-P2’ e ait moment -dönme eğrileri

Moment- dönme eğrileri, kuvvet- yerdeğiştirme eğrilerinden elde edilmiştir. Buna göre moment değerleri uygulanan kuvvet ile kuvvet uygulanan bölgenin kolon yüzüne mesafesinin çarpımı şeklindedir. Dönme değerleri ise yerdeğiştirme verilerinin düğüm noktasına uzaklığına bölümüdür [63]. Bu nedenle moment-dönme eğrileri kuvvet-yerdeğiştirme eğrileriyle paralellik göstermektedir. Buna göre TALB-P1 ve TALB-P2‘de 59. Adımdan sonra birleşimin moment kapasitesi azalmaya başlamasına rağmen, TALB-Y1 ve TALB-Y2’ de en büyük moment kapasitesi son yüklemeden elde edilen kapasitedir. Birleşimlerin maksimum moment kapasiteleri ve bu kapasitedeki dönme değerleri Çizelge 4.5’te verilmiştir. Bu verilere göre TALB-P1 ve TALB-P2 modelleri yaklaşık olarak %2,5 radyan değerlerinde moment kapasitelerine ulaşmışlardır. Birleşimin maksimum moment kapasitesinden sonra yaklaşık %3,75 radyan daha dönerek deneyi tamamlamışlardır. Yapma profilli birleşiminlerde ise moment kapasiteleri ve dönme değerleri birbirlerine yakın değerler almışlardır. Moment değerleri sırasıyla 232,75 kNm ve 235,13 kNm ve dönme değerleri ise %3,80 ve %3,75’tir.

Çizelge 4. 5 Birleşimler taşıdığı maksimum momentler ve dönme değerleri

	Birleşimin	Maksimum moment	Deney sonunda
TALB-Y1	-232,75	-3,80	4,17
TALB-Y2	-235,13	-3,75	4,21
TALB-P1	-227,57	-2,24	-5,99
TALB-P2	216,41	2,25	-5,99

4.6.5 Birleşimlerin Rijitlikleri

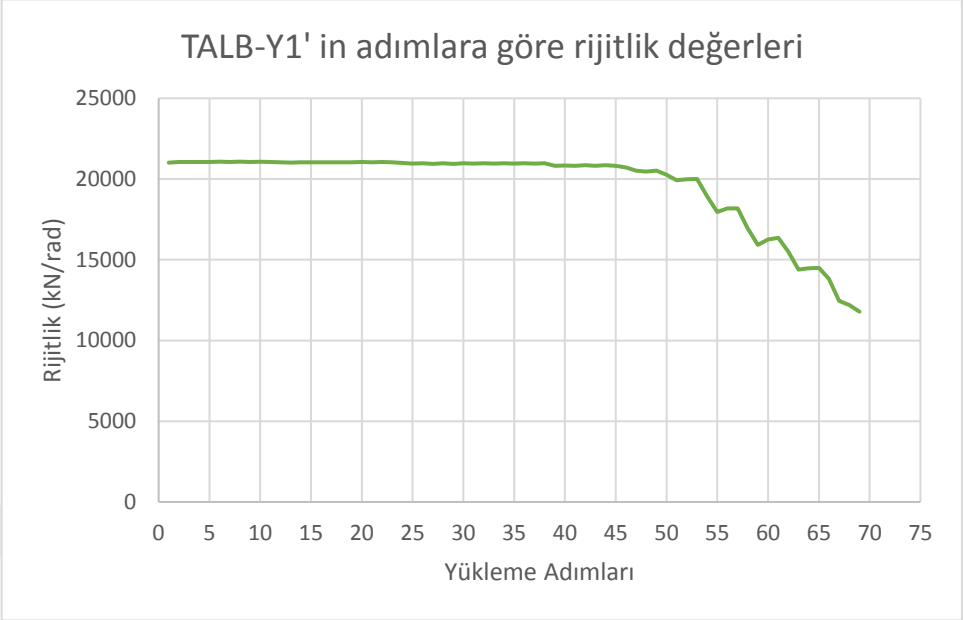
Rijitlik kuvvet etkisi altında birleşimde meydana gelen şekildeğişimine karşı oluşan fiziksel direnç olarak tanımlanır [64]. Buna göre ardışık yüklemelerin toplamı ile açığa çıkan dönme değerlerinin toplamlarının oranı rijitliklerin değişimini ifade eder. Şekil 4.32, Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 'de birleşimlerin yükleme adımlarına göre rijitlik değişimleri görülmektedir. TALB-Y1 ve TALB-Y2' de yaklaşık olarak 50. Adımlarda rijitlik değerinde azalmalar görülürken, TALB-P1 ve TALB-P2 birleşimlerinde 45. Adımlarda rijitliklerin azalmaya başladığı görülmektedir. Çizelge 4.6' da birleşimlerin en fazla yük taşıdıkları adıma kadarki ortalaması ile yükleme sonundaki rijitlikleri gösterilmektedir.

Çizelge 4. 6 Birleşimler taşıdığı maksimum momentler ve dönme değerleri

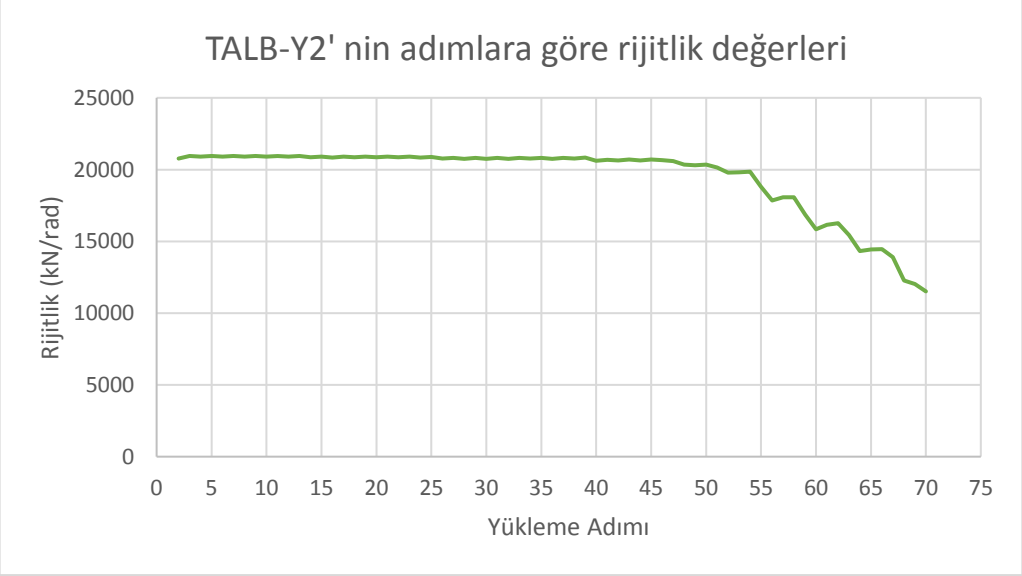
	Maksimum yük taşıma kapasitesine erişene kadarki ortalama rijitliği (kN/rad)	Son adımdaki rijitlik (kN/rad)
TALB-Y1	20847.61	11786.23
TALB-Y2	20721.22	11513.53
TALB-P1	21616.45	5192.13
TALB-P2	20088.83	4793.59

TALB-Y1 ve TALB-Y2 birleşimlerindeki kiriş atalet momentlerinden dolayı, bu birleşimler TALB-P1 ve TALB-P2 modelerine göre daha sonraki adımlarda rijitlik kayıpları gözlenmiştir. Bu sebeple de deney sonlandığında bu birleşimler daha yüksek rijitliğe sahiptirler. TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerinde rijitlik anlamında gözle görünür farklar bulunmazken, TALB-P1 ve TALB-P2' de farklılıklar gözlenmektedir. Yükleme başlangıcında TALB-P1, TALB-P2' den %6,87 oranında daha rijit iken yükleme sonunda %7,07 oranında daha rijittir. Buna göre tüm yükleme boyunca iki birleşim arasındaki

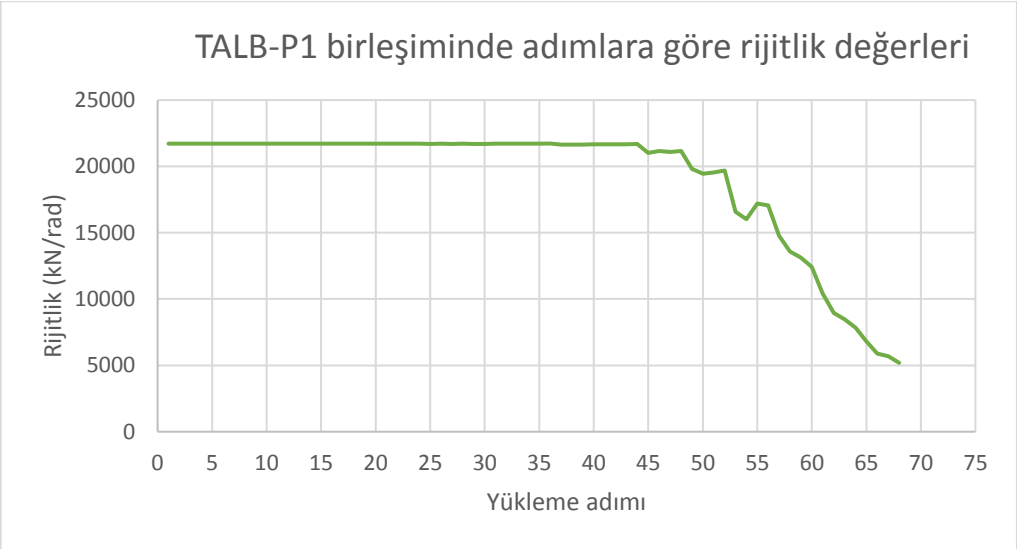
rijitlik farkı sabit kalmıştır. Ayrıca TALB-P1 birleşiminin yatayda tutulu olması yaklaşık %7 oranında rijitlik kazandırmıştır.



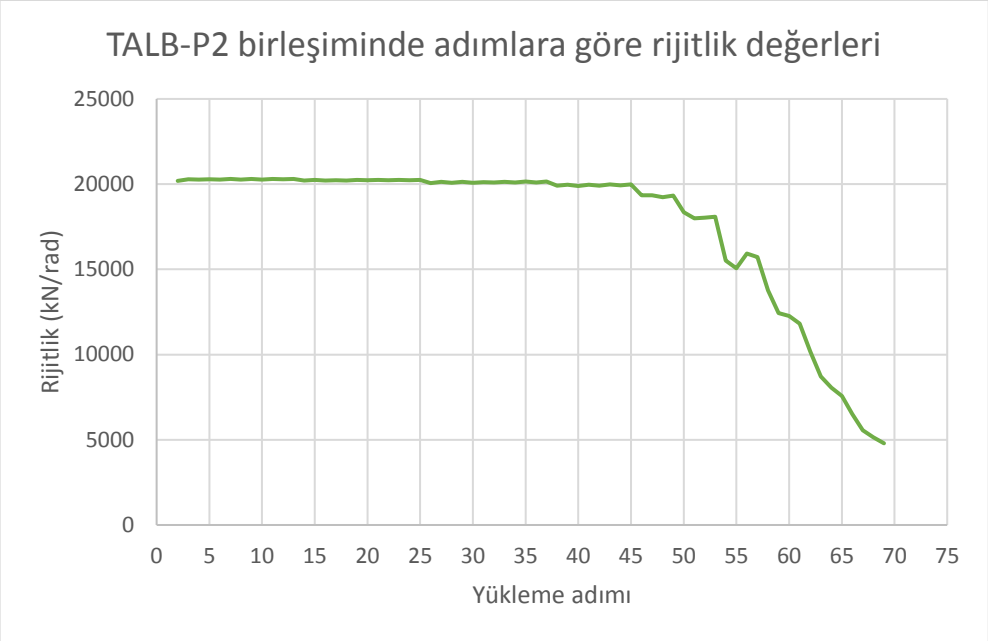
Şekil 4. 32 TALB-Y1’ e ait adımlara göre rijitlik eğrisi



Şekil 4. 33 TALB-Y2’ e ait adımlara göre rijitlik eğrisi



Şekil 4. 34 TALB-P1' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi



Şekil 4. 35 TALB-P1' e ait adımlara göre rijitlik eğrisi

4.6.6 Birleşimlerin Enerji Tüketme Kapasiteleri

Çelik malzemesi elastik ötesi yüklenip boşaltılıp, ters yönde yüklemeye maruz kalırsa, başlangıçtaki akma bölgesinden daha önce akmaya ulaşır. Bu davranışa Bauschinger etkisi denir. Bu noktadan sonraki yüklemeler çelikte plastik şekildeğiştirmelere sebep olur. Çeliğin en önemli özelliği tekrarlı elastik olmayan yüklemede enerji yutma kapasitesidir. Bir çelik elemanın plastik uzaması veya kısalması için ihtiyaç duyulan enerji,

plastik kuvvet ile plastik deformasyonun çarpımıdır. Buna histerik enerji denir. Kinetik ve elastik deformasyon enerjisinin aksine histerik enerji geriye dönüşü olmayan sarf edilmiş enerjidir. Birleşime uygulanan enerji sistemde harcanan plastik enerji, depolanan deformasyon enerjisi ve kinetik enerjinin toplamıdır [65]. Birleşimlerin çevrimsel yüklemelerle tükettikleri toplam enerjiler Çizelge 4.7'te gösterilmektedir.

Çizelge 4. 7 Modellerin tükettikleri toplam enerji miktarları

Birleşimler	Tüketilen Enerji Miktarları (kNm-rad)
TALB-P1	155,82
TALB-P2	138,93
TALB-Y1	89,29
TALB-Y2	88,11

Bu verilere göre en fazla enerji tüketimi TAL-P1' de gözlenmektedir. Bunun sebebi birleşimdeki kiriş alın levhasından takviye plakası kadar uzaklıkta plastik mafsal oluşturarak eğilme davranışıyla akmıştır. Bunun yanısıra kiriş atalet momentleri kolona göre daha az olduğundan, göçme mekanizmasında kirişin eğilmede akması baskındır. Plastikleşen kiriş daha fazla enerji tüketebilmiştir. TALB-P2 modeli, TALB-P1 modelinde benzer şartlar oluşmasına rağmen kirişin yanal olarak tutulmaması, kirişte yerel burkulmalar oluşturmuştur. Bu durum bu birleşimin TALB-P1'e göre daha az enerji tüketmesinin neden olmaktadır.

TALB-Y1 ve TALB-Y2 modelleri incelendiğinde enerji tüketme kapasitesi açısından benzer sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre yapma profilli kiriş başlığında kaynaktan dolayı oluşan eğilmenin birleşimin enerji tüketme kapasitesine etkisi bulunmadığı gözlenmiştir. TALB-Y ve TALB-P modelleri arasında ise enerji tüketme kapasitesi bakımından belirgin fark gözlenmiştir. Bunun nedeni TALB- Y modellerinde kiriş atalet momenti, TALB-P modellerine göre daha yüksektir. Bu sebeple bu modeller benzer yükleme şartlarında daha az plastik şekildeğiştirme yapmaktadırlar. Birleşimlerdeki kirişlerin plastik şekildeğiştimelerinin enerji tüketiminde önemli bir parametre olduğu gözlenmiştir.

4.6.7 Bulonlara Gelen Kuvvetler

Hazırlanan modellerdeki bulonlara gelen maksimum çekme kuvvetleri Çizelge 4.8' de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8 Modellere gelen maksimum çekme kuvvetleri

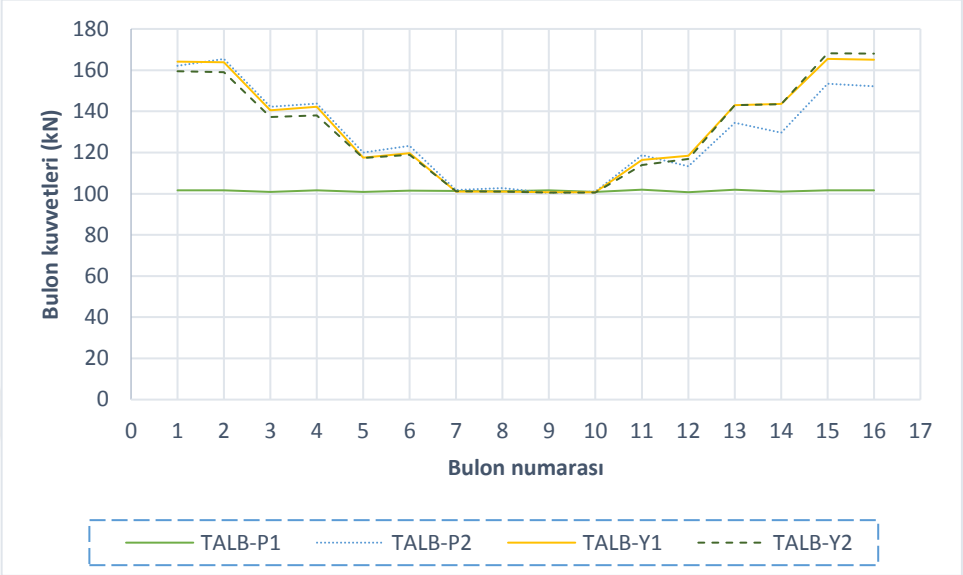
Bulon Numarası	Maksimum Çekme Kuvvetleri (kN)			
	TALB-P1	TALB-P2	TALB-Y1	TALB-Y2
1	101,58	162,15	164,17	159,5
2	101,65	165,43	163,76	158,96
3	100,9	142,28	140,44	137,16
4	101,62	143,8	142,27	138,06
5	100,89	120,04	117,53	117,39
6	101,47	123,24	119,7	118,88
7	101,27	101,83	101,08	101,11
8	101,1	102,78	101,02	101,02
9	101,66	100,4	100,7	100,6
10	100,79	101,08	100,75	100,55
11	101,89	118,78	116,44	113,97
12	100,72	113,36	118,44	116,89
13	101,92	134,51	142,92	142,94
14	100,95	129,65	143,56	143,48
15	101,62	153,39	165,46	168,18
16	101,57	152,23	165,05	168,04

Çizelge 4.8' deki verilere göre TALB-P2, TALB-Y1, TALB-Y2 modellerinde en büyük kuvvetler 1-2 ve 15-16 numaralı bulonlarda gözlenmiştir. Bu bulonlar içinde ortaya çıkan maksimum değer 168,18 kN'dur. Buna göre bu bulonldaki gerilme;

$\sigma_b = \frac{F_{maks}}{A_b} = \frac{168180}{\left(\frac{\pi x(16)^2}{4}\right)}$ = 836,45 MPa 'dır. Bulon malzemesinin akma gerilmesi 1035 MPa olduğundan bulonlara gelen kuvvetler güvenli sınırlarda kalmaktadır. Bu durumun ortaya çıkmasındaki birincil önemli faktör alın levhası kalınlığıdır. Buna göre yeterince rijit seçilmiş alın levhası bulonlara gelecek olan ilave manivela etkilerini önlemiştir.

TALB-P1 modeli diğer modellerden farklı olarak bulon kuvvetleri daha homojen bir yapıdadır. Bunun sebebi alın levhasındaki plastik şekildeğiştirmeler diğer modellere nazaran daha düşüktür. TALB-P2 modeliyle aynı yükleme şartlarına maruz kalmasına rağmen, kirişin mesnetlenme şekli kirişte oluşan plastik şekil değiştirmeleri etkilemiş ve

bu durum ise bulon kuvvetlerine yansımıştır. Şekil 4.36' da bulonlara gelen kuvvetlerin dağılımı görülmekteidir. TALB-P2, TALB-Y1 ve TALB-Y2 modellerinde alın levhasının merkezinden en uzak bulonlarda en büyük kuvvetler çıkmaktayken, TALB-P1 modelinde kuvvetler yaklaşık olarak birbirine eşitlerdir.



Şekil 4. 36 Bulonlara gelen kuvvetlerin dağılımı

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, takviyeli alın levhalı çelik kiriş kolon birleşimlerinin çevrimsel yükleme altındaki sonlu eleman analizleri incelenmiştir. Analizlerde geometriden kaynaklanan, malzemeden kaynaklanan, temas durumlarından kaynaklanan doğrusal olmayan davranışlar dikkate alınmıştır. Bu çalışmaları yapabilmek ve sonlu eleman çözümlerinin geçerliliğini değerlendirebilmek amacıyla literatürden alınan deneysel bir çalışmanın sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Ayrıca bulon kesme kuvvetleri ve çekmeye maruz plakaların davranışları da alt problem olarak çalışılıp birleşimlerin incelenmesinde bu çalışmalardan da faydalanılmıştır. Takviyeli alın levhalı birleşimlerin incelenmesiyle şu sonuçlara varılmıştır:

- Literatürden alınan çekmeye maruz plaka birleşimlerinde deneysel verilerle sonlu eleman analizleri arasında uyumlu sonuçlar olduğu gözlenmiştir. İncelenen modellerde plastik şekildeğiştirme, maksimum çekme kuvveti taşıma kapasitesi gibi parametrelerde istenen yaklaşıklık elde edilebilmiştir.
- Bulonlu çekme levhalarındaki davranışın irdelenmesiyle, bulon deliği ile bulon çapı arasındaki mesafenin artmasıyla birleşimlerde rijitlik kayıpları gözlenmektedir. Buna bağlı olarak çekme levhalarının yük taşıma kapasiteleri azalmaktadır.
- Bulon delikleri ile bulon çapı arasındaki mesafe bulonda gerilme yığılmaları oluşumunu engellemektedir. Bunun için optimum bulon ile bulon deliği arasındaki boşluk için optimum değer 1 mm olarak belirlenmiştir.

- Bulonlu çekme levhalarının sonlu eleman analizlerinde plakalar arasındaki temas tanımlanırken, bulon deliği ile bulon çapı arasında boşluk bulunmayan durum için öngerilme ihmal edilebilir.
- Bulonlu çekme levhalarında en büyük gerinimler ve gerilmeler çekme levhasında oluşmaktadır. Çekme levhaları üzerinde ise uygulanan yüklemeye en yakın bulon delikleri civarında oluştuğu gözlenmiştir.
- Bulonlu çekme levhalarında bulon sıralarında en büyük kesme kuvvetlerine maruz kalan bulonlar birleşimin ortasıda bulunan bulonlardır.
- Takviye alın levhalı birleşimlerde bulon davranışları incelendiğinde bulon çekme kuvvetlerini etkileyen en önemli faktör alın levhası olarak belirlenmiştir. Buna göre belirlenen alın levhası kalınlığında düzlem içi eğilmeler çok daha az oluştuğu için ilave manivela kuvvetleri açığa çıkmamıştır. Benzer şekilde birleşimlerde en büyük çekme kuvvetlerine maruz bulonlar alın levhasının en dışında kalan bulonlardır. Ayrıca bulonlardaki gerilmeler bulonların akması veya kesme ile kopması için gerekli kesme veya çekme kuvvetlerinin altında kalmıştır.
- Takviyeli alın levhalı birleşimlerde göçme modları incelendiğinde tüm modellerde kirişlerdeki alın levhası takviyesinin bittiği noktada kiriş üzerinde plastik mafsal oluşmuştur. Tüm modeller için en büyük plastik şekildeğiştirmeler bu bölgelerde gözlenmiştir. Bu sebeple takviyeli alın levhalı birleşimlerde uygun birleşim tasarımı yapıldığı durumlarda birleşimin deprem performasının şartnamelerce belirlenmiş plastik mafsallaşmanın kirişte başladığı sünek bir yapı davranışını sağlayacağı gözlenmiştir.
- Birleşimlerin taşıyabildiği maksimum kuvvetler incelendiğinde yapma profilli kirişlerde kaynaktan dolayı oluşan kiriş başlıklarındaki eğilmelerin yük taşıma kapasitesini düşürdüğü gözlenmekle beraber bu fark %1 mertebesinde oluşmaktadır. Bununla beraber kirişin yatayda tutulu olmayışı tutulu duruma göre yük taşıma kapasitesinde %6 oranında yük taşıma kapasitesi kaybı oluşturmuştur.

- Birleşimlerin moment-dönme grafikleri incelendiğinde daha düşük atalet momentli kirişler daha yük taşıma kapasitesinde azalmalar başlamakla birlikte deney sonunda daha yüksek atalet momentli kirişlere göre daha fazla dönme değerlerine ulaşmışlardır.
- Moment -dönme eğrilerine paralel olarak birleşimlerin enerji tüketme kapasiteleri de benzer şekilde TALB-P modellerinde TALB-Y modellerine göre daha fazla enerji tüketmişlerdir.
- Bu çalışmada takviyeli alın levhalı birleşimlerde alın levhalarının yeterince rijit olduğu durum incelenmiştir. İleriki çalışmalarda daha ince alın levhası bulunan durumlar göz önünde bulundurularak alın levhası kalınlığının değişimine göre birleşimlerde gözlenen göçme mekanizmaları irdelenebilir. Bulonlara gelecek ilave manivela etkileri ve optimum alın levhası kalınlıkları araştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Blumenbaum, S.E., (2004). Response of Cyclically Loaded Extended End-Plate Moment Connections When Used With Welded Built-Up Sections, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg Virginia.

[2] Ryan, J.C., (1999). Evaluation of extended end-plate moment connections under seismic loading, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg Virginia.

[3] Wade, P.M., (2007). Characterization of high-strength bolt behavior in bolted moment connections, Yüksek Lisans Tezi, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh.

[4] Jayachandran, S., Marimuthu, V., Prabha, P., Seetharaman, S. ve Pandian, N., (2009). "Investigations on the behaviour of semi-rigid endplate connections", Advanced Steel Construction, 5: 432-451.

[5] Douty, R. ve McGuire, W., (1963). "Research on Bolted Moment Connections—A Progress Report", Proceedings of the 1963 AISC National Conference, s.24-26.

[6] Kato, B. ve McGuire, W., (1973). "Analysis of T-stub flange-to-column connections", Journal of the Structural Division, 99: 865-888.

[7] Douty, R.T. ve McGuire, W., (1964). "High strength bolted connections with applications to plastic design", IABSE congress report, 2-14 September 1964, Rio de Janeiro.

[8] Ostrander, J.R., (1970). An experimental investigation of end plate connections, Yüksek Lisans Tezi, Faculty of Graduate Studies, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.

[9] Packer, J. ve Morris, L., (1977). "A limit state design method for the tension region of bolted beam-column connections", The Structural Engineer, 55: 446-458.

[10] Krishnamurthy, N. ve Graddy, D.E., (1976). "Correlation between 2-and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections", Computers & Structures, 6: 381-389.

[11] Ahuja, V., (1982). Analysis of Stiffened End Plate Connections Using the Finite Element Method, Doktora Tezi, University of Oklahoma.

[12] Ghassemieh, M., (1983). Inelastic finite element analysis of stiffened end-plate moment connections, Doktora Tezi, University of Oklahoma.

[13] Kennedy, N. Vinnakota, S. ve Sherbourne, A., (1981). "The split-tee analogy in bolted splices and beam-column connections", Joints in structural steelwork, 2(2.157).

[14] Borgsmiller, J.T., (1995). Simplified method for design or moment end-plate connections, Yüksek Lisans Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University.

[15] Ballio, G. Calado, L. De Martino, A. Faella, C. ve Mazzolani, F., (1987). "Cyclic behaviour of steel beam-to-column joints experimental research", Costruzioni Metalliche, 2: 69-88.

[16] Tsai, K.-C. ve Popov, E.P., (1990). "Cyclic behavior of end-plate moment connections", Journal of Structural Engineering, 116: 2917-2930.

[17] Ghobarah, A. Osman, A. ve Korol, R., (1990). "Behaviour of extended end-plate connections under cyclic loading", Engineering Structures, 12: 15-27.

[18] Kukreti, A. Murray, T. ve Abolmaali, A., (1987). "End-plate connection moment-rotation relationship", Journal of Constructional Steel Research, 8: 137-157.

[19] Chasten, C.P. Lu, L.-W. ve Driscoll, G.C., (1992). "Prying and shear in end-plate connection design", Journal of Structural Engineering, 118: 1295-1311.

[20] Steenhuis, M. Dol, C. ve van Gorp, L., (1994). "Computerised calculation of force distributions in bolted end plate connections according to Eurocode 3", Journal of Constructional Steel Research, 31: 135-144.

[21] EN 1993-1-8, (2005). Eurocode 3: Design of steel structures, Part: 1-8: Design of joints, European Comittee for Standardization.

[22] Sherbourne, A.N. ve Bahaari, M.R., (1994). "3D simulation of end-plate bolted connections", Journal of Structural Engineering, 120: 3122-3136.

[23] Shi, Y. Chan, S. ve Wong, Y., (1996). "Modeling for moment-rotation characteristics for end-plate connections", Journal of Structural Engineering, 122: 1300-1306.

[24] Abolmaali, A. Matthys, J.H. Farooqi, M. ve Choi, Y., (2005). "Development of moment–rotation model equations for flush end-plate connections", Journal of Constructional Steel Research, 61: 1595-1612.

[25] Ramberg, W. ve Osgood, W.R., (1943). "Description of stress-strain curves by three parameters", National Advisory Comittee For Aeronautics, No.902, Washington.

[26] Choi, C.-K. ve Chung, G.-T., (1996). "Refined three-dimensional finite element model for end-plate connection", Journal of Structural Engineering, 122: 1307-1316.

[27] Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N., (1996). "Structural behavior of end-plate bolted connections to stiffened columns", Journal of Structural Engineering, 122: 926-935.

[28] Sherbourne, A.N. ve Bahaari, M.R., (1997). "Finite element prediction of end plate bolted connection behavior. I: Parametric study", Journal of Structural Engineering, 123: 157-164.

[29] Richard, R.M. ve Abbott, B.J., (1975). "Versatile elastic-plastic stress-strain formula", Journal of the Engineering Mechanics Division, 101: 511-515.

[30] Hasan, R. Kishi, N. Chen, W. ve Komuro, M., (1997). "Evaluation of rigidity of extended end-plate connections", Journal of Structural Engineering, 123: 1595-1602.

[31] Wheeler, A. Clarke, M. Hancock, G. ve Murray, T., (1998). "Design model for bolted moment end plate connections joining rectangular hollow sections", Journal of Structural Engineering, 124: 164-173.

[32] Wheeler, A. Clarke, M. ve Hancock, G., (2000). "FE modeling of four-bolt, tubular moment end-plate connections", Journal of Structural Engineering, 126: 816-822.

[33] Yorgun, C., (2002). "Evaluation of innovative extended end-plate moment connections under cyclic loading", Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 26: 483-492.

[34] Murray, T.M. ve Sumner, E.A., (2003). Extended End-plate Moment Connections: Seismic and Wind Applications: American Institute of Steel Construction, Steel Design Guide.

[35] Maggi, Y. Gonçalves, R. Leon, R. ve Ribeiro, L., (2005). "Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling", Journal of Constructional Steel Research, 61: 689-708.

[36] 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: 1352-1357.

[37] 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.

[38] Baldassino, N. ve Zandonini, R., (2009). "Response of end-plate joints under combined forces", Structures Congress 2009: Don't mess with Structural Engineers: Expanding Our Role, (pp. 1-10).

[39] 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.

[40] 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.

[41] Kiamanesh, R. Abolmaali, A. ve Razavi, M., (2012). "Effect of circular bolt pattern on behavior of extended end-plate connection", Journal of Structural Engineering, 139: 1833-1841.

[42] 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.

[43] Wang, Y. Zong, L. ve Shi, Y., (2013). "Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection", Journal of Constructional Steel Research, 84: 1-16.

[44] Ataei, A. Bradford, M.A. ve Valipour, H.R., (2014). "Moment-rotation model for blind-bolted flush end-plate connections in composite frame structures", Journal of Structural Engineering, 141: 04014211.

[45] Loh, H. Uy, B. ve Bradford, M., (2006). "The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints Part I—experimental study", Journal of Constructional Steel Research, 62: 378-390.

[46] Loh, H. Uy, B. ve Bradford, M., (2006). "The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints Part II—Analytical study and design appraisal", Journal of Constructional Steel Research, 62: 391-412.

[47] 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.

[48] Yılmaz, O. ve Bekiroğlu, S., (2015). "DBYBHY-2007'deki Moment Aktaran Kaynaklı Birleşimlerin Monotonik Yükleme Altındaki Davranışı", 6. Çelik Yapı Sempozyumu, ss. 117-126, 9-11 Aralık 2015, Eskişehir, Türkiye.

[49] Bayındırlık, T. ve Bakanlığı, İ., (2007). "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.

[50] FEMA-350, (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency.

[51] Može, P., (2008). Ductility and resistance of bolted connections in structures made of high strength steels, Doktora Tezi, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana.

[52] Özhendekçi, D., Çok Katlı Çelik Yapılarda Birleşim Tipleri, http://www.yildiz.edu.tr/~devrimo/Cok-katli-celik-yapilar-birlesim-tipleri.pdf., 09 Nisan 2018

[53] T.C. Resmi Gazete, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, 29614, 04.02.2016.

[54] T.C. Resmi Gazete, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 30364, 18.03.2018

[55] Bruneau, M. Uang, C.M. ve Sabelli, S.R., (2011). "Ductile design of steel structures", McGraw Hill Professional.

[56] FEMA-353, (2000). Quality Assurance Guidelines for Steel Moment Frame Construction for Seismic Applications, Federal Emergency Management Agency, USA.

[57] Design, A.S., (1999). Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, December, 27, Chicago.

[58] ANSI/AISC 358-10, (2010). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames For Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago.

[59] ANSYS, (2018). ANSYS Release 18.2 Programmer's Guides: Guide to ANSYS User Programmable features, ANSYS, Incorporated.

[60] Canonsburg, A.D., (2016). ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide, ANSYS, Inc.

[61] Research Council on Structural Connections Committee, (2004). Specification for structural joints using ASTM A325 or A490 Bolts, AISC Inc., Chicago, Illinois, USA.

[62] Yılmaz, O., Bekiroğlu, S., Alemdar, F., Arslan, G., Sevim, B. ve Ayvaz, Y., "Alın Levhalı Bulonlu Kolon-Kiriş Birleşiminin Çevrimsel Yükleme Altında Deneysel Çalışması", 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-13 Ekim 2017, Eskişehir, Türkiye.

[63] Schneider, S.P. ve Teeraparbwong, I., (2002). "Inelastic behavior of bolted flange plate connections", Journal of Structural Engineering, 128: 492-500.

[64] Yerlici, V., Luş, H., (2014). Yapı Dinamiğine Giriş, 2. Baskı, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, İstanbul.

[65] Deren, H. Uzgider, E. ve Piroğlu, F. ve Çağlayan, Ö., (2012). Çelik Yapılar, 4. Baskı, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Anıl ZAFER

Doğum Tarihi ve Yeri : 11.07.1988, Van

Yabancı Dili :İngilizce

E-posta :anilzafer@outlook.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Bülent Ecevit Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Van Kazım Karabekir Lisesi	2006

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2015-2018	Yapıstatik Proje Mühendislik	Statik mühendisi
2014-2015	Mast Metal Çelik Yapı Fabrikası	İmalat Şefi
2013-2014	Turyapı İnşaat Taah. Tic. Şti.	Saha Mühendisi

YAYINLARI

Makale

1. **Zafer, A.,** Yılmaz, O. ve Bekiroğlu S. (2018), " A Study on Effect Sizing Bolt Hole in Single-Lap Connection Using FEA". Journal of Scientific Research & Reports, 19(1): 1-14.