

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TAM DAYANIMLI BULONLU ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON
BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSEL YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL
OLMAYAN DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selin YARDIMCI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MAYIS 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TAM DAYANIMLI BULONLU ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON
BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİSEL YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL
OLMAYAN DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Selin YARDIMCI
(501181044)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cüneyt VATANSEVER

MAYIS 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501181044 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Selin YARDIMCI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TAM DAYANIMLI BULONLU ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Edip SEÇKİN
İstanbul Kültür Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Nisan 2022
Savunma Tarihi : 11 Mayıs 2022





Sevgili aileme,



ÖNSÖZ

Lisans, yüksek lisans eğitimim ve tez yazım sürecimde daima, her konuda benimle tecrübelerini ve engin teknik bilgisini paylaşıp, yardım ve desteklerini esirgemeyen, gösterdiği güven, anlayış ve sabırla beni bir sonraki adıma yönlendirip cesaretlendiren değerli tez danışmanım Sayın Doç.Dr. Cüneyt VATANSEVER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam sırasında benden desteklerini esirgemeyen Öğr. Gör. Haluk Emre ALÇIÇEK'e teşekkür ederim.

Bu süreçte manevi destekleri ile her zaman yanımda olduklarını hissettiğim, bugünlerimin mimarı sevgili annem, babam ve kardeşime çok teşekkür ederim.

Mayıs 2022

Selin YARDIMCI
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı.....	2
1.2 Çalışmanın Kapsamı	2
1.3 Literatür Araştırması	3
2. DEPREM BÖLGELERİNDE KULLANILAN TAM DAYANIMLI ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TASARIM ESASLARI.....	7
2.1 IPE330-HEB360 Birleşimi Tasarım Adımları	10
2.2 IPE300-HEB360 Birleşimi Tasarım Adımları	19
3. SONLU ELEMAN MODELİ.....	27
3.1 Modelleme Esasları	27
3.2 Malzeme Parametreleri	30
3.3 Çevrimsel Yükleme Protokolü	32
3.4 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması	33
4. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN ANALİZİ VE ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
5.1 Sonuçlar.....	47
5.2 Öneriler	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51

KISALTMALAR

TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
SAC	: Structural Engineers Association of California (SEAOC) & Applied Technology Council (ATC) & California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREe) Ortak Girişimi
AISC	: American Institute of Steel Construction
ÇYTHYE	: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
FEM	: Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

SEMBOLLER

A_{st}	: Rijitlik levhası enkesit alanı
$A_{stReq'd}$	: Gereken rijitlik levhası enkesit alanı
A_{yb}	: Bulon gövdesinin enkesit alanı
b_{bf}	: Kiriş başlık genişliği
b_{fc}	: Kolon başlık genişliği
B_{nt}	: Karakteristik bulon kesme dayanımı
b_p	: Alın levhası genişliği
c	: Kolon başlıklarının alt ve üstünde yer alan ilk sıra bulonlar arası uzaklık
C_{pr}	: Birleşimde pekleşme, vb. durumları dikkate alan ve olası en büyük eğilme momenti dayanımının hesabı için kullanılan bir katsayı
C_t	: Kirişin üst başlığı ile kolon tepe noktası arası mesafeye bağlı katsayı
d	: Bulon çapı
d_b	: Kiriş enkesit yüksekliği
$d_{bReq'd}$	: Gerekli bulon çapı
d_c	: Kolon enkesit yüksekliği
d_e	: Bulon kenar mesafesi
E	: Elastisite modülü
F_{cu}	: Rijitlik levhası tasarım kuvveti
F_{fu}	: Rijitlik levhalarına kiriş başlıklarından aktarılan tekil kuvvet
F_{nt}	: Karakteristik bulon kayma gerilmesi
F_u	: Kopma gerilmesi
F_y	: Akma gerilmesi
F_{yc}	: Kolon akma gerilmesi
F_{ys}	: Rijitlik levhası akma gerilmesi
g	: Bulonlar arası yatay mesafe
h_b	: Kiriş gövde yüksekliği
h_c	: Kolon gövde yüksekliği
H_{ort}	: Ortalama kat yüksekliği
k_c	: Kolon başlığı dış yüzü ile gövdenin yarıçap hariç en üst noktası arası uzaklık

I_c	: Kritik yırtılma mesafesi
I_h	: Kiriş uçlarındaki olası plastik mafsallık noktasının kolon yüzüne uzaklığı
I_n	: Kiriş uçlarındaki olası plastik mafsallık noktaları arasında kalan kiriş açıklığı
M_{cf}	: Kolon başlığı eğilme momenti dayanımı
M_{np}	: Birleşimin tasarımında bulonların çekme dayanımının belirleyici olduğu eğilme momenti dayanımı
M_{pr}	: Plastik mafsalda oluşan olası eğilme momenti
p_{fi}	: Kiriş başlıkları arasına teşkil edilen bulonun merkezi ile kiriş başlığı iç yüzü arası uzaklık
p_{fo}	: Kiriş başlıkları dışına teşkil edilen bulonun merkezi ile kiriş başlığı dış yüzü arası uzaklık
p_{si}	: Kiriş başlıkları arasına teşkil edilen bulonun merkezi ile rijitlik levhası arası uzaklık
p_{so}	: Kiriş başlıkları arasına teşkil edilen bulonun merkezi ile rijitlik levhası arası uzaklık
R_n	: Karakteristik dayanım
R_y	: Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı
s	: Akma çizgileri yöntemine göre başlık genişliği ve bulonlar arası yatay mesafeye bağlı parametre
t_{bf}	: Kiriş başlık kalınlığı
t_{cf}	: Kolon başlık kalınlığı
$t_{cfReq'd}$	: Gerekli kolon başlık kalınlığı
t_{cw}	: Kolon gövde kalınlığı
t_p	: Alın levhası kalınlığı
$t_{pReq'd}$	: Gerekli alın levhası kalınlığı
t_s	: Rijitlik levhası kalınlığı
V_d	: Kirişin plastik mafsallık noktasında, düşey yüklerden meydana gelen basit kiriş kesme kuvveti
V_n	: Karakteristik kesme kuvveti dayanımı
V_{uc}	: Birleşimin kolon yüzündeki gerekli kesme kuvveti dayanımı
V_{up}	: Rijitlik levhası enkesit alanı
W_{px}	: Eğilme eksenine göre plastik mukavemet momenti
Y_c	: Kolon başlığı kalınlığı tahkiki için akma çizgisi parametresi
Y_p	: Alın levhası kalınlığı tahkiki için akma çizgisi parametresi
γ	: Kinematik pekleşme modülünün artan plastik şekil değiştirmeler ile azalma oranı

ϵ_u	: Kopma şekildeğiştirmesi
θ	: Görelî kat ötelemesi açısı
ϕ	: Dayanım katsayısı





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : IPE300-HEB360 birleşim detayı için TBDY 2018'e göre uygulama sınırlarının değerlendirmesi	8
Çizelge 2.2 : IPE330-HEB360 birleşim detayı için TBDY 2018'e göre uygulama sınırlarının değerlendirmesi	8
Çizelge 3.1 : Elastik malzeme parametreleri.	31
Çizelge 3.2 : Kiriş dışındaki birleşen elemanlar için plastik malzeme karakteristikleri.	32
Çizelge 3.3 : Kiriş dışındaki elemanlar için plastik malzeme karakteristikleri.	32
Çizelge 3.4 : P3 numunesi için birleşim detayı değişkenleri (Akgönen ve diğ.,2015).35	
Çizelge 3.5 : P3 numunesi için birleşen elemanların malzeme karakteristikleri (Akgönen, 2015).	36
Çizelge 3.6 : P3 numunesi IPE270 kiriş için plastik malzeme parametreleri.....	36



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tam dayanımlı alın levhalı bulonlu birleşim tipleri (TBDY 2018 Şekil 9B.2).....	1
Şekil 2.1 : Birleşim detayı değişkenleri (TBDY 2018 Şekil 9B.3).	9
Şekil 2.2 : Plastik mafsallın yeri (TBDY 2018 Şekil 9B.3).....	9
Şekil 2.3 : IPE330-HEB360 birleşimi	10
Şekil 2.4 : IPE330-HEB360 birleşimi için bulon yerleşimi	10
Şekil 2.5 : Alın levhasında oluşan tipik akma çizgileri (AISC 358-16 Tablo 6.2)....	13
Şekil 2.6 : Kolon başlığında oluşan tipik akma çizgileri (AISC 358-16 Tablo 6.5)..	15
Şekil 2.7 : IPE300-HEB360 birleşimi	20
Şekil 2.8 : IPE300-HEB360 birleşimi için bulon yerleşimi	20
Şekil 3.1 : Üç boyutlu tipik sonlu eleman modeli.	28
Şekil 3.2 : Bulon sonlu eleman modeli.....	28
Şekil 3.3 : Karmaşık geometriler için yapılandırılmış ağ sistemi desenleri.	29
Şekil 3.4 : Eğilme etkisindeki elemanların kalınlıkları boyunca teşkil edilen örnek sonlu eleman ağı.	30
Şekil 3.5 : AISC 358-16'ya göre görelî kat ötelemesi açısı (θ) tanımı.	33
Şekil 3.6 : SAC çevrimsel yükleme protokolü.	33
Şekil 3.7 : Test düzeneği (Akgönen ve diğ., 2015).	34
Şekil 3.8 : P3 numunesi sonlu eleman modeli.....	35
Şekil 3.9 : P3 numunesinin kupon testi sonuçları (Akgönen ve diğ., 2015).....	37
Şekil 3.10 : P3 numunesinin deney sonucu göçme modu (Akgönen ve diğ., 2015).	38
Şekil 3.11 : P3 numunesinin monotonik yükleme sonucu göçme modu (FEM).....	38
Şekil 3.12 : P3 numunesi (Akgönen ve diğ., 2015) için deneysel ve FEM sonucu elde edilen moment-dönme eğrilerinin karşılaştırılması.	39
Şekil 4.1 : IPE300-HEB360 birleşimi moment-dönme eğrisi.	42
Şekil 4.2 : IPE330-HEB360 birleşimi moment-dönme eğrisi.	42
Şekil 4.3 : IPE300-HEB360 birleşimi göçme modu (çevrimsel yükleme).....	43
Şekil 4.4 : IPE300-HEB360 birleşimi plastik şekildeğiştirmeler (çevrimsel yükleme).43	
Şekil 4.5 : IPE300-HEB360 birleşimi göçme modu (monotonik yükleme).....	43
Şekil 4.6 : IPE330-HEB360 birleşimi göçme modu (çevrimsel yükleme).....	44
Şekil 4.7 : IPE330-HEB360 birleşimi plastik şekildeğiştirmeler (çevrimsel yükleme).44	
Şekil 4.8 : IPE330-HEB360 birleşimi göçme modu (monotonik yükleme).....	44



TAM DAYANIMLI BULONLU ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN ÇEVİRİMSSEL YÜKLER ALTINDA DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞI

ÖZET

Tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşimler, moment aktaran kiriş kolon birleşim tipleri arasında en sık tercih edilen birleşimlerden biridir. Bu tür birleşimler, gerek saha kaynağı ve bunlar için kontrol testleri gerektirmemesi, gerekse şantiye koşullarında bulonlu birleşimlerin montaj kolaylığı sağlaması nedeniyle tercih edilir.

Deprem bölgesi olan ülkemizde yaygın olarak kullanılan bu birleşimlerin, sismik yükler altında davranışını anlamak oldukça önemlidir. TBDY 2018’de deprem kuvvetlerini karşılayan moment aktaran çelik çerçevelerde kullanılması uygun olan tam dayanımlı alın levhali kiriş-kolon birleşim detayları mevcuttur. Dört bulonlu rijitlik levhasız, dört bulonlu rijitlik levhali ve sekiz bulonlu rijitlik levhali birleşimler olarak üç farklı tip birleşim için uygulama sınırları da bu yönetmelikte yer almaktadır. Bu tür birleşimlerin uygulanma şekilleri; bulon yerleşimi, kiriş enkesit yüksekliği, bulon kalitesi, birleşen elemanların malzeme kalitesi, alın levhası kalınlığı ve benzeri geometrik ve malzeme karakteristiklerini kapsayan koşullar getirilerek sınırlandırılmıştır. Bu sınır şartlarının sağlanması ve TBDY 2018 tasarım esasları doğrultusunda güçlü kolon-güçlü birleşim bölgesi-zayıf kiriş felsefesi ile birleşimin boyutlandırılması durumunda, tekrarlı tersinir yükler altında söz konusu birleşim tiplerinin 0.04 radyan göreceli kat ötelemesi açısı değerinde dönme kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

TBDY 2018’de yer alan uygulama sınırları Avrupa profilleri için düzenlenmiştir. Bu sınır koşulları Amerikan profilleri için AISC 358-16’da yer almaktadır. Bu iki yönetmelik arasında karşılaştırma yapıldığında TBDY 2018’de uygulama sınır koşullarını sağlayan bazı kiriş profillerinin AISC 358-16 yönetmeliğine göre bu koşulları sağlamadığı görülmüştür.

Akgönen ve diğ (2015) AISC 358-16 yönetmeliğine göre deprem bölgelerinde uygulama koşullarını sağlamayan bazı Avrupa profillerinin çevrimsel yükler altında davranışını incelemiş, ancak deney düzeneğindeki yükleme sisteminin yük düzeyi kapasitesinin yetersiz kalması nedeniyle kiriş enkesitleri belirli bir eğilme momenti kapasitesini aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu tez çalışması, Akgönen ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada çevrimsel yükleme altında davranışı araştırılamayan kiriş enkesitlerinin doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri yardımıyla nümerik olarak incelenmesini kapsamaktadır.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelleri, ABAQUS yazılımında kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Birleşimlerin gerçek davranışının uygun bir şekilde simüle edilebilmesi, uygun sonlu eleman tipinin seçimi, doğru malzeme modelinin tercihi, yüzeyler arası etkileşimin gerçek davranışı yansıtır biçimde temsil edilmesi, sınır koşullarının doğru tanımlanması, sonlu eleman ağlarının teşkil ediliş biçimi gibi birçok parametreye bağlıdır.

Sonlu eleman modellerinde, birleşim elemanlarının temsili C3D8R sonlu eleman tipi ile gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler arası etkileşimler için “general contact” tanımlaması kullanılmıştır. Temas halindeki yüzeylerin normal doğrultudaki davranışı; basınç gerilmelerinin sıfırdan büyük olduğu durumda elemanların birbirine girişiminin engellendiği "hard contact" etkileşim modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Gerçek davranışı yansıtır biçimde elemanların birbirinden ayrılmasına izin verilmiştir. Temas halindeki yüzeylerin rölatif kayma şeklindeki etkileşimi "penalty" tanımı uygulanarak temsil edilmiştir.

Sonlu eleman modellerinde birleşen elemanların tekrarlı tersinir yükleme altında davranışının gerçek davranışla uyumlu olmasını sağlayan en önemli faktörlerden biri doğru malzeme parametrelerinin seçimidir. Malzemenin elastik davranışının doğru tanımlanmasının yanı sıra, plastik bölgenin, özellikle pekleşmenin gözlenmesi hedeflenen kiriş elemanları için uygun şekilde tanımlanması gerekmektedir. Sonlu eleman modellerinde pekleşmesi öngörülen kiriş elemanları için kinematik pekleşme modeli, “combined hardening” modeli ile “parameters” yöntemi seçilerek tanımlanmıştır.

Sonlu eleman modellerinde, sonlu eleman ağı oluşturma teknikleri, analiz sonuçlarını büyük ölçüde etkilemektedir. Sonlu eleman ağlarının model geometrisi ve davranışı ile uyumsuz teşkil edilmesi, analizlerde yakınsama problemlerine sebep olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında sonlu eleman ağları oluşturulurken, yapılandırılmış (structured) ve “sweep” sonlu eleman ağı oluşturma teknikleri uygulanmıştır. Sonlu eleman ağlarının oluşturulma biçimi gibi, ağ sıklığının önemi, doğruluk düzeyi yüksek çıktılar elde etmek açısından oldukça fazladır. Bu sebeple, deformasyonun yüksek olması beklenen bölgelerde ağ sıklığı arttırılmış ve eğilme etkisindeki elemanlar kalınlıkları boyunca uygun sıklıkta sonlu eleman ağları ile modellenmiştir.

Sonlu eleman modellerinin, gerçek davranışı uygun bir biçimde temsil edebilmesi için bu modellerin doğrulanması gerekmektedir. Bunun için deneysel sonuçların referans olarak kullanılması uygun olmaktadır. Bu çalışma kapsamında Akgönen ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada yer alan kiriş-kolon birleşimi numunelerinden bir tanesi için deney koşullarını uygun sınır şartları ile temsil edecek şekilde sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada numuneye uygulanan test prosedürü analiz modelinde temsil edilmiştir. Numuneye ait malzeme parametreleri, test düzeneğinin geometrisi, mesnet koşulları ve birleşim detayının karakteristik detayları göz önünde bulundurularak oluşturulan ileri düzey sonlu eleman modeli sonuçlarının, test sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Analiz sonuçlarının deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olması; sonlu eleman modellerinin, sınır koşulları, yüzey etkileşimleri, malzeme modeli ve sonlu eleman modelini oluşturan diğer bileşenler bakımından gerçek birleşim davranışını simüle edebildiğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, AISC 358-16'ya göre kiriş enkesit yüksekliği ve kiriş başlık genişliği uygulama sınırlarını sağlamayan kiriş enkesitlerinden oluşan birleşimlerin çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Bu birleşimlere SAC çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Analizler sonucunda moment-dönme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen moment dönme eğrileri, birleşimin dönme ve moment kapasitesini içermektedir. Elde edilen moment-dönme bağıntılarına göre, TBDY 2018 ve Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (ÇYTHYE) Yönetmeliği 2018'e uygun olarak tasarlanan birleşimlerin, AISC 341-16'da öngörülen koşulları sağladığı görülmüştür. Bu durumda, TBDY 2018 Tablo

9B.1'de verilen kiriş enkesit yüksekliği sınırlarının uygulanabilir olduğu, alın levhası genişliği sınırlarının da genişletilerek gncellenebileceği belirtilebilir.





NONLINEAR BEHAVIOR OF EXTENDED END-PLATE BEAM TO COLUMN CONNECTIONS SUBJECT TO CYCLIC LOADING

SUMMARY

Extended end plate connections are one of the most commonly used moment connections. These types of moment connections are preferred due to the fact that it consists assemblies welded in shop, does not require field welding, field weld tests, and because of the ease of in situ erection of bolted connections.

It is crucial to understand the cyclic behavior of these connections, which are widely used in our country, located in a seismically active region, under seismic loads. In TBDY 2018, prequalified extended end plate connection details are available to be utilized in special and intermediate steel moment frames. Parametric limitations for three different types of extended end plate connections, which are four-bolt unstiffened, four-bolt stiffened and eight-bolt stiffened, are also included in this regulation. These parametric limitations include bolt arrangement, beam depth, bolt grade, steel grade of connecting elements, end-plate thickness with other geometric characteristics. It is stated in TBDY 2018 that if these parametric limitations are met and structural design of the connection satisfies the strong column-strong connection-weak beam philosophy in line with the TBDY 2018 design principles, extended end-plate connections mentioned shall have a rotation capacity of 0.04 radian inter-storey drift angle under cyclic loads.

Parametric limitations as per TBDY 2018 for extended end-plate connections subject to seismic loads are met by most of commonly used European steel profiles. These limitations given in AISC 358-16 are suitable for American profiles. When two regulations are compared, it is observed that some steel profiles that meet the parametric limitations included in TBDY 2018 do not meet these limitations according to AISC 358-16.

Akgönen et al. (2015) investigated the behavior of some European profiles under cyclic loads that do not meet the parametric limitations for extended end-plate to be utilized in seismic zones according to AISC 358-16, but had to limit the beam depth to a certain extent due to insufficient hydraulic actuator capacity in the test setup. This thesis is a continuation of the aforementioned study, Akgönen et al. (2015), for simulating the behavior of extended end plate connections subject to cyclic loads with connecting beams with higher depths whose behavior under cyclic loading could not be examined.

Advanced three-dimensional finite element analysis models are prepared within the scope of this study, by using ABAQUS software. Accurately simulating the real behavior of connections through finite element models depends on many parameters such as, appropriate finite element type selection, determination of the right material model, representing the interaction between surfaces in contact, defining the boundary conditions correctly, and constructing the optimized finite element mesh arrangement.

In the finite element models, representation of connecting members is achieved with the finite element type C3D8R. Definition of "general contact" is used for interactions between contact surfaces. Behavior of surfaces in contact, in the normal direction is reflected into analysis model using the definition of "hard contact", the interaction model in which the elements are prevented from interfering with each other when the pressure stresses are greater than zero. Elements are allowed to be separated from each other, reflecting actual behavior. The interaction in the tangential direction is introduced to the analysis model using the definition of "penalty" and slip coefficient.

Selection of right material parameters is one of the most important factors when it comes to simulate the behavior of the connection members in finite element models compatible with the actual behavior under cyclic loading. In addition to the correct definition of the elastic behavior of the material, definition of the plastic region, especially for the beam elements which are expected to go through hardening, is of great importance and attention. The hardening model is defined for beam elements predicted to harden in finite element analysis models by introducing yield stress, kinematic hardening modulus and the rate which kinematic hardening modulus decrease with increasing plastic strain values to ABAQUS "parameters" section in "combine hardening" module.

In finite element models, finite element meshing techniques greatly affect the analysis results. The inconsistency of finite element meshes with model geometry and behavior can cause severe convergence problems. Within the scope of this study, "structured" and "sweep" finite element mesh generation techniques are applied while creating finite element meshes. In addition to mesh generation techniques being in high significance, the importance of mesh density is very high in obtaining high-fidelity outputs. For this reason, the mesh density is increased in the regions where the deformation is expected to be high, and finite element meshes are arranged with a suitable density along their thicknesses for the elements under bending.

Whether the finite element models adequately reflect the actual behavior can be determined by constructing verification models. In other words, a finite element analysis model accurately reflects the real behavior, as it results with outputs which comply to the test results of an experimental study. Within the scope of this study, a verification finite element model is constructed for one of the specimens tested in scope of the experimental study performed by Akgönen et al. (2015). The test procedure applied to the sample as per the experimental study is represented in the analysis model, but loaded monotonically. It is observed that the outputs of the advanced finite element model, which are created by considering the material parameters of the sample, the geometry of the test setup, the boundary conditions and the characteristic details of the joint detail, are compatible with the test results. It is concluded that the analysis results are compatible with the experimental study results and that the finite element models can simulate the actual connection behavior in terms of boundary conditions, surface interactions, material model and all components forming the finite element model.

In order to examine the cyclic behavior of extended end-plate connections with connecting beams that do not meet the parametric limitations of beam depth and flange width, finite element models, verified by experimental study, are established given for four-bolt extended end-plate moment connections, which are suitable to be applied in seismic regions in accordance with AISC 358-16. SAC cyclic loading protocol is applied to these connection models. As a result of the analyses, moment-

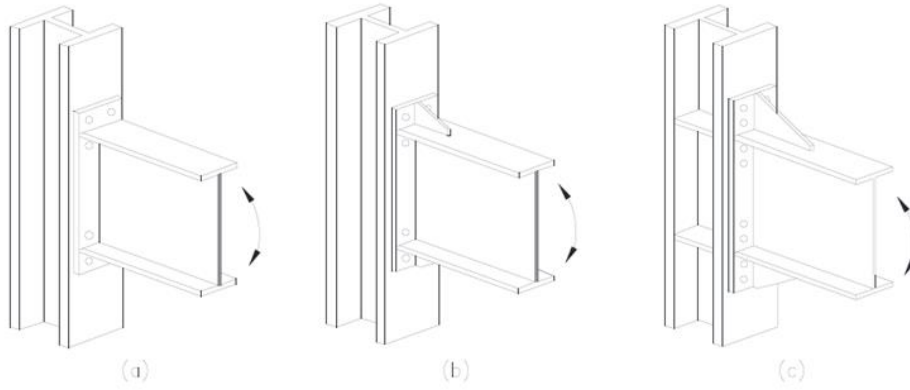
rotation curves are obtained. The resulting moment-rotation curves include the moment and rotation capacity of the connection. According to moment-rotation curves obtained, it is observed that extended end-plate connections, designed in accordance with TBDY 2018 and ÇYTHYE 2018 requirements, also complies with the requirements in AISC 341-16. In this case, one may state that parametric limitations in TBDY 2018 Table 9B.1 such as beam depth and end-plate width can be expanded and updated.





1. GİRİŞ

Yapısal tasarım kavramını, yapı sistemlerinin servis ömrü boyunca maruz kalacakları yükler altında dayanımını koruyacak şekilde ve ekonomik olarak boyutlandırılması şeklinde tanımlamak mümkündür. Yapıların güvenliği, yapıyı oluşturan elemanların ve bu elemanları birbirine bağlayan birleşim bölgelerinin yeterli rijitlik, süneklik ve dayanıma sahip olmalarına bağlıdır. Özellikle, deprem etkisi altındaki taşıyıcı sistemlerin boyutlandırılması söz konusu olduğunda, süneklik kavramı önem kazanmaktadır. Sistem sünekliği, yapı sisteminin dayanım ve rijitlik kaybı olmaksızın şekil değiştirme kapasitesi olarak tanımlanır. Moment aktaran çelik çerçevelerde süneklik, güçlü kolon-güçlü birleşim bölgesi-zayıf kiriş tasarım felsefesine dayanır. Bu tasarım felsefesine göre, deprem yükleri etkisi altında kalıcı şekil değiştirmelerin kiriş uçlarında yoğunlaşması, kolon ve birleşim bölgelerinde hasar oluşmaması hedeflenir. TBDY 2018 Bölüm 9 ve 9B, bu doğrultuda, deprem etkisi altında moment aktaran çelik çerçevelerin ve birleşimlerinin düzenlenmesi ile ilgili esasları içermektedir.



Şekil 1.1 : Tam dayanımlı alın levhalı bulonlu birleşim tipleri (TBDY 2018 Şekil 9B.2).

Alın levhalı bulonlu birleşimler, moment aktaran çelik çerçevelerde en sık kullanılan kiriş-kolon birleşim türlerinden biridir. TBDY 2018 ve AISC 358-16 uyarınca bu birleşimlerin deprem bölgelerinde kullanım için yeterliliği deneysel veya analitik yöntemler ile kanıtlanmış üç farklı tam dayanımlı (uzatılmış) alın levhalı bulonlu

birleşim tipi bulunmaktadır. Bunlar, tam dayanımlı alın levhalı dört bulonlu rijitlik levhasız (Şekil 1.1(a)), dört bulonlu rijitlik levhalı (Şekil 1.1(b)) ve sekiz bulonlu rijitlik levhalı (Şekil 1.1(c)), birleşimlerdir. Söz konusu birleşim tipleri için, sınırlı ve yüksek süneklik düzeyleri için tekrarlı tersinir yükler altında 0.04 radyan veya 0.02 radyan görelî kat ötelemesi açısı dönme kapasitesi koşulunu sağlayan uygulama sınırları TBDY 2018’de mevcuttur.

1.1 Çalışmanın Amacı

Deprem etkisi altında moment aktaran çelik çerçevelerde kullanılacak tam dayanımlı alın levhalı bulonlu kiriş-kolon birleşimleri için TBDY 2018 Tablo 9B.1 uyarınca uygulama sınırlarından biri, kiriş enkesit yüksekliğidir. Türkiye’de üretimi ve kullanımı yaygın olan hadde çelik profillerin bazıları bu uygulama sınırları içerisinde kalmasına rağmen AISC 358-16 yönetmeliğinde verilen enkesit yüksekliği ve kiriş başlık genişliği sınırlarının dışında kalmaktadır. Bu çalışmanın amacı, TBDY 2018’e göre kiriş enkesit yüksekliği sınır değerleri içerisinde kalan söz konusu birleşimlerin tekrarlı tersinir yükler altında AISC 341-16 uyarınca yeterli dönme açısı kapasitesine sahip olup olmadığını ve 0.04 radyan görelî kat ötelemesi açısına karşı gelen eğilme momenti dayanımının, birleşime bağlanan kirişin plastik eğilme momenti kapasitesinin %80’inden fazla olup olmadığını gözlemlemektir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada, iki adet kiriş-kolon birleşimi TBDY 2018 Bölüm 9, 9B ve ÇYTHYE 2018 tasarım esaslarına göre boyutlandırılmış ve ABAQUS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Sonlu eleman modelleme esasları ve malzemenin davranışı, Akgönen ve diğ. (2015)’nin yapmış olduğu deneysel bir çalışma ile doğrulanmıştır. Bu tez çalışması, söz konusu deneysel çalışmanın devamı niteliğindedir. Deneysel çalışma sırasında test düzeneğindeki yükleme sisteminin yük düzeyi kapasitesinin yetersiz kalması nedeniyle kiriş enkesitleri belirli bir eğilme momenti kapasitesini aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır. Test edilemeyen kiriş enkesitleri için boyutlandırılan birleşimlerin tekrarlı tersinir yükler altında davranışını araştırmak amacıyla ileri düzey sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş olup, bu birleşimlerin AISC 341-16 uyarınca deprem bölgelerinde kullanım kriterlerine uygunluğu irdelenmiştir.

1.3 Literatür Araştırması

Adey ve diğ. (2000), moment aktaran birleşimler için değişen bulon yerleşimi ve kiriş boyutlarının, enerji yutma kapasitesi ve sünekliğe olan etkisini incelemiştir. Sonuç olarak yüksek kirişlerin ve sıkışık bulon yerleşiminin birleşimin enerji yutma kapasitesinde azalmaya sebebiyet verdiğini bulmuştur.

Sumner ve Murray (2002), on bir adet alın levhalı moment aktaran birleşim için tekrarlı yükler altında performansını incelemek adına deneysel çalışma yapmıştır. Deneysel sonuçlar, alın levhalı moment aktaran birleşimlerin, sismik yükleri aktaran moment çerçevelerde kullanım için tasarlanabileceğini ve güçlü kolon, güçlü birleşim bölgesi ve zayıf kiriş felsefesinin kullanılması gerektiğini vurgulamıştır. Uzatılmış alın levhalı moment aktaran birleşimlerin sismik bölgelerde kullanım için gerekli olan gerekli mukavemeti, rijitliği ve sünekliği sağlayabileceği sonucuna varmıştır. Ayrıca, Sumner (2003), doktora tez çalışmasında sekiz farklı birleşim konfigürasyonu için moment aktaran kiriş-kolon birleşimi için tasarım prosedürü öne sürmüştür.

Gang Shi ve diğ. (2007), sekiz adet moment aktaran kiriş-kolon birleşimi numunesini histeretik yükler altında test etmiştir. Test aşamasında alın levhasının kalınlığı, kullanılan bulon çapının, rijitlik levhalarının değişmesi durumunun moment kapasitesi, dönme rijitliği, dönme kapasitesi ve histeretik eğrilere olan etkisini gözlemlemiştir. Bu çalışma sonucu, tam dayanımlı alın levhalı moment aktaran birleşimlerin sismik bölgelerde kullanım için yeterli rijitlik, mukavemet, süneklik ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, test sonuçları ve analiz sonuçlarına dayanarak uzatılmış alın levhalı birleşimler için kinematik pekleşme parametrelerine ilişkin bilineer moment-dönme modeli önermiştir.

Akgönen ve diğ. (2015), AISC 358-10'a göre kiriş başlık genişliği ve kiriş enkesit yüksekliği için belirtilen sınırlamaları karşılamayan Avrupa çelik profillerinden dört adet kirişin kolona dört bulonlu rijitlik levhasız uzatılmış alın levhalı birleşim detayının sismik bölgelerde kullanım için gereksinimleri sağlayıp sağlamadığını araştırmıştır. Yapılan deneyler ve sonlu elemanlar analiz sonuçları ile numunelerin TBDY 2018 uyarınca dönme açısı ve moment kapasitesi için mevcut tasarım hükümlerini karşıladığını göstermiştir.

Haghollahi ve Jannesar (2018), AISC 358-16 uyarınca sismik bölgelerde kullanımı onaylanmış, farklı alın levhası, bulon çapı ve farklı geometriye sahip H kesitli kolonlar ve I kesitli kirişlerden oluşan altı adet dört bulonlu alın levhalı birleşimi için ABAQUS yazılımını kullanarak gerçekleştirdiği sonlu eleman analizleri ile eşdeğer plastik gerilme, gerilme dağılım, moment-dönme ve histeretik eğriler üzerinde incelemeler yapmıştır. Bu çalışma sonucu, alın levhasının berkitme kullanılarak rijitleştirilmesinin veya kalınlığını arttırılmasının birleşimin histeretik yükler altında performansına etkisinin çok yüksek olmadığı, birleşimin kiriş gövdesinde veya başlığında yerel burkulma sonucu göçtüğü sonucuna varmıştır.

ElSabbagh ve diğ. (2019), hem monotonik hem de tekrarlı yükleme altında alın levhalı bulonlu birleşimlerin davranışını etkileyen parametreleri araştırmak amacıyla, ANSYS yazılımı ile toplam 108 adet üç boyutlu sonlu eleman analizi ile incelemiş ve sonuçlarını iki farklı deneysel çalışma ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, birleşimlerin rijitliği ile birlikte moment-dönme ilişkisine kesme kuvvetinin etkisi incelenmiştir. Birleşim bölgesine etki eden kesme kuvvetinin fazla olmasının, kiriş kesitinin küçük olmadığı durumlarda moment kapasitesini azalttığı sonucuna varmıştır. Ek olarak, alın levhasında teşkil edilen rijitlik levhalarının %7-15 arasında değişen bir değerle oluşan deformasyonları azalttığı ve bağlantının moment kapasitesini artırdığını öne sürmüştür. Çoğu durumda, bulon çapının ve başlık plakasının kalınlığının birlikte arttırılmasının, bağlantının hem moment kapasitesini, hem de dönme kapasitesini önemli oranlarda arttırdığını fakat optimize edilmiş alın levhası kalınlığının kullanılmasının bağlantının davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varmıştır. Ayrıca, tekrarlı yüklemeye tabi tutulan bir numunenin moment kapasitesinin, monotonik yüklemeye tabi tutulduğu zamandan %4 ile %26 arasında değişen bir değer ve yaklaşık %16 ortalama değer ile daha küçük olduğunu, dönme kapasitesinin ise monotonik yükleme ile karşılaştırıldığında yaklaşık %40'lık bir ortalama değer kadar daha küçük olduğunu belirtmiştir.

Radmehr ve Homami (2020), tam dayanımlı alın levhalı bulonlu birleşimleri sonlu elemanlar yazılımında modellemiş ve bağlantıların moment-dönme eğri grafiklerini karşılaştırmıştır. Shi ve diğ. (2006) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları ile doğrulama yaptıktan sonra, tüm bağlantıları AISC 358-16'ya göre tasarlamış ve birleşimlerin yapısal güvenilirliğini incelemiştir. Sonuçları istatistiksel

bir çalışma olarak sunmuştur. Tam dayanımlı dört bulonlu alın levhalı birleşimlerin AISC 358-16 tasarım kriterlerine uygun olarak tasarladığı durumda plastik mafsall bölgesinin kirişe doğru hareket ettiğini doğrulamıştır.





2. DEPREM BÖLGELERİNDE KULLANILAN TAM DAYANIMLI ALIN LEVHALI KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN TASARIM ESASLARI

TBDY 2018’de yer alan, deprem yüklerine maruz kalan moment aktaran çelik çerçevelerde kullanılan kiriş-kolon birleşimlerinin tasarım esaslarının arkasında güçlü kolon-güçlü birleşim-zayıf kiriş felsefesi yatmaktadır. Bu sebeple, deprem yükü gibi tekrarlı tersinir yükler altında plastikleşmenin kolon veya birleşim bölgesinde gerçekleşmesinden ziyade, kirişte olması, bir diğer deyişle, kirişi plastikleştiren iç kuvvet mertebelerinde kolon ve birleşim bölgesinin elastik kalması istenir. Söz konusu, kiriş-kolon birleşim bölgeleri için TBDY 2018 uyarınca üç koşul aranmaktadır. Bunlardan ilki, birleşimin en az 0.04 radyan görelî kat ötelemesi açısını sağlayabilecek kapasitede olması ve bu değerin deneysel ve/veya analitik yöntemler ile kanıtlanmış olması, ikincisi birleşimin kolon yüzündeki M_{uc} gerekli eğilme momenti dayanımının, TBDY 2018 Ek 9B’de tanımlanan detaylarda, düğüm noktasına birleşen kirişin olası plastik eğilme momenti, M_{pr} ile kiriş ucundaki olası plastik mafsallın yeri dikkate alınarak hesaplanacak eğilme momenti dayanımından daha az olmaması, sonuncusu ise birleşim bölgesinde, plastik mafsalda oluşacak momentler etkisi altında yeterli kesme dayanımı olmasıdır. TBDY 2018’e göre kirişte oluşan plastik mafsallın yeri, plastik mafsalda oluşacak olası eğilme momenti ve bu moment etkisiyle birleşim bölgesine etkiyecek tasarım kesme kuvvetinin belirlenme yöntemi

Şekil 2.2’de yer almaktadır. TBDY 2018 Ek 9B’de 0.04 görelî kat ötelemesi açısını sağlayabilecek kapasitede olan tam dayanımlı alın levhalı bulonlu birleşimler için uygulama sınırları verilmiştir.

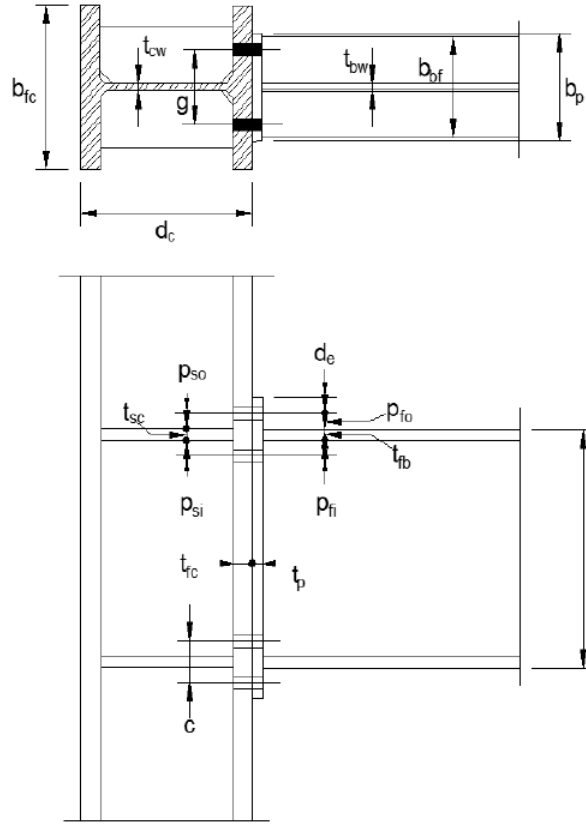
Bu çalışma kapsamında, sonlu eleman analizleri ile tekrarlı tersinir yükler altında davranışını incelemek amacıyla tasarımı ve boyutlandırılması yapılan IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 kiriş-kolon birleşimlerinin TBDY 2018 Tablo 9B.1’de yer alan kriterlere uygun olduğu Çizelge 2.1’de ve Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Birleşim detayı değişkenleri, daha iyi anlaşılması için Şekil 2.1’de ayrıca gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : IPE300-HEB360 birleşim detayı için TBDY 2018'e göre uygulama sınırlarının değerlendirilmesi

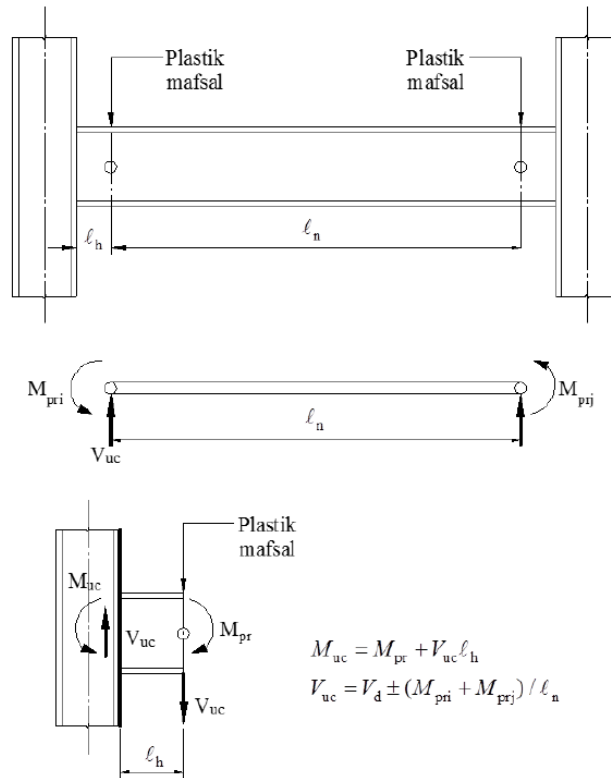
Birleşim Detayı Değişkenleri	Uygulama Sınırları	Değer	Durum
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7 (süneklik düzeyi yüksek çerçeveler) ≥ 5 (süneklik düzeyi sınırlı çerçeveler)	12.87	Uygun
Alın levhası kalınlığı, t_p	$12 \leq t \leq 60$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	30	Uygun
Alın levhası genişliği, b_p	$160 \leq b \leq 300$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	200	Uygun
Bulonlar arasındaki yatay uzaklık, g	$100 \leq g \leq 155$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	120	Uygun
p_f (p_{fi})	$40 \leq p \leq 115$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	50	Uygun
p_f (p_{fo})	$40 \leq p \leq 115$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	50	Uygun
Kiriş enkesit yüksekliği, d_b	$270 \leq d \leq 1400$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	300	Uygun
Kiriş başlık kalınlığı, t_{bf}	$10 \leq t \leq 25$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	10.7	Uygun
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 920 mm (I profilleri için)	360	Uygun
Bulon sınıfı	8.8 veya 10.9	10.9	Uygun
Alın levhası malzeme sınıfı	S235, S275 veya S355	S275	Uygun

Çizelge 2.2 : IPE330-HEB360 birleşim detayı için TBDY 2018'e göre uygulama sınırlarının değerlendirilmesi

Birleşim Detayı Değişkenleri	Uygulama Sınırları	Değer	Durum
Kiriş açıklığı / enkesit yüksekliği oranı	≥ 7 (süneklik düzeyi yüksek çerçeveler) ≥ 5 (süneklik düzeyi sınırlı çerçeveler)	11.70	Uygun
Alın levhası kalınlığı, t_p	$12 \leq t \leq 60$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	35	Uygun
Alın levhası genişliği, b_p	$160 \leq b \leq 300$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	210	Uygun
Bulonlar arasındaki yatay uzaklık, g	$100 \leq g \leq 155$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	120	Uygun
p_f (p_{fi})	$40 \leq p \leq 115$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	50	Uygun
p_f (p_{fo})	$40 \leq p \leq 115$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	50	Uygun
Kiriş enkesit yüksekliği, d_b	$270 \leq d \leq 1400$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	330	Uygun
Kiriş başlık kalınlığı, t_{bf}	$10 \leq t \leq 25$ mm (4 bulonlu rijitlik levhasız)	11.5	Uygun
Kolon enkesit yüksekliği	≤ 920 mm (I profilleri için)	360	Uygun
Bulon sınıfı	8.8 veya 10.9	10.9	Uygun
Alın levhası malzeme sınıfı	S235, S275 veya S355	S275	Uygun



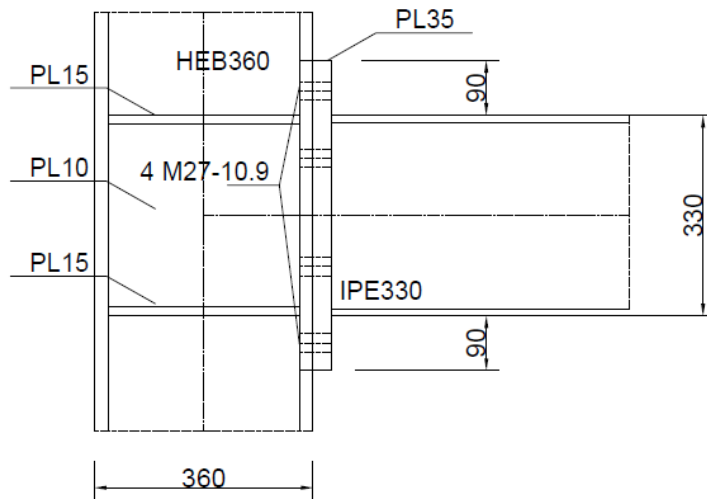
Şekil 2.1 : Birleşim detayı değişkenleri (TBDY 2018 Şekil 9B.3).



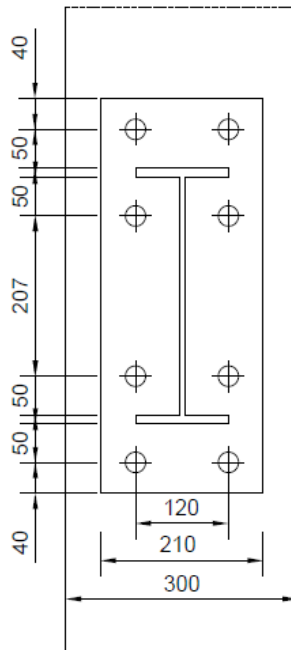
Şekil 2.2 : Plastik mafsallın yeri (TBDY 2018 Şekil 9B.3).

2.1 IPE330-HEB360 Birleşimi Tasarım Adımları

Bu bölümde IPE330-HEB360 tam dayanımlı dört bulonlu alın levhalı kiriş-kolon birleşimi için AISC 358-16, TBDY 2018 ve ÇYTHYE 2018 yönetmeliklerinde belirtilen tasarım ve boyutlandırma esaslarına göre hesap adımları paylaşılmıştır. Birleşim detayına ait geometri bilgisi Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.3 : IPE330-HEB360 birleşimi



Şekil 2.4 : IPE330-HEB360 birleşimi için bulon yerleşimi

IPE330-HEB360 birleşim detayına ait karakteristik bilgiler aşağıda yer almaktadır.

Malzeme:	S275	$F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_u = 430 \text{ MPa}$
		$E = 200000 \text{ MPa}$	$\gamma = 0.3$
Kiriş:	IPE330	$d_b = 330 \text{ mm}$	$W_{px} = 804.3 \text{ cm}^3$
		$h_b = 271 \text{ mm}$	$b_{bf} = 160 \text{ mm}$
		$t_{bf} = 11.5 \text{ mm}$	$t_{bw} = 7.5 \text{ mm}$
Kolon:	HEB360	$d_c = 360 \text{ mm}$	$W_{px} = 2683 \text{ cm}^3$
		$h_c = 261 \text{ mm}$	$b_{cf} = 300 \text{ mm}$
		$t_{cf} = 22.5 \text{ mm}$	$t_{cw} = 12.5 \text{ mm}$
Bulonlar:	M27-10.9	$F_u = 1000 \text{ MPa}$	$F_{nt} = 750 \text{ MPa}$

TBDY 2018 9B.1'e göre plastik mafsalsal bölgesindeki olası en büyük eğilme momenti değeri M_{pr} , denklem 2.1 yardımı ile hesaplanmıştır. Bu denklemde yer alan, akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını ifade eden R_y değeri TBDY 2018 Tablo 9.2'den S275 malzemesi için seçilmiştir. C_{pr} değeri denklem 2.2 ile hesaplanmıştır.

$$M_{pr} = C_{pr} R_y F_y W_{px} \quad (2.1)$$

$$e(C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} = \frac{275 + 430}{2(275)} = 1.28 > 1.2 \quad (2.2)$$

$$C_{pr} = 1.2$$

$$R_y = 1.3$$

$$M_{pr} = 1.2(1.3)(275)(804.3)10^{-3} = 345.04 \text{ kNm}$$

TBDY 2018 Tablo 9B.1'e göre kirişte oluşacak plastik mafsalsal kolon dış yüzünden itibaren uzaklığı l_h , kiriş enkesit yüksekliğinin yarısı ve kiriş başlık genişliğinin üç katı olan uzunluğun minimum değeri olarak denklem 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$l_h = \min\left(\frac{d_b}{2}, 3b_f\right) = \frac{330}{2} = 165 \text{ mm} \quad (2.3)$$

TBDY 2018 Şekil 9B.1'e göre kirişte oluşan plastik mafsallar arası net uzaklık, l_n denklem 2.4 ile hesaplanmıştır.

$$l_n = L - 2\left(\frac{d_c}{2}\right) - 2l_h = 3860 - 2\left(\frac{360}{2}\right) - 2(165) = 3170 \text{ mm} \quad (2.4)$$

TBDY 9.3.4.1(b) ve (c)'ye göre birleşimin kolon yüzündeki gerekli kesme kuvveti dayanımı V_{uc} ve gerekli eğilme momenti dayanımı M_{uc} TBDY Şekil 9B.1 esas alınarak denklem 2.5 ve 2.6 ile hesaplanmıştır.

$$V_{uc} = V_d \pm (M_{pri} + M_{prj}) / l_n \quad (2.5)$$

$$V_{uc} = 0 \pm (345.04 + 345.04) / 3.17 = 217.7 \text{ kN}$$

$$M_{uc} = M_{pr} \pm V_{uc} l_h \quad (2.6)$$

$$M_{uc} = 345.04 \pm 217.7(0.165) = 380.96 \text{ kNm}$$

AISC 358-16 6.8'e göre birleşim detayı için gerekli bulon çapının belirlenmesi için denklem 2.7 kullanılmıştır.

$$d_{bReq'd} = \sqrt{\frac{2M_{uc}}{\pi \phi F_{nt} (h_0 + h_1)}} \quad (2.7)$$

$$d_{bReq'd} = \sqrt{\frac{2 \times 380.96}{\pi \times 0.75 \times 750 (262.75 + 374.25)}} = 26 \text{ mm}$$

Seçilen M27 – 10.9 bulon çapı ve malzemesi için bir bulonun karakteristik çekme dayanımı, B_{nt} ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.8 ile hesaplanmıştır.

$$B_{nt} = F_{nt} A_{yb} = 750 \left(\pi \times \frac{27^2}{4} \right) 10^{-3} = 429.4 \text{ kN} \quad (2.8)$$

Rijitlik Levhasız Alın Levhası Geometrisi ve Akma Çizgileri	Bulon Kuvveti Modeli
Alın Levhası	$Y_p = \frac{b_p}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{p_{fi}} + \frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{p_{fo}} \right) - \frac{1}{2} \right] + \frac{2}{g} [h_1 (p_{fi} + s)]$ $s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} \quad \text{Eğer, } p_{fi} > s \text{ ise } p_{fi} = s.$

Şekil 2.5 : Alın levhasında oluşan tipik akma çizgileri (AISC 358-16 Tablo 6.2)

Şekil 2.5’de gösterildiği üzere, AISC 358-16 uyarınca kalın levha davranışı sağlanacak şekilde, alın levhasının düzlem dışı deformasyonu sonucu oluşan kaldırma kuvveti etkisi göz önüne alınmadan, bulonların çekme dayanımları ve her bir bulonun, belirlenen tarafsız eksene göre olan uzaklığı göz önünde bulundurularak hesaplanan eğilme momenti M_{np} , denklem 2.9 ile hesaplanmıştır.

$$M_{np} = 2B_{nt} (h_0 + h_1) = 2(429.4)(262.75 + 374.25)10^{-3} = 546.55 kNm \quad (2.9)$$

$$\phi M_{np} = 0.75(546.55) = 409.91 kNm > M_{uc} = 380.96 kNm$$

Kalın levha davranışının sağlanabilmesi için, akma çizgileri yöntemi ile hesaplanan alın levhası ve kolon başlığı eğilme momenti dayanımlarının, M_{pl} ve M_{cf} , hesaplanan M_{np} değerinin 1.11 katına büyük veya eşit olmalıdır. Akma çizgilerine göre alın levhası ve kolon başlığı eğilme momenti dayanımları AISC 358-16’de verilen ve Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 ile gösterilen denklemler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} = \frac{1}{2} \sqrt{210 \times 120} = 79.37 mm > p_{fi}, d_e$$

Birleşim geometrisine göre $p_{fi} = p_{fo} = 50 mm$ ve $d_e = 40 mm$ ’dir.

$$Y_p = 2199.3 \text{ mm}$$

AISC 358-16 6.8'e göre gerekli alın levhası kalınlığı denklem 2.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$t_{pReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_y Y_p}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 409.91}{0.9 \times 275 \times 1976.5}} = 28.9 \text{ mm} < 35 \text{ mm} \quad (2.10)$$

ÇYTHYE 2018'e göre basınç bölgesinde kalan bulonların kesme kuvveti dayanımı denklem 2.11 ile hesaplanmıştır. Bulonların dış açılmış uzunluklarının kayma düzleminde kaldığı varsayılmıştır.

$$\phi R_n = 0.75(4)0.45(1000) \left(\pi \times \frac{27^2}{4} \right) 10^{-3} = 772.2 \text{ kN} > V_{uc} = 217.7 \text{ kN} \quad (2.11)$$

Kolon başlık kalınlığı alın levhası kalınlığından küçük olduğundan, kolon başlığında ezilme ve yırtılma kontrolleri yapılmıştır. ÇYTHYE 2018'e göre bulon deliklerinin ezilme ve kolon başlığının yırtılma dayanımı denklem 2.12 ve 2.13 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \phi 2.4 d t F_u = 0.75(2.4)(27)(22.5)(430) 10^{-3} = 470.2 \text{ kN} \quad (2.12)$$

$$l_c = 40 - 0.5(27 + 2) = 25.5 \text{ mm}$$

$$\phi R_n = \phi l_c t F_u = 0.75(25.5)(22.5)(430) 10^{-3} = 185.03 \text{ kN} < 470.2 \text{ kN} \quad (2.13)$$

$$\Sigma \phi R_n = 4(185.03) = 740.1 \text{ kN} > V_{uc} = 217.7 \text{ kN}$$

Kolon başlık kalınlığı kontrolü için gerekli parametreler AISC 358-16 Tablo 6.5'e göre birleşim detayına ait geometri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Rijitlik Levhasız Kolon Başlığı Geometrisi ve Akma Çizgileri	Rijitlik Levhali Kolon Başlığı Geometrisi ve Akma Çizgileri
Rijitlik Levhasız Kolon Başlığı	$Y_c = \frac{b_{cf}}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} \right) \right] + \frac{2}{g} \left[h_1 \left(s + \frac{3c}{4} \right) + h_0 \left(s + \frac{c}{4} \right) + \frac{c^2}{2} \right] + \frac{g}{2}$ $s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{cf} g}$
Rijitlik Levhali Kolon Başlığı	$Y_c = \frac{b_{cf}}{2} \left[h_1 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{si}} \right) + h_0 \left(\frac{1}{s} + \frac{1}{p_{so}} \right) \right] + \frac{2}{g} \left[h_1 (s + p_{si}) + h_0 (s + p_{so}) \right]$ $s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{cf} g} \quad \text{Eğer, } p_{si} > s \text{ ise } p_{si} = s.$

Şekil 2.6 : Kolon başlığında oluşan tipik akma çizgileri (AISC 358-16 Tablo 6.5)

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{fc} g} = \frac{1}{2} \sqrt{300 \times 120} = 94.87 \text{ mm} > p_{fi}, d_e$$

$$c = p_{fo} + p_{fi} + t_{bf} = 50 + 50 + 11.5 = 111.5 \text{ mm}$$

$$Y_c = 2718.05 \text{ mm}$$

AISC 358-16 6.8'e göre gerekli kolon başlık kalınlığı denklem 2.14 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$t_{cfReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_{yc} Y_c}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 409.91}{0.9 \times 275 \times 2718.05}} = 26 \text{ mm} > 22.5 \text{ mm} \quad (2.14)$$

Kolon başlık kalınlığı yetersiz kaldığından süreklilik levhaları teşkil edilmiştir. Rijitlik levhalarının kalınlığı kiriş başlık kalınlığından büyük olacak şekilde seçilmiştir.

$$t_s = 15 \text{ mm} > t_{bf} = 11.5 \text{ mm}$$

Süreklilik levhalarının kullanılması halinde, dayanım ve rijitliği artmış olan kolon başlığının değişen akma çizgileri düzeni göz önüne alındığında Y_c parametresi ve gerekli kolon başlık kalınlığı, birleşim geometrisine göre yeniden hesaplanmıştır.

$$p_{so} = p_{si} = \frac{c - t_s}{2} = \frac{111.5 - 15}{2} = 48.25 \text{ mm}$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{fc} g} = \frac{1}{2} \sqrt{300 \times 120} = 94.87 \text{ mm} > p_{si}$$

$$Y_c = 4241 \text{ mm}$$

$$t_{cfReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_{yc} Y_c}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 409.91}{0.9 \times 275 \times 4241}} = 21 \text{ mm} < 22.5 \text{ mm}$$

Süreklilik levhalarının dayanımının kontrolü için, kiriş başlıkları vasıtasıyla aktarılan kuvvet F_{fu} , AISC 358-16 6.8'e göre denklem 2.15 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{(d_b - t_{bf})} = \frac{380.96}{(330 - 11.5)} = 1196.1 \text{ kN} \quad (2.15)$$

AISC 358-16 6.8'e göre süreklilik levhaları ile rijitleştirilmiş kolon başlığının tasarım eğilme momenti dayanımı, ϕM_{cf} ve tekil kuvvete dönüştürülmesi ile oluşan karşılığı, ϕR_n denklem 2.16 ve 2.17 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\phi M_{cf} = \phi_b F_{yc} Y_c t_{cf}^2 = 0.9 (275) (2718.05) (22.5)^2 = 340.6 \text{ kNm} \quad (2.16)$$

$$\phi R_n = \frac{\phi M_{cf}}{(d_b - t_{bf})} = \frac{340.6}{(330 - 11.5)} = 1069.3 \text{ kN} < 1196.1 \text{ kN} \quad (2.17)$$

Süreklilik levhalarının boyutlandırılması hususunda kolon gövdesi yerel akma, burkulma ve yerel burkulma sınır durumları için dayanım kontrolleri yapılmıştır.

Kolon gövdesinin yerel akma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.18 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \phi \left[C_t (6k_c + 2t_p + 2t_{fb}) \right] F_{yc} t_{cw} \quad (2.18)$$

$$\phi R_n = 1.0 \left[1.0 (6(49.5) + 2(35) + 2(11.5)) \right] (275)(12.5) 10^{-3}$$

$$\phi R_n = 1340.63 \text{ kN} > F_{fu} = 1196.1 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesi, yerel akma sınır durumu için yeterli dayanıma sahiptir.

Kolon gövdesinin burkulma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.19 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \frac{\phi 24 t_{cw}^3 \sqrt{EF_{yc}}}{h} = \frac{0.9(24)(12.5)^3 \sqrt{(200000)(275)}}{261} = 1198.74 \text{ kN} \quad (2.19)$$

$$\phi R_n = 1198.74 \text{ kN} > F_{fu} = 1196.1 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesi, burkulma sınır durumu için yeterli dayanıma sahiptir.

Kolon gövdesinin yerel burkulma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.20 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \phi 0.8 t_{cw}^2 \left[1 + 3 \left(\frac{l_b}{d_c} \right) \left(\frac{t_{cw}}{t_{cf}} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{EF_{yc} t_{cf}}{t_{cw}}} \quad (2.20)$$

$$\phi R_n = 0.75(0.8)(12.5)^2 \left[1 + 3 \left(\frac{7.5}{360} \right) \left(\frac{12.5}{22.5} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{200000(275)(22.5)}{(12.5)}} 10^{-3}$$

$$\phi R_n = 956.94 \text{ kN} < F_{fu} = 1196.1 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesinin dayanımı, yerel burkulma sınır durumu için yetersiz kalmaktadır.

Bu durumda, kolon alt ve üst başlıkları arasına ve gövdesinin her iki yüzüne teşkil edilen rijitlik levhalarının kontrolü için tasarım kuvveti, F_{cu} denklem 2.21 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{cu} = F_{fu} - \min[\phi R_n] = 1196.1 - \min[1069.3 \text{ kN}; 956.94 \text{ kN}] \quad (2.21)$$

$$F_{cu} = 239.16 \text{ kN}$$

Kolon gövdesinin her iki yüzü ve kolon başlıklarının iç taraflarına 15 mm kalınlığında 100 mm genişliğinde süreklilik levhaları teşkil edilmiştir. Seçilen süreklilik levhalarının dayanımının kontrolü, denklem 2.22’de gösterildiği gibi yapılmıştır.

$$A_{stReq'd} = \frac{F_{cu}}{\phi F_{ys}} = \frac{(239.16)10^3}{0.9(275)} = 966 \text{ mm}^2 < A_{st} = 2(15)(100) = 3000 \text{ mm}^2 \quad (2.22)$$

Kolon panel bölgesinin kontrolü TBDY 2018’e göre kolona birleşen kirişlerin plastik mafsallık bölgesinde oluşan, olası en büyük eğilme momentlerinin etkisiyle meydana gelen kesme kuvvetleri (Denklem 2.23) esas alınarak yapılmış ve ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği’ne göre söz konusu kayma bölgesinin dayanımı (Denklem 2.24) hesaplanmıştır.

$$V_{up} = \sum M_{uc} \left(\frac{1}{d_b - t_{bf}} - \frac{1}{H_{ort}} \right) = 2(380.96) \left(\frac{1}{(330 - 11.5)} - \frac{1}{3000} \right) 10^3 \quad (2.23)$$

$$V_{up} = 2138.2 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{yc} d_c t_{cw} \left(1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right) \quad (2.24)$$

$$\phi V_n = (0.6)(275)(360)(12.5) \left(1 + \frac{3(300)(22.5)^2}{330(360)(12.5)} \right) 10^{-3} = 970.31 \text{ kN}$$

$$\phi V_n < V_{up} = 2138.2 \text{ kN}$$

Kolon panel bölgesinin kesme dayanımı yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, kolon gövdesinin iki yüzüne 10 mm kalınlığında takviye levhaları teşkil edilmiştir. Takviye levhalarının kalınlığı, TBDY 2018 9B uyarınca aşağıdaki bağıntı ile hesaplanan değerden küçük olmamalıdır.

$$t_{min} = \frac{u}{180} = \frac{2(330+360)}{180} = 7.7 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$$

Takviye levhalarının yerleştirilmesiyle birlikte kolon panel bölgesinin kesme dayanımı tekrar hesaplanmıştır.

$$\phi V_n = (0.6)(275)(360)(12.5 + 2 \times 10) \left(1 + \frac{3(300)(22.5)^2}{330(360)(12.5 + 2 \times 10)} \right) 10^{-3}$$

$$\phi V_n = 2158.31 \text{ kN} > V_{up} = 2138.2 \text{ kN}$$

Bu bölümde yapılan boyutlandırma ve tasarım adımları sonrası, birleşim bölgesinin, bağlanan kirişin plastikleşmesi durumunda elastik bölgede kalması sağlanmıştır.

2.2 IPE300-HEB360 Birleşimi Tasarım Adımları

Bu bölümde IPE300-HEB360 tam dayanımlı dört bulonlu alın levhali kiriş-kolon birleşimi için AISC 358-16, TBDY 2018 ve ÇYTHYE 2018 yönetmeliklerinde belirtilen tasarım ve boyutlandırma esaslarına göre hesap adımları paylaşılmıştır. Birleşim detayına ait geometri bilgisi Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de verilmiştir. IPE300-HEB360 birleşimi için tüm tasarım ve boyutlandırma esasları bu çalışmada Bölüm 2.1 içerisinde yer alan IPE330-HEB360 birleşimi için yapılan hesap adımları ile aynı çerçevededir. Aynı hesap adımları izleneceğinden, denklemlerin kapalı formlarına bu bölümde yer verilmemiştir. IPE330-HEB360 birleşim detayına ait karakteristik bilgiler aşağıda yer almaktadır.

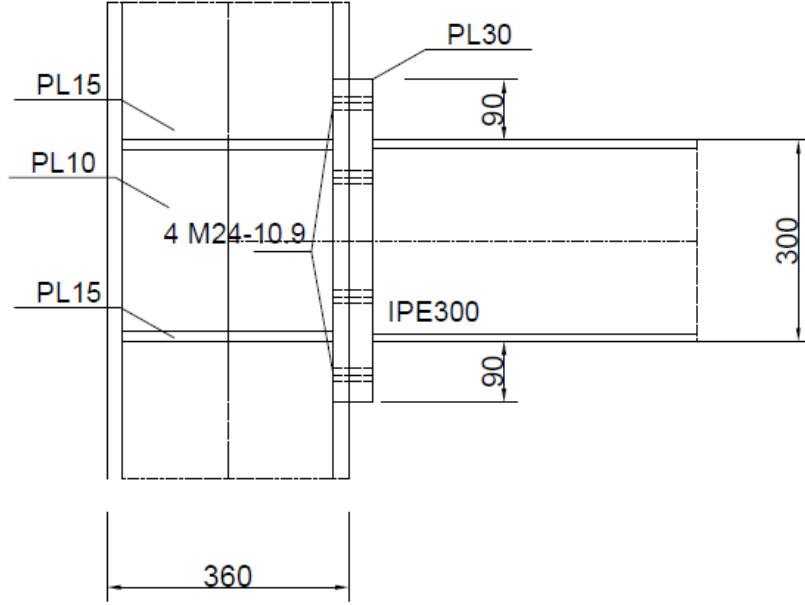
Malzeme:	S275	$F_y = 275 \text{ MPa}$	$F_u = 430 \text{ MPa}$
		$E = 200000 \text{ MPa}$	$\gamma = 0.3$
Kiriş:	IPE300	$d_b = 300 \text{ mm}$	$W_{px} = 628.4 \text{ cm}^3$
		$h_b = 278.6 \text{ mm}$	$b_{bf} = 150 \text{ mm}$
		$t_{bf} = 10.7 \text{ mm}$	$t_{bw} = 7.1 \text{ mm}$
Kolon:	HEB360	$d_c = 360 \text{ mm}$	$W_{px} = 2683 \text{ cm}^3$
		$h_c = 261 \text{ mm}$	$b_{cf} = 300 \text{ mm}$
		$t_{cf} = 22.5 \text{ mm}$	$t_{cw} = 12.5 \text{ mm}$

Bulonlar:

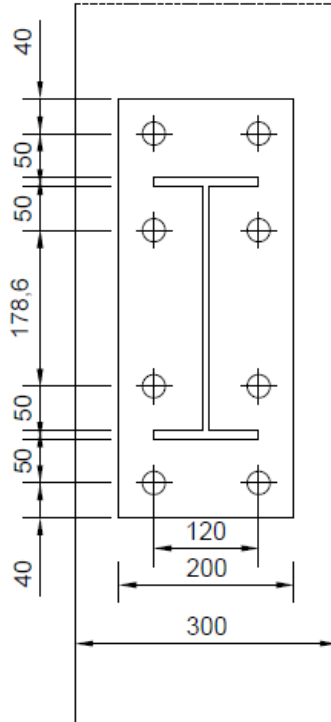
M24-10.9

$F_u = 1000 \text{ MPa}$

$F_{nt} = 750 \text{ MPa}$



Şekil 2.7 : IPE300-HEB360 birleşimi



Şekil 2.8 : IPE300-HEB360 birleşimi için bulon yerleşimi

TBDY 2018 9B.1'e göre plastik mafsal bölgesindeki olası en büyük eğilme momenti değeri M_{pr} , denklem 2.1 yardımı ile hesaplanmıştır. Bu denklemde yer alan, akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını ifade eden R_y değeri TBDY 2018 Tablo 9.2'den S275 malzemesi için seçilmiştir. C_{pr} değeri denklem 2.2 ile hesaplanmıştır.

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} = \frac{275 + 430}{2(275)} = 1.28 > 1.2$$

$$C_{pr} = 1.2$$

$$R_y = 1.3$$

$$M_{pr} = 1.2(1.3)(275)(628.4)10^{-3} = 269.5 \text{ kNm}$$

TBDY 2018 Tablo 9B.1'e göre kirişte oluşacak plastik mafsalın kolon dış yüzünden itibaren uzaklığı l_h , kiriş enkesit yüksekliğinin yarısı ve kiriş başlık genişliğinin üç katı uzunluğun minimum değeri olarak, denklem 2.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$l_h = \min\left(\frac{d_b}{2}, 3b_f\right) = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}$$

TBDY 2018 Şekil 9B.1'e göre kirişte oluşan plastik mafsallar arası net uzaklık, l_n denklem 2.4 ile hesaplanmıştır.

$$l_n = L - 2\left(\frac{d_c}{2}\right) - 2l_h = 3860 - 2\left(\frac{360}{2}\right) - 2(150) = 3200 \text{ mm}$$

TBDY 9.3.4.1(b) ve (c)'ye göre birleşimin kolon yüzündeki gerekli kesme kuvveti dayanımı V_{uc} ve gerekli eğilme momenti dayanımı M_{uc} TBDY Şekil 9B.1 esas alınarak denklem 2.5 ve 2.6 ile hesaplanmıştır.

$$V_{uc} = 0 \pm (269.5 + 269.5) / 3.2 = 168.4 \text{ kN}$$

$$M_{uc} = 269.5 \pm 168.4(0.150) = 295 \text{ kNm}$$

AISC 358-16 6.8'e göre birleşim detayı için gerekli bulon çapının belirlenmesi için denklem 2.7 kullanılmıştır.

$$d_{bReq'd} = \sqrt{\frac{2 \times 294.9}{\pi \times 0.75 \times 750(344.65 + 233.95)}} = 24 \text{ mm}$$

Seçilen M24 – 10.9 bulon çapı ve malzemesi için bir bulonun karakteristik çekme dayanımı, B_{nt} ÇYTHYE 2018’e göre denklem 2.8 ile hesaplanmıştır.

$$B_{nt} = F_{nt} A_{yb} = 750 \left(\pi \times \frac{24^2}{4} \right) 10^{-3} = 339.3 \text{ kN}$$

şekil 2.5’de gösterildiği üzere, AISC 358-16 uyarınca kalın levha davranışı sağlanacak şekilde, alın levhasının düzlem dışı deformasyonu sonucu oluşan kaldırma kuvveti etkisi göz önüne alınmadan, bulonların çekme dayanımları ve her bir bulonun, belirlenen tarafsız eksene göre olan uzaklığı göz önünde bulundurularak hesaplanan eğilme momenti M_{np} , denklem 2.9 ile hesaplanmıştır.

$$M_{np} = 2B_{nt} (h_0 + h_1) = 2(339.3)(344.65 + 233.95)10^{-3} = 392.7 \text{ kNm}$$

$$\phi M_{np} = 0.75(392.7) = 295 \text{ kNm} = M_{uc} = 295 \text{ kNm}$$

Kalın levha davranışının sağlanabilmesi için, akma çizgileri yöntemi ile hesaplanan alın levhası ve kolon başlığı eğilme momenti dayanımlarının, M_{pl} ve M_{cf} , hesaplanan M_{np} değerinin 1.11 katına büyük veya eşit olmalıdır. Akma çizgilerine göre alın levhası ve kolon başlığı eğilme momenti dayanımları AISC 358-16’de verilen ve şekil 2.5 ve şekil 2.6 ile gösterilen denklemler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_p g} = \frac{1}{2} \sqrt{200 \times 120} = 77.46 \text{ mm} > p_{fi}, d_e$$

Birleşim geometrisine göre $p_{fi} = p_{fo} = 50 \text{ mm}$ ve $d_e = 40 \text{ mm}$ ’dir.

$$Y_p = 1906.2 \text{ mm}$$

$$t_{pReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_y Y_p}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 295}{0.9 \times 275 \times 1906.2}} = 26 \text{ mm} < 30 \text{ mm}$$

AISC 358-16 6.8’e göre gerekli alın levhası kalınlığı denklem 2.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

ÇYTHYE 2018’e göre basınç bölgesinde kalan bulonların kesme kuvveti dayanımı denklem 2.11 ile hesaplanmıştır. Bulonların dış açılmış uzunluklarının kayma düzleminde kaldığı varsayılmıştır.

$$\phi R_n = 0.75(4)0.45(1000) \left(\pi \times \frac{24^2}{4} \right) 10^{-3} = 610.7 \text{ kN} > V_{uc} = 168.4 \text{ kN}$$

Kolon başlık kalınlığı alın levhası kalınlığından küçük olduğundan, kolon başlığında ezilme ve yırtılma kontrolleri yapılmıştır. ÇYTHYE 2018'e göre bulon deliklerinin ezilme ve kolon başlığının yırtılma dayanımı denklem 2.12 ve 2.13 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \phi 2.4 d t F_u = 0.75 (2.4) (24) (22.5) (430) 10^{-3} = 417.96 \text{ kN}$$

$$l_c = 40 - 0.5 (24 + 2) = 27 \text{ mm}$$

$$\phi R_n = \phi l_c t F_u = 0.75 (27) (22.5) (430) 10^{-3} = 195.92 \text{ kN} < 417.96 \text{ kN}$$

$$\Sigma \phi R_n = 4 (195.92) = 783.7 \text{ kN} > V_{uc} = 168.4 \text{ kN}$$

Kolon başlık kalınlığı kontrolü için gerekli parametreler AISC 358-16 Tablo 6.5'e göre birleşim detayına ait geometri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{fc} g} = \frac{1}{2} \sqrt{300 \times 120} = 94.87 \text{ mm} > p_{fi}, d_e$$

$$c = p_{fo} + p_{fi} + t_{bf} = 50 + 50 + 10.7 = 110.7 \text{ mm}$$

$$Y_c = 2474.5 \text{ mm}$$

$$t_{cfReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_{yc} Y_c}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 295}{0.9 \times 275 \times 2474.5}} = 23.1 \text{ mm} > 22.5 \text{ mm}$$

Kolon başlık kalınlığı yetersiz kaldığından süreklilik levhaları teşkil edilmiştir. Rijitlik levhalarının kalınlığı kiriş başlık kalınlığından büyük olacak şekilde seçilmiştir.

$$t_s = 15 \text{ mm} > t_{bf} = 10.7 \text{ mm}$$

Süreklilik levhalarının kullanılması halinde, dayanım ve rijitliği artmış olan kolon başlığının değişen akma çizgileri düzeni göz önüne alındığında Y_c parametresi ve gerekli kolon başlık kalınlığı, birleşim geometrisine göre yeniden hesaplanmıştır.

$$p_{so} = p_{si} = \frac{c - t_s}{2} = \frac{110.7 - 15}{2} = 47.85 \text{ mm}$$

$$s = \frac{1}{2} \sqrt{b_{fc} g} = \frac{1}{2} \sqrt{300 \times 120} = 94.87 \text{ mm} > p_{si}$$

$$Y_c = 3841.6 \text{ mm}$$

$$t_{cfReq'd} = \sqrt{\frac{1.11 \phi M_{np}}{\phi_b F_{yc} Y_c}} = \sqrt{\frac{1.11 \times 295}{0.9 \times 275 \times 3841.6}} = 19 \text{ mm} < 22.5 \text{ mm}$$

Süreklilik levhalarının dayanımının kontrolü için, kiriş başlıkları vasıtasıyla aktarılan kuvvet F_{fu} , AISC 358-16 6.8'e göre denklem 2.15 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{fu} = \frac{M_{uc}}{(d - t_{bf})} = \frac{295}{(300 - 10.7)} = 1019.7 \text{ kN}$$

AISC 358-16 6.8'e göre süreklilik levhaları ile rijitleştirilmiş kolon başlığının tasarım eğilme momenti dayanımı, ϕM_{cf} ve tekil kuvvete dönüştürülmesi ile oluşan karşılığı, ϕR_n denklem 2.16 ve 2.17 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\phi M_{cf} = \phi_b F_{yc} Y_c t_{cf}^2 = 0.9(275)(2474.5)(22.5)^2 = 310 \text{ kNm}$$

$$\phi R_n = \frac{\phi M_{cf}}{(d - t_{bf})} = \frac{310}{(300 - 10.7)} = 1072 \text{ kN} > 1019.7 \text{ kN}$$

Süreklilik levhalarının boyutlandırılması hususunda kolon gövdesi yerel akma, burkulma ve yerel burkulma sınır durumları için dayanım kontrolleri yapılmıştır.

Kolon gövdesinin yerel akma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.18 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = 1.0 \left[1.0(6(49.5) + 2(30) + 2(10.7)) \right] (275)(12.5) 10^{-3}$$

$$\phi R_n = 1300.75 \text{ kN} > F_{fu} = 1019.7 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesi, yerel akma sınır durumu için yeterli dayanıma sahiptir.

Kolon gövdesinin burkulma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.19 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = \frac{\phi 24 t_{cw}^3 \sqrt{E F_{yc}}}{h} = \frac{0.9(24)(12.5)^3 \sqrt{(200000)(275)}}{261} = 1198.74 \text{ kN}$$

$$\phi R_n = 1198.74 \text{ kN} > F_{fu} = 1019.7 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesi, burkulma sınır durumu için yeterli dayanıma sahiptir.

Kolon gövdesinin yerel burkulma sınır durumu için dayanımı ÇYTHYE 2018'e göre denklem 2.20 ile hesaplanmıştır.

$$\phi R_n = 0.75(0.8)(12.5)^2 \left[1 + 3 \left(\frac{7.1}{360} \right) \left(\frac{12.5}{22.5} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{200000(275)(22.5)}{(12.5)}} 10^{-3}$$

$$\phi R_n = 955.6 \text{ kN} < F_{fu} = 1019.7 \text{ kN}$$

Buna göre kolon gövdesinin dayanımı, yerel burkulma sınır durumu için yetersiz kalmaktadır.

Bu durumda, kolon alt ve üst başlıkları arasına ve gövdesinin her iki yüzüne teşkil edilen rijitlik levhalarının kontrolü için tasarım kuvveti, F_{cu} denklem 2.21 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F_{cu} = F_{fu} - \min[\phi R_n] = 1019.7 - 955.6$$

$$F_{cu} = 64.1 \text{ kN}$$

Kolon gövdesinin her iki yüzü ve kolon başlıklarının iç taraflarına 15 mm kalınlığında 100 mm genişliğinde süreklilik levhaları teşkil edilmiştir. Seçilen süreklilik levhalarının dayanımının kontrolü, denklem 2.22'de gösterildiği gibi yapılmıştır.

$$A_{stReq'd} = \frac{F_{cu}}{\phi F_{ys}} = \frac{(64.1)10^3}{0.9(275)} = 259 \text{ mm}^2 < A_{st} = 2(15)(100) = 3000 \text{ mm}^2$$

Kolon panel bölgesinin kontrolü TBDY 2018'e göre kolona birleşen kirişlerin plastik mafsallık bölgesinde oluşan, olası en büyük eğilme momentlerinin etkisiyle meydana gelen kesme kuvvetleri (Denklem 2.23) esas alınarak yapılmış ve ÇYTHYE 2018 Yönetmeliği'ne göre söz konusu kayma bölgesinin dayanımı (Denklem 2.24) hesaplanmıştır.

$$V_{up} = \sum M_{uc} \left(\frac{1}{d_b - t_{bf}} - \frac{1}{H_{ort}} \right) = 2(295) \left(\frac{1}{(300 - 10.7)} - \frac{1}{3000} \right) 10^3$$

$$V_{up} = 1842.7 \text{ kN}$$

$$\phi V_n = \phi 0.6 F_{yc} d_c t_{cw} \left(1 + \frac{3b_{cf} t_{cf}^2}{d_b d_c t_w} \right)$$

$$\phi V_n = (0.6)(275)(360)(12.5) \left(1 + \frac{3(300)(22.5)^2}{300(360)(12.5)} \right) 10^{-3} = 993 \text{ kN}$$

$$\phi V_n < V_{up} = 1842.7 \text{ kN}$$

Kolon panel bölgesinin kesme dayanımı yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, kolon gövdesinin iki yüzüne 10 mm kalınlığında takviye levhaları teşkil edilmiştir. Takviye levhalarının kalınlığı, TBDY 2018 9B uyarınca aşağıdaki bağıntı ile hesaplanan değerden küçük olmamalıdır.

$$t_{min} = \frac{u}{180} = \frac{2(300+360)}{180} = 7.3 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$$

Takviye levhalarının yerleştirilmesiyle birlikte kolon panel bölgesinin kesme dayanımı tekrar hesaplanmıştır.

$$\phi V_n = (0.6)(275)(360)(12.5 + 2 \times 10) \left(1 + \frac{3(300)(22.5)^2}{300(360)(12.5 + 2 \times 10)} \right) 10^{-3}$$

$$\phi V_n = 2181 \text{ kN} > V_{up} = 1842.7 \text{ kN}$$

Bu bölümde yapılan boyutlandırma ve tasarım adımları sonucunda, birleşim bölgesinin, bağlanan kirişin plastikleşmesi durumunda elastik bölgede kalması sağlanmıştır.

3. SONLU ELEMAN MODELİ

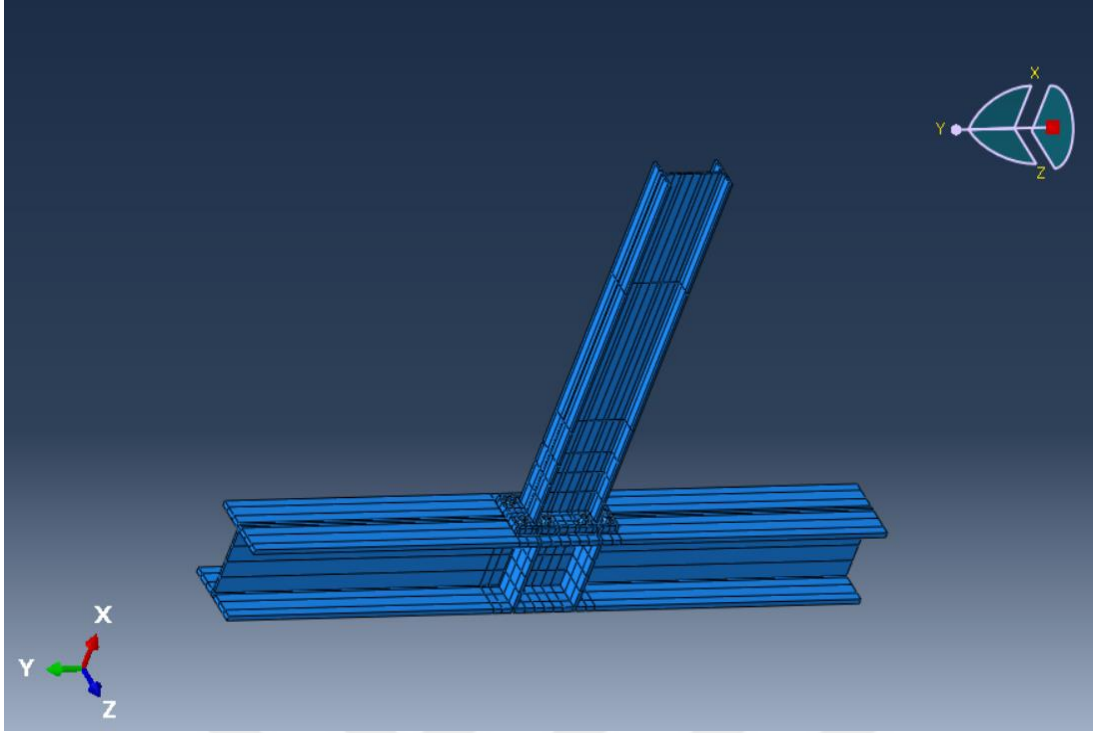
Sonlu elemanlar modeli kullanılarak alın levhalı bulonlu birleşimlerin davranışının simülasyonu, kabul edilebilir doğruluk seviyesi ile yapılabilir. Sonlu elemanlar analizleri, deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında zaman ve maliyeti azaltabilir. Sonlu eleman modelleri ve deneysel testler arasındaki önemsiz farklılıklar, idealize edilmiş elasto-plastik malzeme modeli ile gerçek malzeme gerilme-şekil değiştirme modelleri arasındaki farkın yanı sıra deneysel çalışmalarda kullanılan gerçek bağlantılardaki başlangıç kusurları ve fabrikasyon hatalarından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, tekrarlı tersinir yükler altında davranışı simüle edilen birleşimler için ileri düzey sonlu eleman modelleri, ABAQUS yazılımında kullanılmak üzere hazırlanmıştır.

3.1 Modelleme Esasları

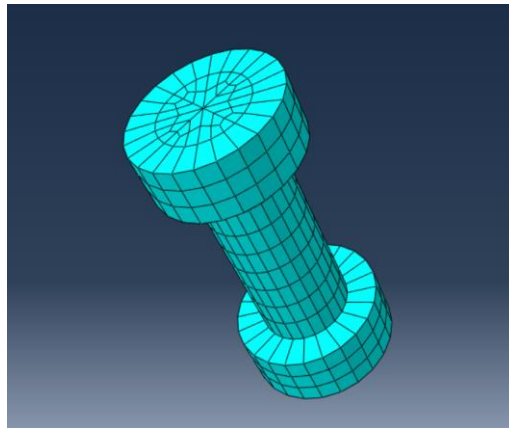
Sonlu eleman modellerinin, birleşimlerin deneylerden gözlenen davranışını iyi yansıtabilmesi için detaylı bir çalışma gerekmektedir. Analiz modelleri oluşturulurken, eleman modellerinin uygun bir şekilde seçilmesi, hazırlanan modelin davranışını deneylerden gözlenen davranışa yaklaştıracaktır. Eleman tiplerinin davranışa uygun seçilmesi, sonlu eleman ağlarının uygun şekilde seçilmesi, elemanlar arasındaki etkileşimlerin tanımlanma şekli sonlu eleman analizi sonuçlarını büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışma kapsamında, sonlu eleman modellerinde kiriş, kolon, alın levhası, bulonlar, takviye levhaları ve rijitlik levhaları ABAQUS kütüphanesinde bulunan uygun eleman tipleri ile ayrı ayrı temsil edilmiştir. Kirişin alın levhasına, takviye levhalarının kolon gövdesine, rijitlik levhalarının kolon başlığına ve gövdesine kaynakları analiz modeline dahil edilmemiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Üç boyutlu tipik sonlu eleman modeli.

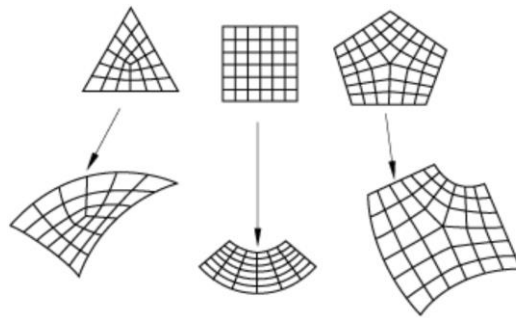
Alın levhası ile kirişin, kolon ile kolona kaynaklı olan takviye ve rijitlik levhalarının birlikte çalıştığı, yani kaynakların tasarım yüklerinden oluşacak iç kuvvetleri güvenle aktardığı kabul edilmiştir. Bulonların model içerisindeki temsiline, dış açılmış uzunluklar ve pullar dahil edilmemiştir. Altıgen somunlar ve bulon gövdesi, dairesel kesit ile bütünleşik olarak modellenmiştir (Şekil 3.2). Kolon başlığı ve alın levhasında bulunan bulon delikleri için, ÇYTHYE 2018’de verilen standart bulon delik çapları kullanılmıştır.



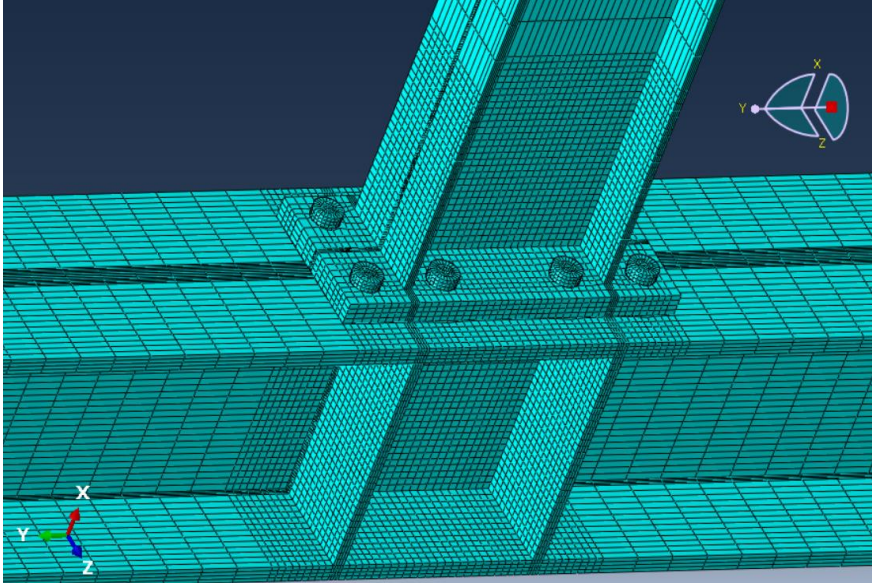
Şekil 3.2 : Bulon sonlu eleman modeli.

Sonlu eleman modellerinde, tüm elemanlar üç boyutlu (solid) eleman olarak temsil edilmiştir. Sonlu eleman tipi olarak C3D8R isimli eleman kullanılmıştır. ABAQUS yazılımında, bu ilk harf elemanların modellenme şeklini belirtir. “C” harfi “continuum element” anlamına gelmektedir. Bu harften sonra gelen “3D”, elemanların üç boyutlu modellendiğini, “8” rakamı sekiz düğüm noktasından oluşan bir eleman olduğunu, “R” harfi ise “reduced-integration element” ,azaltılmış integrasyon tekniği uygulanmış eleman olduğunu göstermektedir.

Sonlu eleman ağları oluşturulurken, farklı ağ sıklıkları uygulanmıştır. Birleşen elemanlar üzerinde şekildeğiştirmelerin ve gerilmelerin yoğunlaşması beklenen bölgelerde sonlu eleman ağı sıklığı artırılmıştır. Aynı zamanda, eğilme etkisindeki elemanlar, kalınlıkları boyunca en az 4 adet sonlu eleman içerecek şekilde düzenlenmiş ve elemanların şekil değiştirme yayılımındaki hata payları en aza indirgenmiştir (Şekil 3.4). Sonlu eleman modellerinde, dairesel yüzeylere sahip olan elemanlar için yapılandırılmış ağ oluşturma tekniği (structured mesh) kullanılmıştır. Yapılandırılmış ağ oluşturma tekniği, ABAQUS yazılımında önseçimli olarak tanımlanmış basit ağ topolojilerini kullanarak, otomatik olarak yapılandırılan ağlar oluşturur. Bu seçenek, kare veya küp gibi düzenli şekilli bir bölgenin ağ sistemi desenlerini, global geometriye uyumlu hale getirmeye çalışır. Yapılandırılmış ağ oluşturma tekniğinin ABAQUS yazılım dokümantasyonuna göre karmaşık geometriler için uygulanış biçimi Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Karmaşık geometriler için yapılandırılmış ağ sistemi desenleri.



Şekil 3.4 : Eğilme etkisindeki elemanların kalınlıkları boyunca teşkil edilen örnek sonlu eleman ağı.

Bulonlar ve bulon delikleri gibi dairesel kenarlara sahip olan daha karmaşık geometrili elemanlar için “sweep” ağ oluşturma tekniği kullanılmıştır.

Sonlu eleman analiz modellerinde, birleşen elemanların yüzeyleri arasındaki etkileşimin doğru bir biçimde yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında oluşturulan sonlu eleman modellerinde birbiri ile temas halinde olan yüzeyler arası etkileşim ABAQUS yazılımında “general interaction” tanımlaması ile sağlanmıştır. Bu tanımlama içerisinde normal davranış ve teğet doğrultusundaki davranış için gerekli parametreler girilmiştir. Normal davranışın temsil edilmesinde, “hard contact” tanımı kullanılmış yani elemanların birbirine girişim yapmaları engellenmiş ve birbiri ile temas halinde olan yüzeylerde basınç gerilme değerinin sıfır veya daha küçük olması durumunda birbirinden ayrılabilmelerine izin verilmiştir. Yüzeylerin teğet doğrultuda davranışı için “penalty” seçeneği uygulanmış ve sürtünme katsayısı olarak 0.44 değeri kullanılmıştır. Bulonlara ÇYTHYE 2018 Tablo 13.6’ya göre önçekme uygulanmıştır.

3.2 Malzeme Parametreleri

Sonlu eleman modellerinde birleşen elemanların malzeme modeli elastik ve plastik bölge için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Kalıcı şekil değiştirmelerin gözlenmeyeceği, malzeme davranışının doğrusal olduğu elastik bölge için kullanılan malzemelerin

elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) tanımlanmıştır. Dolayısıyla, malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiğinin akma gerilmesi değerine kadar hangi eğim değeri ile devam edeceği belirtilmiştir.

Plastik malzeme davranışını en iyi şekilde temsil edebilmek amacıyla doğru malzeme modelinin belirlenmesi aşamasında bir çok malzeme modeli denenmiş ve davranış üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. ABAQUS yazılımında pekleşme davranışını bir çok şekilde tanımlamak mümkündür. İlk aşamada izotropik pekleşme modeli denenmiş ve eğrilerin akma yüzeyi alanındaki büyümenin doğrulama modelindeki davranış karakteristiğini yansıtmadığı görülmüştür. İkinci aşamada, ABAQUS yazılımı içerisinde “kinematic hardening” modülü seçilerek davranış gözlenmiş, akma yüzeyi alanının yer değiştirdiği bu modelde dayanım azalması olmadığından bu modelin de gerçek malzeme davranışını doğru yansıtmadığı görülmüştür. Akma sonrası, kalıcı şekildeğiştirmelerin görüleceği plastik bölge için ilk akma gerilmesi ve çevrimsel yükler altında malzeme davranışını temsil etmek amacıyla ABAQUS yazılımı içerisinde “combined hardening” modülü seçilerek kinematik pekleşme parametreleri “parameters” yöntemi ile tanımlanmıştır. İlk akma gerilmesi değeri malzeme deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinden alınmıştır. Kinematik pekleşme, plastisite teorisinde gerilme uzayındaki akma yüzeyinin hareketi ile modellenir. Sonlu eleman modellerine, akma yüzeyinin yer değiştirmesi C ve γ parametreleri ile tanımlanmıştır. Burada C kinematik pekleşme modülü, γ ise artan plastik deformasyonla kinematik pekleşme modülünün azalma oranını belirleyen bir katsayıdır.

Sonlu eleman modelleri hazırlanan IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 kiriş-kolon birleşimlerinin elemanları için elastik malzeme karakteristikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Elastik malzeme parametreleri.

E (MPa)	ν
200000	0.3

Çizelge 3.2’de ise kiriş dışında kalan elemanlar için tanımlanan plastik malzeme karakteristikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Kiriş dışındaki birleşen elemanlar için plastik malzeme karakteristikleri.

F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_u
275	479	0.155

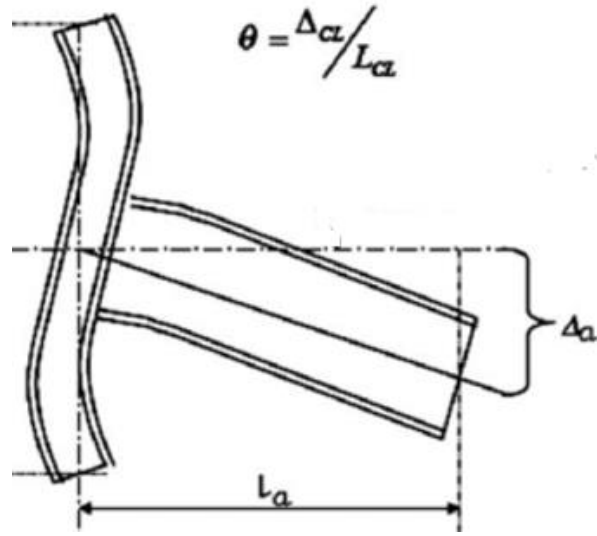
Kiriş için tanımlanan plastik malzeme karakteristikleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir. Kirişin plastik şekil değiştirmenin sıfır olduğu akma gerilmesi olan 275 MPa değeri, TBDY 2018 Bölüm 9’da yer alan, olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı olan R_y ile arttırılmıştır.

Çizelge 3.3 : Kiriş dışındaki elemanlar için plastik malzeme karakteristikleri.

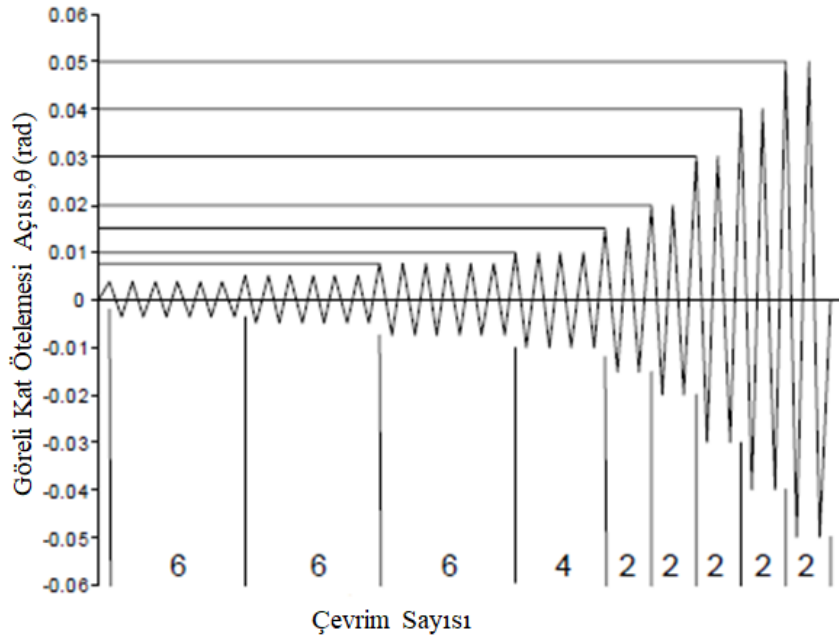
σ_0 (MPa)	C_1 (MPa)	γ_1
357.5	7993	175

3.3 Çevrimsel Yükleme Protokolü

Sonlu eleman modelleri hazırlanan IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 birleşimlerinin TBDY 2018 Bölüm 9 uyarınca 0.04 görelî kat ötelemesi açısı (θ) dönme değerini sağladığını ve birleşimin tekrarlı tersinir yükler etkisi altında kullanımının TBDY 2018 ve AISC 358-16’ya göre uygunluğunu değerlendirebilmek amacıyla, SAC çevrimsel yükleme protokolü analiz modellerine uygulanmıştır. SAC çevrimsel yükleme protokolü, belirli görelî kat ötelemesi açıları için verilmiş çevrim sayılarını içerir (Şekil 3.6). Bu yükleme protokolüne göre, görelî kat ötelemesi açısının tanımı, kiriş ucunun düşey deplasmanının, kolon merkezi ile kiriş ucu arasındaki mesafeye oranıdır. Bu tanımlama Şekil 3.5’de görsel olarak verilmiştir. Analiz modellerinde yükleme protokolü, kiriş ucuna etkitilen deplasmanlar ile tanımlanmıştır. Kiriş ucu deplasman değeri, yükleme protokolünün gerektirdiği dönme açısı ile kolon merkezinden kiriş ucuna olan mesafe çarpılarak hesaplanmıştır. Yükleme protokolü sonlu eleman modellerine uygulanırken kirişlerin düzlem dışı hareketleri engellenmiştir.



Şekil 3.5 : AISC 358-16'ya göre görelî kat ötelemesi açısı (θ) tanımı.



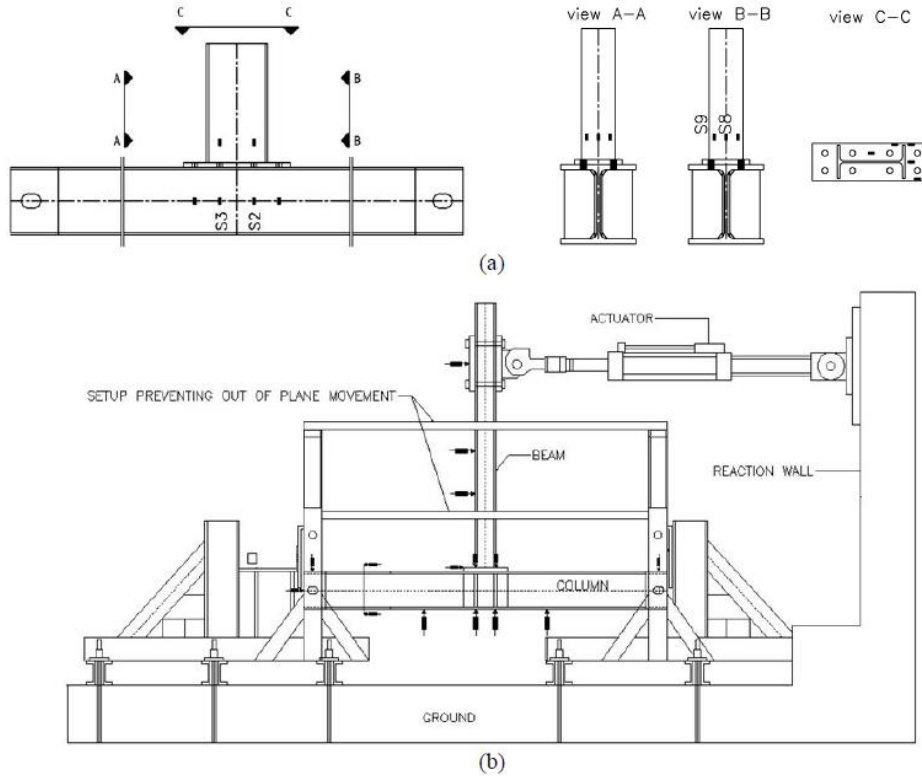
Şekil 3.6 : SAC çevrimsel yükleme protokolü.

3.4 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması

Bu çalışma kapsamında herhangi bir deneysel çalışma yapılmamış olup, Akgönen ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar sonlu eleman modellerinin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Akgönen ve diğ. (2015), dört bulonlu rijitlik levhasız alın levhalı moment aktaran birleşimlerin tekrarlı tersinir yükler altında dönme kapasitesi ve dayanım açısından incelemek

amacıyla dört adet numune üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu dört numuneden bir tanesine monotonik yükleme, geri kalan 3 adet numuneye SAC çevrimsel yükleme protokolü uygulamıştır. Test düzeneğinde, kolonun yüksekliği 3 m, kiriş ucunun kolon yüzünden uzaklığı yaklaşık 1.75 m'dir. Deney düzeneğinde numunelerin düzlem dışı hareketi sınırlandırılmıştır. Kiriş ucuna uygulanan deplasman çevrimleri, kapasitesi 250 kN olan bir hidrolik aktüatör ile gerçekleştirilmiştir. Kiriş ve kolonlara herhangi bir eksenel kuvvet uygulamamıştır.

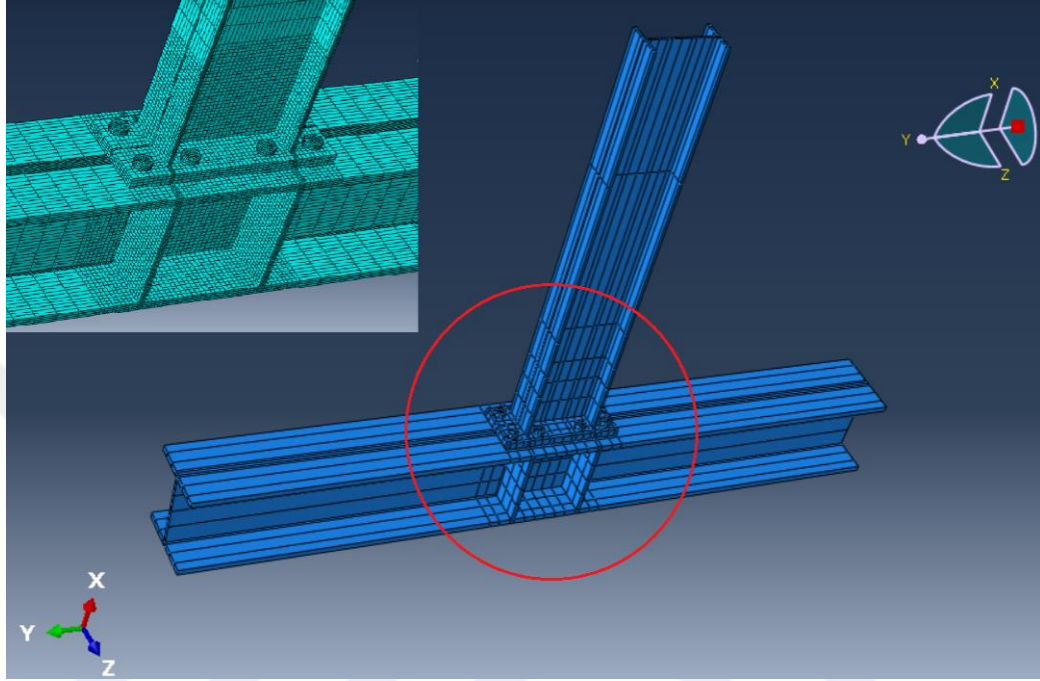
Akgönen ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada kullanılan test düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.7'te verilmiştir.



Şekil 3.7 : Test düzeneği (Akgönen ve diğ., 2015).

Sonlu eleman modellerinin doğrulanması amacıyla söz konusu deneysel çalışma kapsamında SAC çevrimsel yükleme protokolü uygulanan P3 numunesi seçilmiştir, (Şekil 3.8). Doğrulama modelinde bu numuneye söz konusu çevrimsel yükleme protokolünde maksimum dönme değerine karşılık gelen deplasman, monotonik olarak uygulanmıştır. Doğrulama modelinde ABAQUS içerisinde seçilen analiz yöntemi olan “implicit” çözüm yöntemi ile çevrimsel yüklemeler altındaki analizlerde yakınsama problemleri yaşanmıştır. Bu sorunlar analiz yönteminin

“explicit” olarak değiştirilmesi ile, çevrimsel yükleme altında yakınsama problemi olmayacağı düşünülmektedir. “Explicit” çözüm yöntemleri oldukça fazla zaman aldığından ve analizler için yüksek kapasiteli bilgisayarlar gerektiğinden bu çalışma kapsamında gerçekleştirilememiştir.



Şekil 3.8 : P3 numunesi sonlu eleman modeli.

Akgönen ve diğ. (2015)’de verilen P3 numunesinde, IPE270 kiriş, HEB320 kolona M24-10.9 bulonlar ile bağlanmıştır. IPE270 kiriş enkesiti, bu çalışma kapsamında sonlu eleman modelleri kurulan birleşimlerde teşkil edilen IPE300 ve IPE330 kirişleri gibi, AISC 358-16 Tablo 6.1’e göre kiriş enkesit yüksekliği ve başlık genişliği kriterlerini sağlamamaktadır.

P3 numunesi için birleşim detayı değişkenleri Çizelge 3.4’te, birleşen elemanların malzeme karakteristikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : P3 numunesi için birleşim detayı değişkenleri (Akgönen ve diğ.,2015).

Değişken	Değer
Alın levhası kalınlığı, t_p	35
Alın levhası genişliği, b_p	190
Bulonlar arasındaki yatay uzaklık, g	120
p_f (p_{fi})	50
p_f (p_{fo})	50
Kiriş enkesit yüksekliği, d_b	270

P3 numunesinde, alın levhası kalınlığı 35 mm'dir. Kolon başlıkları arasına, kolon gövdesinde gövdenin her iki tarafına 20 mm kalınlığında rijitlik levhaları teşkil edilmiştir. Ayrıca, kolon gövdesi, 8 mm kalınlığında takviye levhaları ile güçlendirilmiştir. (Akgönen, 2015)

Çizelge 3.5 : P3 numunesi için birleşen elemanların malzeme karakteristikleri (Akgönen, 2015).

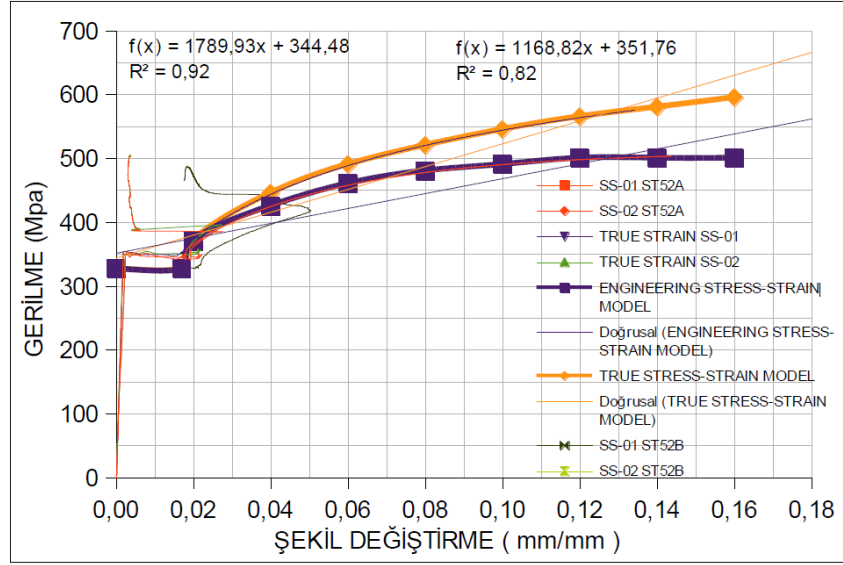
Kuponlar	Elastisite modülü, $E (N/mm^2)$	Akma mukavemeti $f_y (N/mm^2)$	Akma durumunda uzama $\epsilon_y (Average)$	Nihai mukavemet $f_u (N/mm^2)$
IPE270	199.881	337.25	0.001687	454.86
HEB180	203.507	306.13	0.001504	450.02
PL8	209.470	317.00	0.001513	456.05
PL20	210.230	313.26	0.001490	449.88
PL35	212.477	401.00	0.001887	533.14
HEB320	206.669	293.00	0.001418	456.36

P3 numunesi için hazırlanan sonlu eleman analiz modelinde birleşim bölgesindeki IPE270 kirişinin plastik davranışını temsil edebilmek için kinematik pekleşme modeli ve buna ait pekleşme parametreleri tanımlanmıştır. Söz konusu kinematik pekleşme parametreleri, malzeme plastik bölge davranışını iyi şekilde temsil edebilecek şekilde belirlenmiştir. IPE270 kirişinin sonlu eleman modelinde tanımlanan plastik malzeme parametreleri Çizelge 3.6'te yer almaktadır. Akgönen (2015)'in doktora tez çalışmasında verilen P3 numunesine ait kupon testi sonuçları ise Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Kupon testi sonucundan kirişin olası akma gerilmesinin, sonlu eleman modeli için tanımlanan değer ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Elastik kalması beklenen, diğer bir deyişle, pekleşmenin beklenmediği elemanlarda çekme deneyi sonucu elde edilen malzeme karakteristikleri kullanılarak iki doğrudan oluşan gerilme-şekildeğiştirme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde, elastik kalması öngörülen elemanlar için gerçek akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve kopma uzaması sonlu eleman modeline tanımlanmıştır.

Çizelge 3.6 : P3 numunesi IPE270 kiriş için plastik malzeme parametreleri.

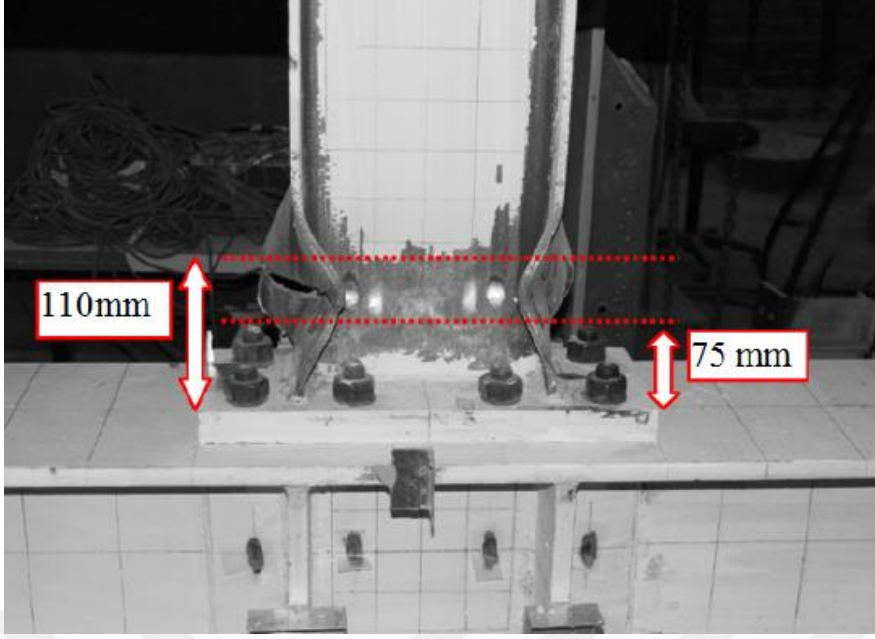
$\sigma_0 (MPa)$	$C_1 (MPa)$	γ_1
357.5	7993	175



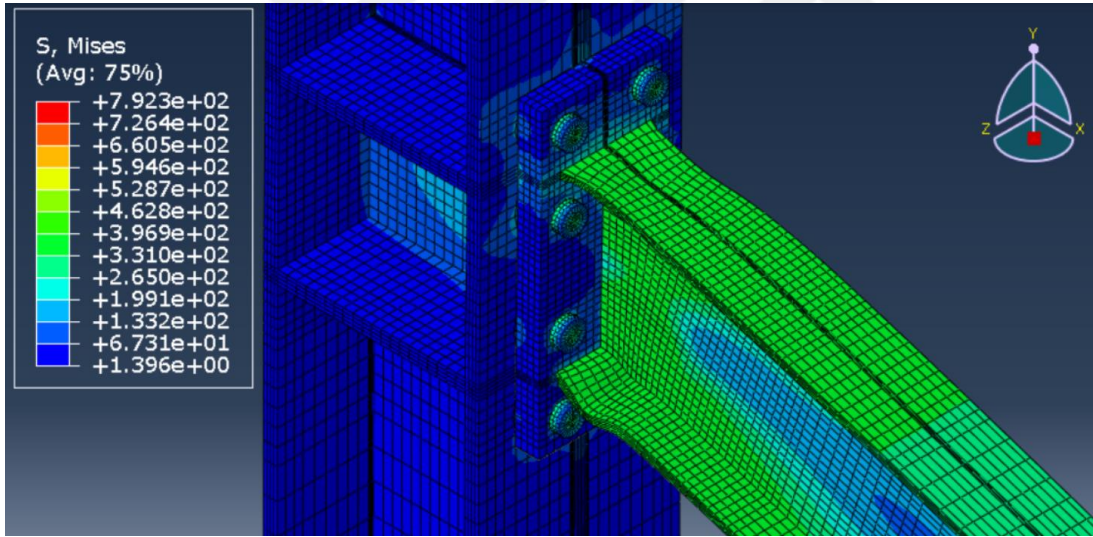
Şekil 3.9 : P3 numunesinin kupon testi sonuçları (Akgönen ve diğ., 2015).

Deneyisel çalışma sonucu P3 numunesinin, 0.01 radyan görelî kat ötelemesi açısı değerine kadar elastik davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Görelî kat ötelemesi açısının 0.04 radyan değerine ulaşması ve θ dönme açısı için çevrimlerin tamamlanması halinde ise P3 numunesinin moment kapasitesinin 224.89 kNm ve -245.58 kNm olduğu gözlemlenmiştir. Numune, 0.05 radyan döngüsünde kiriş başlığının yerel burkulması sonucu dayanım kaybına uğramıştır. Deney, kiriş başlığının tamamen kopması nedeniyle, 0.07 radyan döngünün %75'inde sonlandırılmıştır. Deney sonucunda, plastik mafsall bölgesinin yerinin, kolon yüzünden 75-110 mm arası uzaklıkta olduğu gözlemlenmiştir. (Akgönen ve diğ., 2015).

P3 numunesinin deney sonrası göçme modunun, kiriş başlığının yerel burkulması ve yırtılması şeklinde olduğu Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Sonlu eleman modellerinde, söz konusu göçme modunun sebep olduğu şekildeğiştirmenin, birleşimin moment kapasitesini doğru bir şekilde temsil etmesi hedeflenmiştir. P3 numunesi için oluşturulan doğrulama modellerinin sonlu eleman analizlerinin çıktıları değerlendirildiğinde çevrimsel yükleme sonucu deneyisel çalışmada görülen göçme şekildeğiştirmesinin, sonlu eleman analizleri sonuçlarıyla aynı mertebede elde edildiği görülmüştür. Sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen şekildeğiştirmiş sistem ve yükleme sonrası birleşimde oluşan gerilme dağılımı Şekil 3.11'de yer almaktadır. Sonlu elemanlar analizleri sonucunda, birleşimin başlangıç rijitliği, moment kapasitesi ve göçme durumları da incelenebilmiştir.

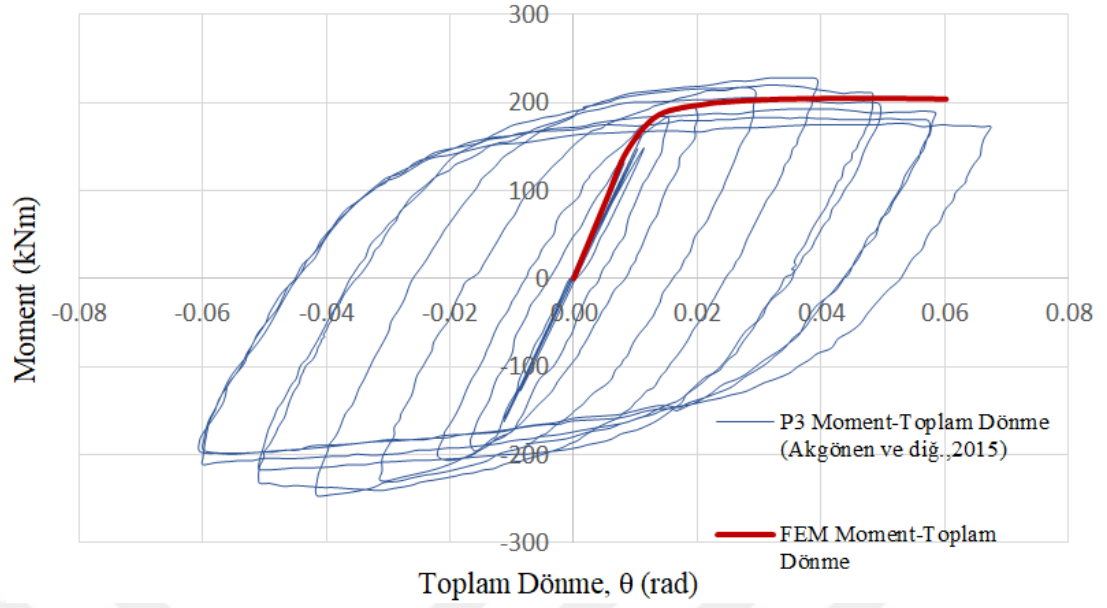


Şekil 3.10 : P3 numunesinin deney sonucu göçme modu (Akgönen ve diğ., 2015).



Şekil 3.11 : P3 numunesinin monotonik yükleme sonucu göçme modu (FEM).

Monotonik yükleme için sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen moment-dönme eğrisi, Akgönen ve diğ. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmadan şekilden de görülebileceği gibi elde edilen moment-dönme eğrileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 3.12). P3 numunesinin moment-dönme eğrileri, elastik bölge için tanımlanmış malzeme parametreleri ile oldukça gerçekçi bir şekilde temsil edilmiştir. Elastik olmayan bölgede, birleşimin deneysel çalışmada 0.04 radyan dönme açısına karşılık gelen moment kapasitesi değeri monotonik yükleme sonucu elde edilen kapasite ile karşılaştırılmış ve deneysel çalışma ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.12 : P3 numunesi (Akgönen ve diğ., 2015) için deneysel ve FEM sonucu elde edilen moment-dönme eğrilerinin karşılaştırılması.

Sonlu eleman modellerinin, modelleme esasları ve malzeme modelinin doğrulanması amacıyla yapılan bu çalışmada, Akgönen ve diğ. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçları ile analitik model sonuçlarının aynı mertebede olduğu ve deneyle uyumlu sonuç verdiği görülmüştür. Böylelikle, benzer birleşim bölgeleri için sonlu eleman modelleri ile, çevrimsel yükler altındaki davranışların da sayısal incelenmesi mümkün olacaktır.

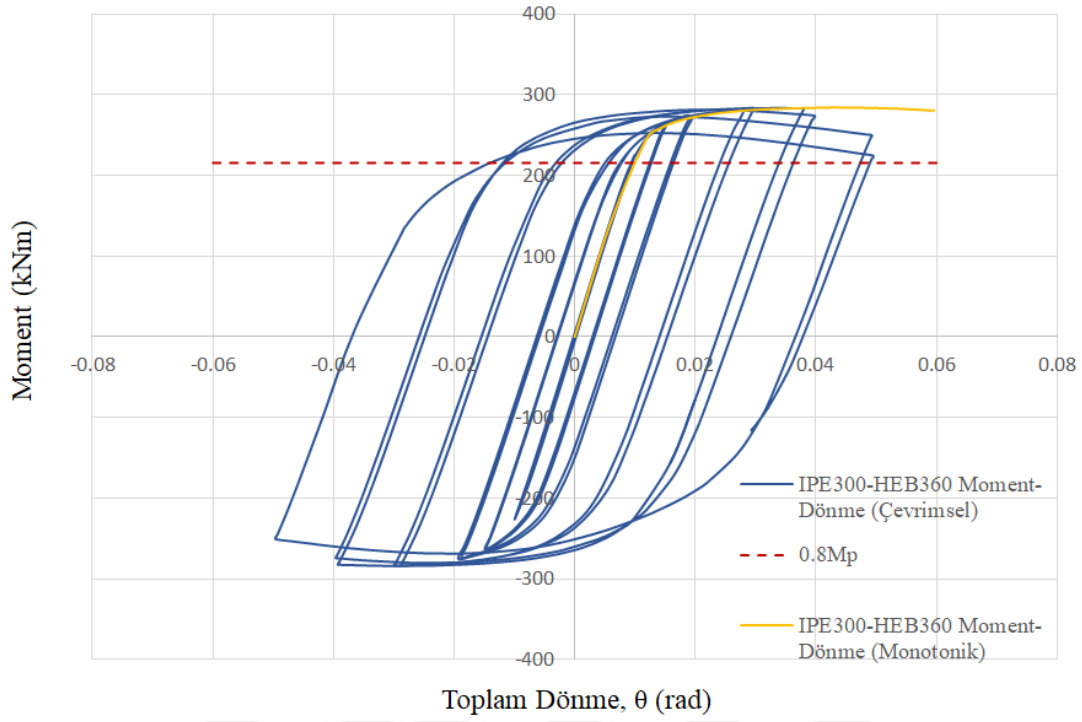


4. SONLU ELEMAN MODELLERİNİN ANALİZİ VE ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

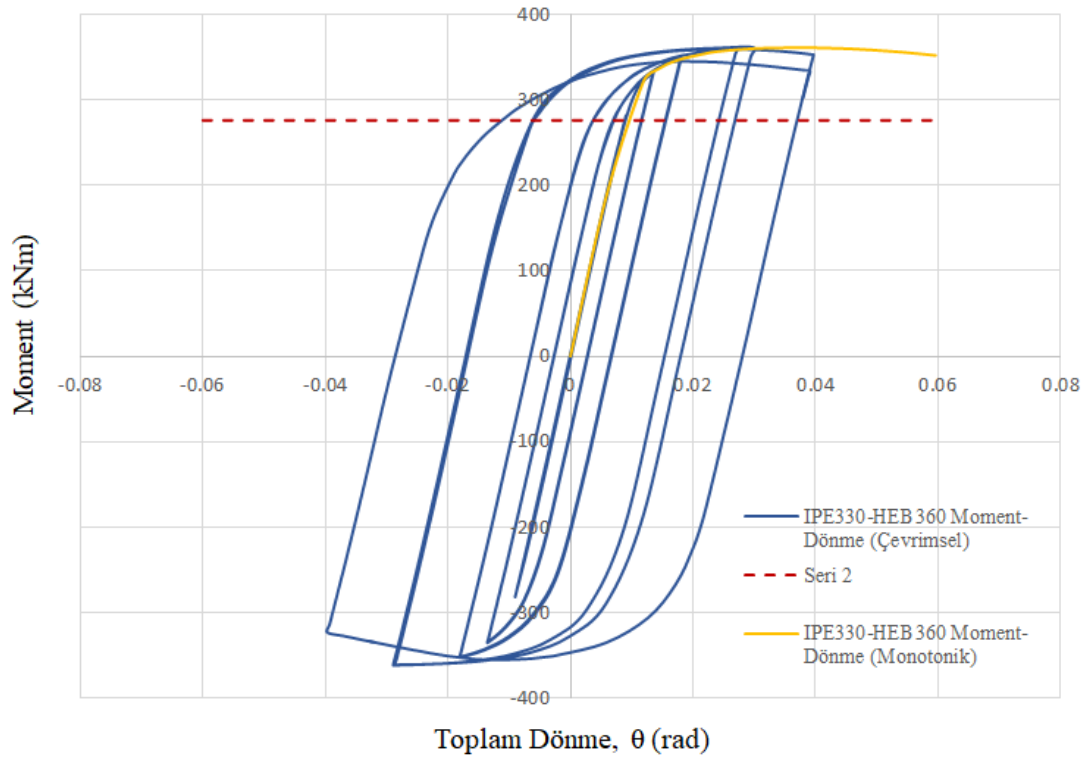
Bu bölümde, IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 tam dayanımlı alın levhali bulonlu birleşimlerin, ileri seviye sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları verilmiştir. TBDY 2018 ve ÇYTHYE 2018 tasarım ve boyutlandırma esaslarına uygun olarak detayları oluşturulan birleşimlerin SAC çevrimsel yükleme protokolü altında ve monotonik yükleme altında doğrusal olmayan davranışı incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi yapılan her iki birleşim tipi için analiz sonuçları, dönme kapasitesi ve dayanım bakımından değerlendirilmiştir.

Yapılan sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen moment-dönme eğrileri IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 için Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Plastik davranışı kinematik pekleşme modeli ile tanımlanan birleşimlerin çevrimsel ve monotonik yükleme altında moment-dönme eğrilerinin Akgönen ve diğ. (2015) tarafından test edilen IPE270-HEB320 birleşimi ile benzer nitelikte olduğu görülmüştür. Her iki birleşimin tekrarlı tersinir yüklemeler altında 0.01 radyan göreceli kat ötelemesi açısı değerine kadar elastik davranış gösterdiği görülmüştür. Birleşimler, 0.04 radyan dönme açısı çevrimlerinde maksimum moment kapasitesine ulaşmaktadır.

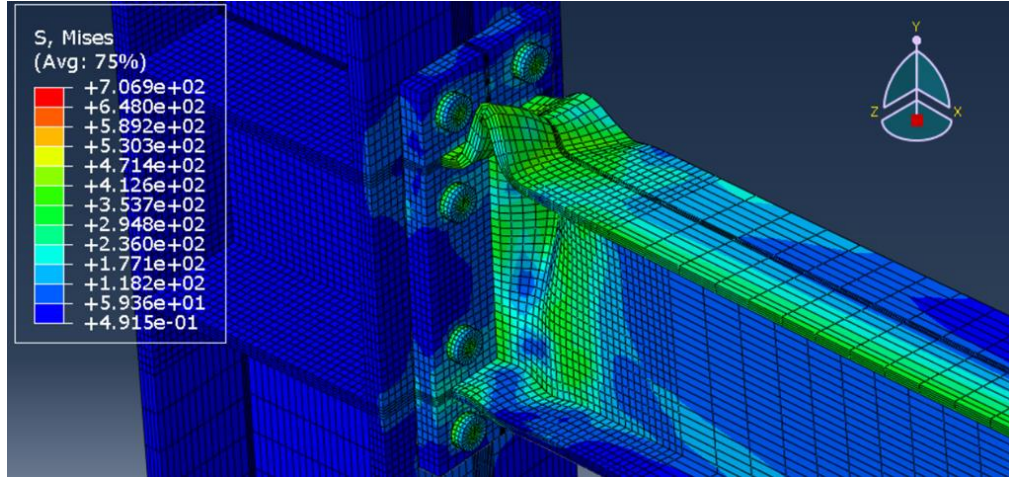
Çevrimsel yükleme altında sonlu eleman analizleri sonucu elde edilen şekildeğiştirmiş sistemlere ait görseller ve gerilme dağılımları Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.6’te yer almaktadır. Monotonik yüklemeler sonucu göçme modları Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, birleşim bölgesindeki plastikleşme kiriş başlıklarında gerçekleşmiş ve söz konusu iki birleşim için de göçme modu, kiriş başlıklarında meydana gelen yerel burkulma olmuştur. Birleşim detaylarının davranışının güçlü kolon-güçlü birleşim-zayıf kiriş felsefesi ile uyumlu olduğu, kirişin eğilme momenti kapasitesine ulaştığındaki dönme açısına tekabül eden çevrimde, diğer tüm birleşen elemanların elastik bölgede kaldığı görülmüştür.



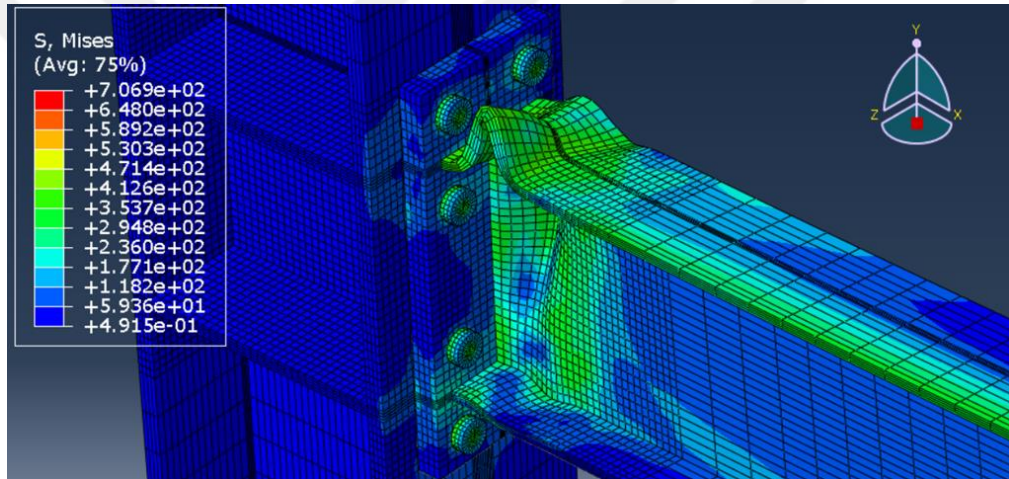
Şekil 4.1 : IPE300-HEB360 birleşimi moment-dönme eğrisi.



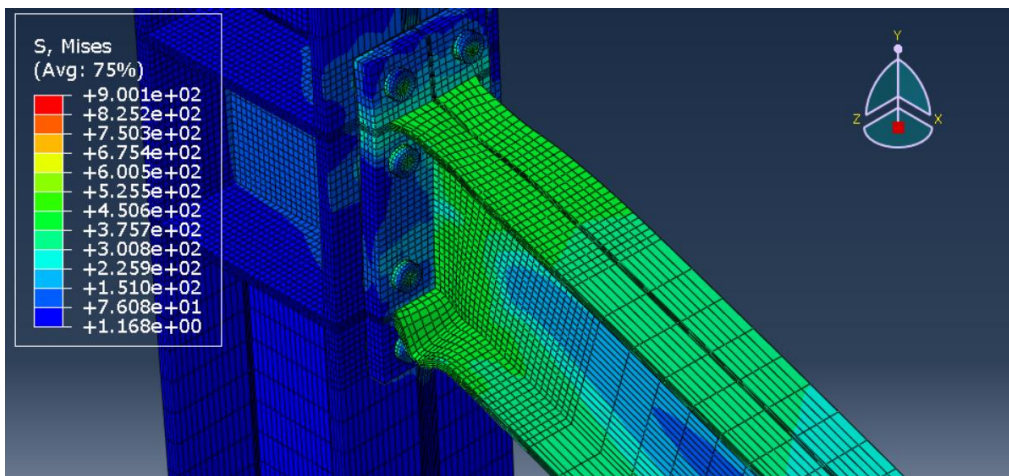
Şekil 4.2 : IPE330-HEB360 birleşimi moment-dönme eğrisi.



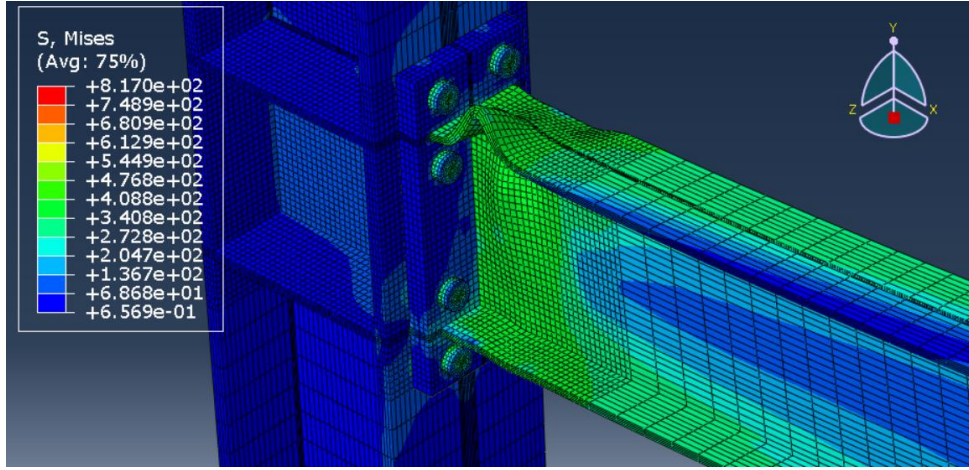
Şekil 4.3 : IPE300-HEB360 birleşimi göçme modu (çevrimsel yükleme).



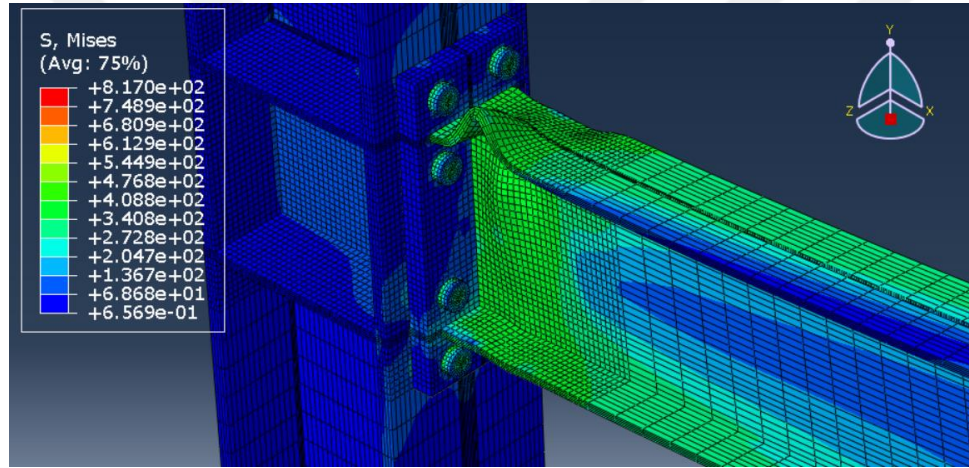
Şekil 4.4 : IPE300-HEB360 birleşimi plastik şekil değiştirmeler (çevrimsel yükleme).



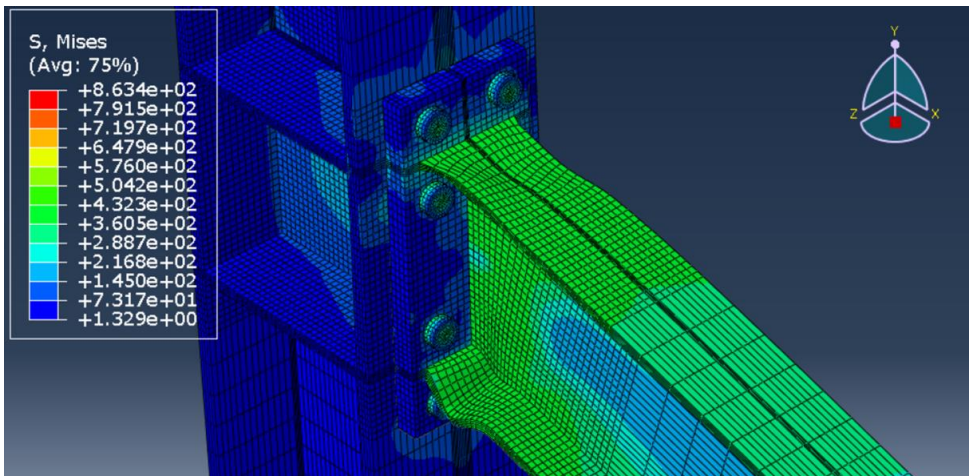
Şekil 4.5 : IPE300-HEB360 birleşimi göçme modu (monotonik yükleme).



Şekil 4.6 : IPE330-HEB360 birleşimi göçme modu (çevrimsel yükleme).



Şekil 4.7 : IPE330-HEB360 birleşimi plastik şekildeğıştirmeler (çevrimsel yükleme).



Şekil 4.8 : IPE330-HEB360 birleşimi göçme modu (monotonik yükleme).

Sonlu eleman modelleri oluşturulan iki ayrı kiriş-kolon birleşimi için, göçme modu olan yerel burkulma gibi ani dayanım azalmalarına sebep olan malzeme karakteristiklerinin sonlu eleman modellerine tanımlanmasının oldukça güç olması sebebiyle, moment-dönme eğrilerinde ani dayanım kaybı gözlenememiştir. Akgönen ve diğ. (2015) tarafından aynı yükleme protokolü altında gerçekleştirilen testlerin sonucunda, yerel burkulma sebebiyle oluşan dayanım kaybı, söz konusu çalışma kapsamında ANSYS yazılımı ile yapılmış olan sonlu eleman modellerinde de temsil edilememiştir. Fakat, test numunesinin eğilme momenti dayanımının, AISC 341-16 uyarınca şart koşulan 0.04 radyan dönme açısına tekabül eden moment değerinin %80'inden küçük olmadığı test sonuçlarında gösterilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında analizleri yapılan IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 birleşimlerinin elde edilen göçme modlarının ve moment-dönme eğrilerinin, test sonucu bulunan IPE270-HEB320 birleşiminin davranışı ile aynı karakterde olduğu görülmüş ve söz konusu iki birleşim için de, 0.04 radyan dönme açısına tekabül eden eğilme momenti değerinin, bu birleşimlerde teşkil edilen kirişlerin plastik eğilme momenti dayanımının %80'inden büyük olduğu görülmüştür. Her iki birleşimde, kiriş uçlarında oluşan plastik mafsallar sonucu göçmüştür, tasarım esasları ile uyumlu olacak şekilde, kiriş haricindeki diğer birleşim elemanları elastik bölgede kalmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, AISC 358-16 uyarınca sismik yükler altında kullanımı onaylanmış tam dayanımlı alın levhali birleşimler için verilen kiriş enkesit yüksekliği ve başlık genişliği sınır şartlarını sağlamayan, fakat TBDY 2018'e göre söz konusu sınır koşullarını sağlayan birleşimlerin tekrarlı tersinir yüklemeler altında dönme kapasitesi ve dayanım açısından davranışları sonlu eleman modelleri ile sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında söz konusu birleşimlerin incelenmesinde, ABAQUS yazılımı kullanılmış, deneysel bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışma kapsamındaki analiz modellerinin doğrulanması, Akgönen ve diğ. (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile gerçekleştirilmiş, çalışmadaki teknik kısıtlar nedeniyle test edilememiş kiriş boyutları için sonlu elemanlar yöntemi ile davranış değerlendirmesi yapılmıştır.

Sonlu eleman modellerinin doğrulanması amacıyla kullanılan P3 deney numunesinin analiz modelinin çevrimsel yükleme durumu için ABAQUS yazılımı ile çözümü zaman ve yakınsaklık problemleri nedenleri ile gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle bu çalışma kapsamındaki modellemenin ve malzeme tanımlarının doğrulanması, P3 test numunesinin monotonik yükleme sonucu davranışı değerlendirilerek gerçekleştirilmiştir.

Sonlu eleman analizlerinde gerçek davranışın simülasyonun yapılması için modelleme esaslarının yanı sıra, doğru malzeme parametrelerinin deneme-yanılma yöntemi ile tespiti ve birleşimlerin davranışının temsilinin uygun şekilde yapılması için detaylı bir çalışmanın gerektiği görülmüştür. Aynı şekilde, ani dayanım kayıpları ile, moment-dönme eğrilerindeki ani değişimlerin gözlemlendiği davranış biçimlerinin sonlu eleman modellerine tam olarak yansıtılmasının oldukça zor olduğu görülmüştür.

Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda, tasarım esasları ile uyumlu şekilde, plastikleşmenin yalnızca kiriş plastik mafsallık bölgesinde gerçekleştiğı ve diğer birleşim elemanlarının elastik bölgede kaldığı görülmüştür. Davranışı incelenen IPE300-HEB360 ve IPE330-HEB360 dört bulonlu alın levhalı birleşimlerinin TBDY 2018 ve ÇYTHYE 2018’de yer alan tasarım kriterlerine uygun olarak detaylandırılması durumunda TBDY 2018 Bölüm 9’da moment aktaran çelik çerçevelerde teşkil edilen kiriş-kolon birleşimleri için şart koşulan dönme kapasitesini sağladığı, aynı şekilde AISC 341-16’da yer alan dönme kapasitesi ve bu yönetmelikte ek olarak yer alan, birleşimin dayanım kaybının, 0.04 radyan dönme açısına karşılık gelen eğilme momenti dayanımının %80’inden az olmaması koşulunu sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu durumda, TBDY 2018 Tablo 9B.1’de verilen kiriş enkesit yüksekliği sınırlarının uygulanabilir olduğu, alın levhası genişliği sınırlarının da genişletilerek güncellenebileceğı söylenebilir.

5.2 Öneriler

Bu tezde sunulan çalışmanın kapsamının genişletilmesi amacıyla, aşağıda belirtilen alanlarda çalışma ve araştırmaların yapılması önerilmektedir:

- Sonlu eleman modelleri ile çevrimsel yükler altında doğrusal olmayan davranışı sayısal olarak incelenen birleşimlerin deneysel çalışma ile sonuçlarının desteklenmesi,
- Bu çalışma kapsamında çalışılan sonlu eleman analiz modelleri için, seçilen malzeme modelinin ve sonlu eleman tipinin değiştirilmesinin ve/veya modele kaynakların dahil edilmesinin birleşimlerin çevrimsel yükler altında davranışına olan etkisinin araştırılması,
- Geniş başlıklı Avrupa profilleri için de benzer bir çalışmanın hem deneysel hem de sayısal olarak yapılarak, TBDY 2018 Ek 9B’de yer alan uygulama sınırlarının genişletilip genişletilemeyeceğı üzerine araştırmaların yapılması.

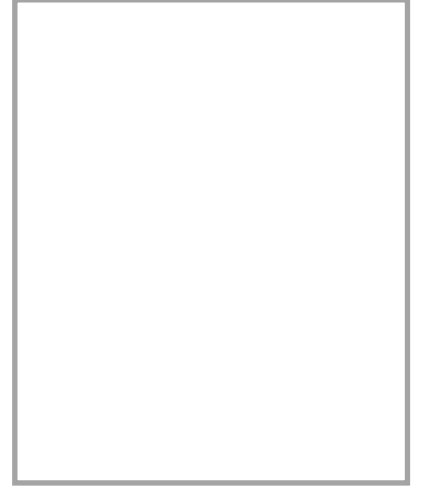
KAYNAKLAR

- ABAQUS** (2019). Finite Element Analysis and Computer-Aided Engineering, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Adey, B.T., Grondin, G.Y, Cheng, J.J.R.** (2000). Cyclic loading of end plate moment connections, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4), 683–701.
- Akgönen, A.İ.** (2015). *Moment aktaran alın levhalı birleşimlerin çevrimsel yükler altında davranışı*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Akgönen, A.İ., Yorgun, C., Vatansever, C.** (2015). Cyclic behavior of extended end-plate connections with European steel shapes, *Steel and Composite Structures*, 19(5), 1185–1201.
- ANSI/AISC 341-16** (2016). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ANSI/AISC 358-16** (2016). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ÇYTHYE** (2018). Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara.
- ElSabbagh, A., Sharaf, T., Nagy, S., ElGhandour, M.** (2019). Behavior of extended end-plate bolted connections subjected to monotonic and cyclic loads, *Engineering Structures*, 190, 142–159.
- Haghollahi, A. & Jannesar, R.** (2018). Cyclic behavior of bolted extended end-plate moment connections with different sizes of end plate and bolt stiffened by a rib plate, *Civil Engineering Journal*, V.4, No.1, January.
- Radmehr, M. & Homami, P.** (2020). The seismic reliability analysis of moment resisting frames with bolted end-plate connection, *Journal of Constuctional Steel Research*, 171, 106–134.
- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y.** (2007). Behavior of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading, *Engineering Structures*, 27, 703–716.
- Sumner, E.A.** (2003). *Unified design of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading*. (Doktora tezi). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia..

- Sumner, E.A., Murray, T.M., Cheng, J.J.R.** (2002). Behavior of extended end-plate moment connections subject to cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 683–701.
- TBDY** (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Kurallar, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Selin YARDIMCI



ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2018, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM

- 2019 – 2022 yılları arasında Tekfen Mühendislik A.Ş.’de Yapısal Tasarım Mühendisi olarak çalıştı.
- 2022 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.