

Araştırma Makalesi / Research Article

Alın Levhalı Moment Birleşimlerin Sonlu Elemanlar ile Analizi

Alırıza İlker Akgönen^{1*}, Barış Güneş²¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş.² İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul

*e-posta: ilkerakgonen@ksu.edu.tr

Geliş Tarihi: 06.02.2017 ; Kabul Tarihi: 03.08.2017

Özet

Sonlu elemanlar analiz çalışması, deneysel çalışmaya göre birçok avantaj içermektedir. Sonlu elemanlar metodu, deneysel çalışmanın maddi külfeti ve cihaz kalibrasyon problemleri olmaksızın yapılan etkili ve ekonomik bir yöntemdir. Birleşimin genel davranışı, moment-dönme ilişkisi, tüm mesnette oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımı, bulonlarda ön-germe etkisi, alın levhası davranışı, panel bölgesi ve bulonların davranışı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme kuvvetleri gibi deneysel çalışmada tespit edilmesi zor bir çok hususun incelenmesine olanak sağlar. Bu çalışmada ön-germe uygulanmış alın levhalı kolon-kiriş birleşimleri için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Modelleme çalışması her adım için detaylı olarak anlatılmıştır. Sayısal modelin oluşturulmasında ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Model çalışması; elemanlar arasında sürtünme, kayma, bulon ön-germe, malzemede ve geometri de lineer olmayan davranış durumunu kapsamaktadır. Model çalışması ile elde edilen moment-dönme grafiği, literatürde bulunan deneysel çalışmalardan elde edilen moment-dönme grafikleri ile kıyaslanarak sonlu elemanlar çalışması doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler

Alın levhalı birleşim;
Sonlu eleman modeli;
Moment-dönme eğrisi;
Doğrusal olmayan
analiz

Finite Element Analysis of End-Plate Moment Connections

Abstract

There are important advantages of studying finite element analysis compared to experimental test. Finite element method is very effective and economic tool without any calibration problem of experiment devices. Overall behavior of joint, moment-rotation relation, stress-strain distribution, pre-tension effect on bolts, end-plate behavior, panel zone and bolt behavior, friction-sliding between column flange and end-plate can be determined easily, which are difficult to measure at experimental study. In this study, 3D finite element model for steel pre-tensioned bolted end-plate connection was developed. All explanations about the numerical model were given in detail. ANSYS software was used for modeling study. Material and geometric non-linearity, sliding and friction effects between end-plate and column face, pre-tensioning effect of bolts were included into finite element model. Obtained moment-rotation curve was compared and verified by experimental result found in literature.

Keywords

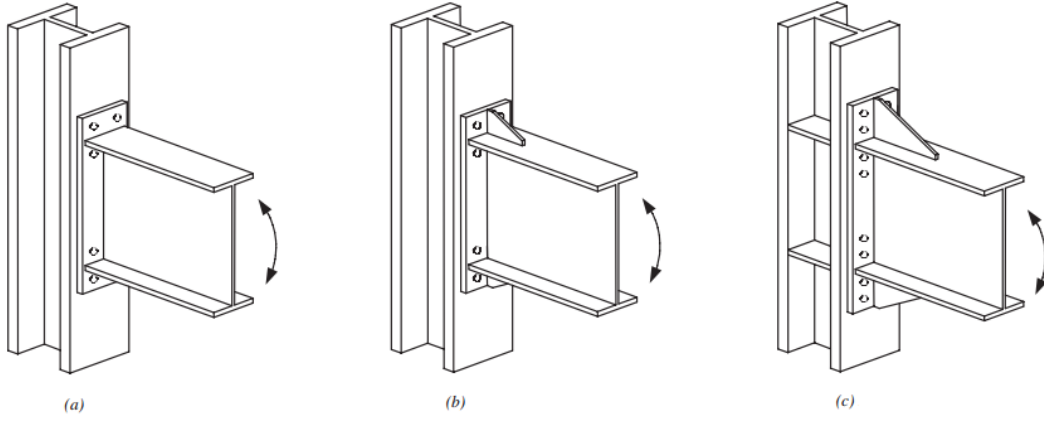
End-plate connection;
Finite element model;
Moment-rotation
curve;
Nonlinear analysis

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Alın levhalı moment bileşimi, ucuna alın levhası kaynaklanmış kirişin diğer yapı elemanına yüksek mukavemetli bulonlar ile birleşiminden oluşur. Alın levhalı birleşim bir kolon-kiriş bağlantısı veya kiriş-kiriş ek bağlantısı olabilir. Alın levhalı birleşimler düz ve uzatılmış alın levhalı birleşim olmak üzere

ikiye ayrılırlar. Düz alın levhalı birleşimlerde alın levhası boyu kiriş yüksekliği kadardır. Uzatılmış alın levhalı birleşim ise, alın levhası uzunluğunun kiriş yüksekliğini geçerek uzatılmasını ifade eder. Bu birleşimlerde gerektiği durumlarda alın levhası ile kiriş başlığı arasında rijitlik levhası (şekil1b,1c) ve kiriş başlıkları hizasında kolon başlıkları arasında süreklilik levhası (şekil1.c.) kullanılabilir.



Şekil 1a,1b,1c. Uzatılmış alın levhalı moment birleşimleri (AISC 358-10).

Şekil 1.a'da 4 bulonlu rijitlik levhasız uzatılmış alın levhalı birleşim, şekil 1.b'de 4 bulonlu rijitlik levhalı uzatılmış alın levhalı birleşim, şekil 1.c'de ise 8 bulonlu rijitlik levhalı ve süreklilik levhalı uzatılmış alın levhalı birleşim görülmektedir. Alın levhalı moment birleşimleri kullanımı birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Sahada kurulum sırasında kaynak işçiliğini ortadan kaldırmakta ve her türlü iklim koşulunda saha montajını kolaylaştırmaktadır. Alın levhalı birleşimlerin kullanıldığı taşıyıcı sistemlerin kurulumu kaynaklı birleşimden oluşturulmuş taşıyıcı sistemlere göre daha hızlı ve ekonomiktir. 1994 North-ridge depremi sonrasında kaynaklı kolon-kiriş birleşimlerinde gözlemlenen beklenmedik hasarlar bulonlu alın levhalı birleşimlere olan ilgiyi arttırmıştır. Kaynaklı birleşimlere göre daha az rijitliğe sahip olması sebebiyle deprem yükleri altında daha sünek davranış sergilerler. Çelik taşıyıcı sistemlerin analizinde kolon-kiriş mesnet davranışı rijit veya serbest olarak idealize edilir. Ancak gerçek mesnet davranışı bu iki sınır durum arasındadır. Son yıllarda alın levhalı birleşimlerin davranışını incelemek üzere deneysel ve analitik birçok araştırma yapılmıştır. Başlıca çalışma yöntemleri kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Birleşen metodu:** Eurocode-3 (EN-1993 Bölüm 1.8)' de bulunan ve analitik bir yöntem olan birleşen metoduyla (Component Method) birleşimlerin moment-dönme davranışı belli ölçüde tespit edilebilmektedir. Ancak bu yöntemde cıvatalara ön-germe kuvveti

uygulanması ve alın levhasında rijitlik levhası kullanımı durumu dikkate alınamamaktadır.

- Deneysel çalışma:** en güvenilir yöntem olmakla birlikte birçok zorluğu beraberinde getirmektedir. Deneysel çalışma oldukça zaman alıcı ve maliyetli bir yöntemdir. Laboratuvar imkanları ve maddi imkansızlıklar, deney malzemelerinin doğru kalibrasyonu vb.. gibi bir çok husus deneysel çalışma gerçekleştirmeyi zorlaştırmaktadır.
- Sonlu eleman yöntemi:** Kolon-kiriş mesnet bölgesinin sonlu eleman modeli oluşturulması deneysel çalışma sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Sonlu elemanlar ile simülasyon çalışması gerçekleştirmek, deneysel çalışmaya göre bir çok avantaj içermektedir. Simülasyon çalışmaları, deneysel çalışmanın maddi külfeti ve cihaz kalibrasyon problemleri olmaksızın yapılan etkili ve ekonomik çözümlerdir. Birleşimlerin moment-dönme karakteristiği, gerilme ve şekil değiştirmeler kolaylıkla tespit edilebilir. Alın levhası davranışı, panel bölgesi ve bulonların davranışı, bulonlara ön-germe verilmesi etkisi incelenebilmektedir. Ayrıca simülasyon çalışması; basınç dağılımı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme kuvvetleri gibi deneysel çalışmada tespit edilmesi zor bir çok hususun incelenmesine olanak sağlar. Elde

edilen sonuçlar kullanılarak oluşturulan model çalışması ile parametrik çalışmalar yapılabilmektedir.

Alın levhali birleşimlerin sonlu elemanlar metoduyla incelenmesi ile ilgili literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. Aşağıda yapılan başlıca çalışmalar ile ilgili bilgi verilmektedir.

Krishnamurty ve Graddy (1976)' nin çalışmaları bu alanda yapılan ilk çalışmalardandır. İlk defa 3D elastik sonlu elemanlar birleşim modeli oluşturularak incelemeler yapılmıştır. Önceki yıllarda bilgisayar işlemcilerinin günümüzdeki kadar gelişmemiş olması sebebiyle 3D modeller oluşturmak ve analiz etmek oldukça zahmetliydi. Bu yüzden ilk çalışmalar 2D modeller ile 3D modeller arasında korelasyon kurmaya dayanmaktadır. Günümüzde 3D modeller oluşturmak daha kolay hale gelmiştir. Kukreti A.R. ve diğ. (1987) Düz alın levhali birleşim için sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla moment-dönme ilişkisinin tespit edilmesi için analitik bir metot geliştirmiştir. Sonlu elemanlar çalışması ile parametrik çalışma yapılarak bu parametrelerin alın levhasının ayrılma durumuna etkisi incelenmiş ve çalışmalar sonucu elde edilen bilgiler kullanılarak birleşimin davranışını karakterize eden bir denklem geliştirilmiştir.

Sonraki yıllarda malzemelerin doğrusal olmayan davranışı, sonlu elemanlar modellemeleri ile incelenmiştir. Bahaari M.R. ve Sherbourne A.N. (1994) ANSYS yazılımı kullanılarak uzatılmış alın levhali birleşimin 2D sonlu eleman modeli oluşturmuş ve analitik çalışma yardımıyla alın levhali birleşimin moment-dönme ilişkisi tespit etmeye çalışmıştır. Sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak irdelenmiştir. Bahaari M.R. ve Sherbourne A.N. (1996) Kolon başlığı takviyesinin kullanım zorluğundan dolayı kolon başlıklarının takviye edilmemesi durumunda alın levhali moment birleşimlerinin performansını incelemiştir. ANSYS yazılımı kullanılarak 3D modelleme yapılmıştır. Modellemede elastik olmayan malzeme modeli kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmalarla alın levhası ile kolon başlığı arasındaki etkileşimle birlikte gerilme dağılımı ve bulon kaldırma kuvveti etkisi incelenmiştir. Choi C.K. ve

diğ. (1996) alın levhali moment birleşimlerinin yük altındaki davranışının tespit edilmesi amacıyla 3D simülasyon çalışması yapmış ve malzeme modeli olarak elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Çalışmada bulon ön-germe kuvveti ve bulon geometrisi dikkate alınmıştır. Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki etkileşimin tespit edilmesi amacıyla bir boşluk elemanı tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak yapılan modelleme çalışmasının doğruluğu tespit edilmiştir. N. Nematia ve diğ. (1999) EC3'de bulunan birleşen metodu'nun genişletilerek tersinir yükler altındaki alın levhali birleşimler için bir tasarım metodu geliştirilmeye çalışılmıştır. Mesnet bölgesinde bulunan t-parça monotonik ve tersinir yükler altında deneysel çalışma yapılarak incelenmiştir. Monotonik ve tersinir yükler için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak model çalışmasının doğruluğu tespit edilmiştir. Maggi, R.M. ve diğ. (2005) bulonlu alın levhali moment birleşimleri için sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Modelde lineer olmayan malzeme modeli, geometrik süreksizlikler ve geometrik lineer olmayan durum dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak sonlu elemanlar modelinin doğruluğu tespit edilmiştir. Ayrıca mesnet bölgesindeki t-parça davranış kabulü sonlu elemanlar çalışması ile incelenmiştir. Kukreti A.R. ve Zhou F. (2006) yarı-rijit birleşimlerin taşıyıcı sistem üzerindeki etkisini araştırmıştır. 8 bulonlu rijitlik levhali, alın levhali birleşimin yarı rijit davranışını ve moment-dönme ilişkisini incelemek için sonlu eleman modeli ve bir bilgisayar yazılımı oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak irdelenmiştir. Çalışmada birleşim davranışının sınıflandırılabilmesi için bir formül önerilmiştir. Shi G., ve diğ. (2008) ön-germeli bulonlu alın levhali moment birleşimleri ANSYS programı kullanılarak modellemiştir. Deney sonuçlarıyla kıyaslandığında, sonlu eleman modellerinin gerçek birleşim davranışını doğru bir şekilde temsil ettiği görülmüştür. Çalışmada moment-dönme ilişkisi, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temas etkileri, alın levhası davranışı,

panel bölgesi davranışı, ön germeli bulon kuvveti etkisi gibi hususlar incelenmiştir. Ayrıca sonlu eleman analiz sonuçlarıyla deneysel olarak tespit edilmesi zor olan basınç dağılımı, alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme, bulon ön gerilmesinin kolon başlığına etkisi, mesnet momenti, maksimum-minimum gerilme akışı gibi birçok etki ANSYS programı yardımıyla incelenmiştir. Concepción Díaz, ve diğ. (2011) sonlu eleman yönteminin diğer yöntemlere kıyasla avantajlarını vurgulamış ve alın levhalı kolon-kiriş birleşimi için üç boyutlu sonlu eleman modelini ANSYS yazılımı kullanarak oluşturmuştur. Modelde malzemenin lineer olmayan davranışı, bulonlarda ön-germe durumu, alın levhası ile kolon başlığı arasında meydana gelen etkileşim model çalışmasında dikkate alınmıştır. Daha sonra model çalışması, deneysel çalışma sonuçları ve EC3'de sunulan model ile kıyaslanarak model çalışmasının doğruluğu gösterilmiştir. Sonlu elemanlar çalışmasıyla birleşimin moment-dönme grafiğinin nasıl elde edileceği anlatılmıştır. Mashaly E. ve diğ. (2011) ANSYS yazılımı kullanarak alın levhalı moment birleşimleri için 3D sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Model'de birleşime monotonik ve çevrimsel yük uygulanmıştır. Yapılan model çalışması literatürde bulunan biri monotonik yükleme altında diğeri ise tersinir yükleme altında yapılmış iki adet deneysel çalışma sonucu ile kıyaslanarak model çalışmasının doğruluğu gösterilmiştir. Yapılan model çalışmasında analiz süresini kısaltmak ve tersinir yük altındaki modelde temas elemanının doğru modellenmesi için tavsiyede bulunmaktadır. Chen X. ve Shi G. (2016) ultra kapasiteli alın levhalı kolon kiriş birleşiminin performansını sonlu eleman analizi ile incelemiştir. Bu çalışmada ultra kapasiteli birleşimin alın levhası için yeni bir akma modeli sunulmuştur. Sunulan akma modelinin deneysel çalışmalarla ve sonlu eleman modeli ile kıyaslanarak doğruluğu gösterilmiştir. Shi G. ve diğ. (2017) ultra kapasiteli 4 adet alın levhalı kolon-kiriş birleşimini monotonik yükleme altında incelemiştir. Çalışmada eğilme momenti etkisiyle bulonlarda meydana gelen

çekme kuvvetleri için dağılım modeli sunulmuştur. Alın levhası kalınlığı ile civata çapı seçiminin uyumlu olması gerektiği vurgulanmıştır.

Bu makale çalışmasında uzatılmış alın levhalı bir birleşim ANSYS yazılımı kullanılarak üç boyutlu modellenmiş ve sonlu eleman modeli oluşturularak mesnet karakteristiğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan model çalışmasında bulonlarda ön germe kuvveti, malzeme ve geometride lineer olmayan davranış ve farklı elemanlar arasındaki sürtünme ve temas etkileri dikkate alınmıştır. Sonlu eleman analiz sonuçları Nogueiro P. ve diğ. (2006), tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen moment-dönme grafiği ile kıyaslanarak çalışmanın doğruluğu teyit edilmiştir.

2. Sonlu Elemanlar Analizi

2.1. Doğrulama için seçilen deneysel çalışmanın detayı

Nogueiro P. ve diğ. (2006), 6 adet deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Bunlardan iki tanesi monotonik yükleme altında, diğeri 4 tanesi ise çevrimsel yükleme altında yapılmıştır. Bu çalışmada Nogueiro P. ve diğ. (2006) tarafından monotonik yükleme altında yapılan deneylerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Şekil2, Şekil 7a ve Şekil 7b'de modeli oluşturulan deneysel çalışmanın detayları gösterilmiştir. Monotonik yüklemeli deneyde kolon ebatı incelenecek parametre olarak tespit edilmiştir. Alın levhası kalınlığı 18 mm dir. Alın levhası ile kiriş birbirlerine 45 derece köşe kaynağı ile kaynaklanmıştır. Kaynak elektrik ark kaynağı metoduyla yapılmıştır. Birleşim elemanı olarak M24 çapında 10.9 kalitesinde bulon kullanılmıştır. Alın levhası delik çapı 26 mm dir. Tüm birleşim elemanlarının kalitesi S355 dir. Kiriş kesitleri aynı ebatlara sahiptir. Sadece kolon ebatları değişiklik göstermektedir. Deneysel çalışmada kolona aksel yük verilmemiş sadece kiriş ucuna yük verilmiştir. Monotonik yükleme deplasman kontrollü olarak 0.02 mm/sn hızla uygulanmıştır. (Tablo1veTablo2.)

Tablo 1. Numune tip ve detayları (Nogueiro P.ve diğ., 2006).

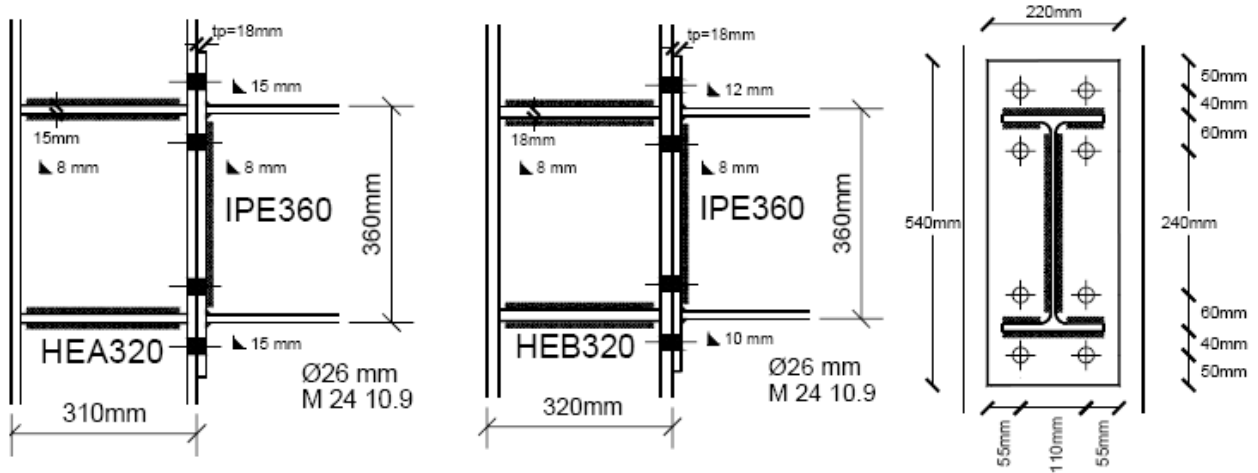
Numune Adı	Birleşim tipi	Alın levhası Kalınlığı	Bulon Çapı	Bulon Sayısı	Süreklilik levhası	Alın levhası Rijitlik levhası
Test J1.1, Test J3.1	Uzatılmış	18	24	8	Var	Yok

Tablo 2. Kolon ve kiriş kesitlerinin boyutları (Nogueiro P.ve diğ., 2006)).

Numune Adı	Kiriş	Kolon	Malzeme	Yükleme Tipi	Eksenel Yük
Test J1.1	IPE 360	HEA 320	S355	Monotonik	Yok
Test J3.1	IPE 360	HEB 320	S355	Monotonik	Yok

Tablo 3. Malzeme özellikleri (Augusto H. ve diğ., 2012).

Birleşenler	Akma Gerilmesi(MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Nihai Gerilme (MPa)	Nihai Şekil Değişirme (%)	Kopma da şekil değişirme (%)
	f_{ym}	E_m	f_{um}	ϵ_{um}	ϵ_{rm}
IPE360	430.0	206.0	554.2	15	25
HEA320	414.8	204.9	531.4	17	29
IPE360	448.2	213.6	552.9	16	26
HEA320	449.6	207.4	553.4	15	24
Alın levhası	392.9	208.4	523.0	14	24
Rijitlik levhası	286.4	205.9	451.8	20	30
Cıvatalar	990.0	213.0	1170.0	11	34



Şekil 2. Deneysel çalışma birleşim detayları (Nogueiro P.ve diğ., 2006).

2.2.Sonlu eleman modeli

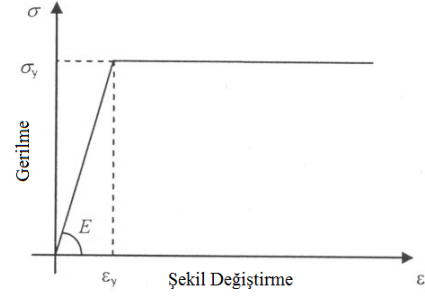
Model çalışmasında malzemenin doğrusal olmayan davranışının dikkate alınması, modelde büyük miktarda yer ve şekil değiştirme durumlarının incelenmesine imkan vermesi, düzensiz ağ modellerine uyumlu olması sebebiyle, sistemi oluşturan tüm parçalarda (kolonlar, kirişler, alın levhaları, süreklilik levhaları, ve bulonlar) yüksek hassasiyetli (10 düğüm noktalı) tetrahedral SOLID187 elemanı kullanılmıştır (Şekil 4.5.6.). Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki ara yüzeyde 3D TARGE170 ve 3D 8 düğüm noktalı CONTA174 temas elemanları kullanılmıştır. Alın levhası ile kolon başlığı arasındaki sürtünme katsayısı Shi G. ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada 0.44 olarak tavsiye edildiği için sürtünme katsayısı 0.44 kabul edilmiştir. PSMESH komutu ile bulonların orta noktasında ön gerilme elemanı PRETS179 kullanılarak ön gerilme uygulanmıştır. Kolon-kiriş mesnet bölgesi model simetrik olduğu halde simetri özelliği kullanılmadan 3 boyutlu olarak modellenmiştir.

2.3.Malzeme modeli

Şekil3.'de görüldüğü üzere birleşimi oluşturan elemanlarda elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Plastik bölge tanjant modülü iterasyon problemlerini önlemek amacıyla 10 MPa kabul edilmiştir. (Çok düşük seviyede pekleşme olduğu kabul edilmiştir.) Akma durumu kriteri olarak sünek malzemeler için tavsiye edilen Von Mises akma kriteri dikkate kullanılmıştır. Üç eksenli gerilme durumu için Von Mises akma kriteri aşağıdaki denklemde verilmiştir. Buna göre

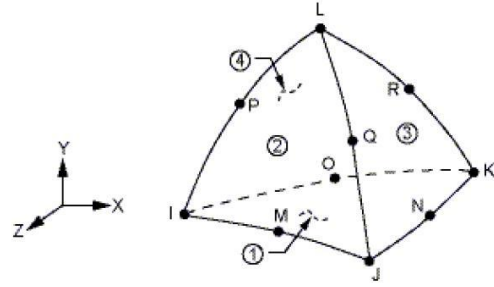
$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \quad (1)$$

Denklemden σ_{VM} malzemenin içinde oluşan tüm gerilmeleri temsil eden tek bir eşdeğer gerilmedir ve Von Mises gerilmesi olarak isimlendirilir. Buna göre Von Mises gerilmesinin (σ_{VM}) malzeme aksenal çekme dayanımına (σ_y) ulaşması durumunda ($\sigma_y > \sigma_{VM}$) malzemede akma meydana geldiği kabul edilmektedir.

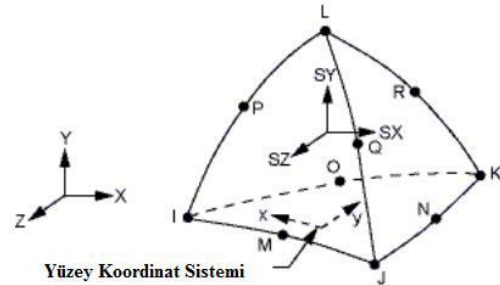


Şekil 3. Bi-lineer Malzeme modeli.

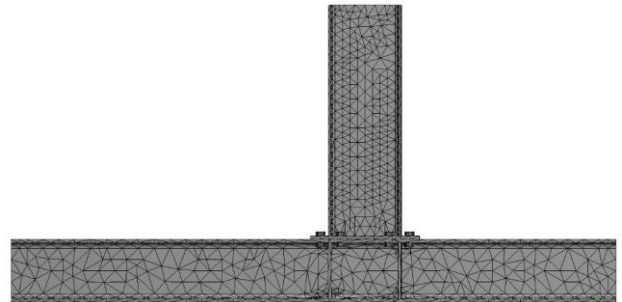
Nogueiro P. ve diğ. (2006) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmanın malzeme özellikleri, Augusto H. ve diğ. (2012) tarafından yapılan makale çalışmasında verilmiştir. Tablo3'de görüldüğü gibi HEA profilinin malzeme özellikleri verilmişken HEB profilinin malzeme özellikleri verilmemiştir. Kolon profillerinin her ikisi S355 kalite olması sebebiyle simülasyon çalışmasında HEA ve HEB profilinin malzeme özelliklerinin aynı olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4 (SOLID187) Geometri (ANSYS 2007)



Şekil 5. (SOLID187) Gerilmeler (ANSYS2007).



Şekil 6. (SOLID187) Ağ modeli.

2.4. Analiz metodu

Sonlu elemanlar modelinin çözümlenmesi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kolon elemanın iki ucunda sınır şartları basit mesnetli olarak belirlenmiş ve bulonlara ön-germe verilmiştir. M24-10.9 kalite cıvata için bulon ön-germe kuvveti Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım kuralları (2016) şartnamesinde verilen asgari bulon ön-çekme kuvveti tablosuna göre 247kN olarak uygulanmıştır. İkinci aşamada ise kirişin ucuna kademe kademe deplasman yükü verilmiştir. Yükleme sırasında meydana gelen ikincil moment (P-Delta) etkisinin dikkate alınması amacıyla doğrusal olmayan (Large Deflection) analiz yöntemi kullanılmıştır.

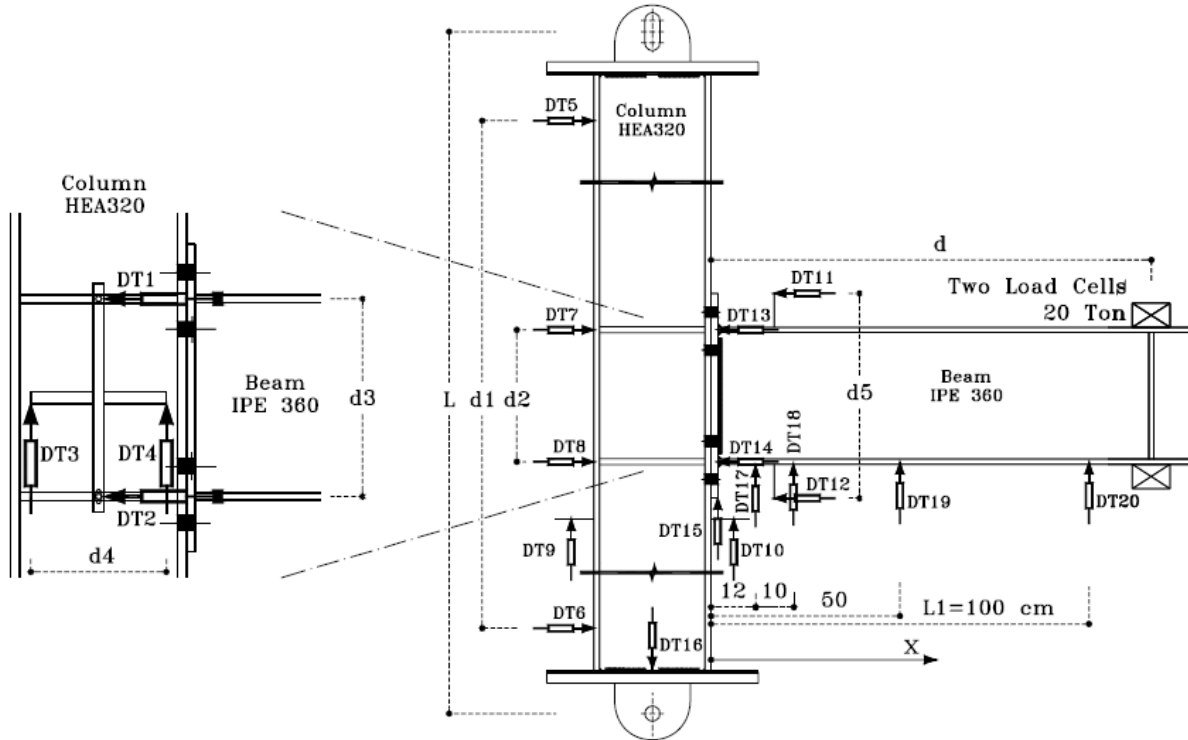
2.5. Moment-dönme grafiğinin elde edilmesi

Kolon yüzünde meydana gelen moment, kiriş ucuna uygulanan kuvvet ile kuvvet uygulanan noktanın kolon yüzünden olan uzaklığının çarpımına eşittir.

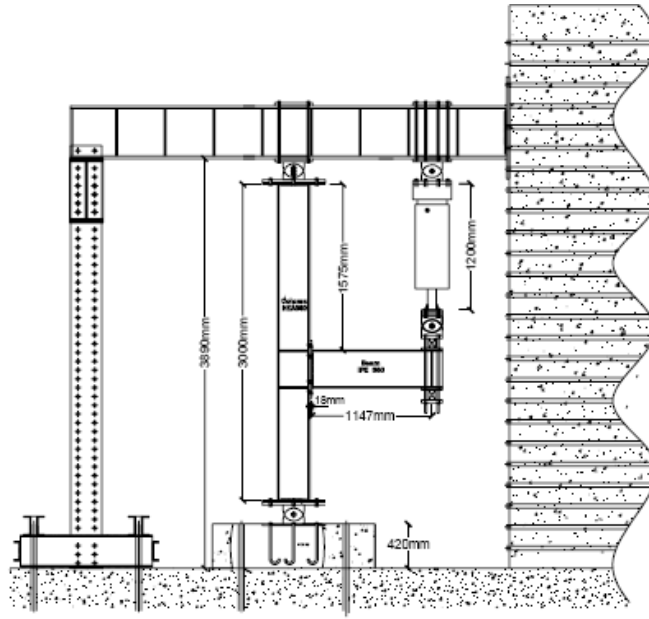
$$M = P \times L \quad (2)$$

$\phi_{dönme}$	Mesnet dönmesi
ϕ_{toplam}	Mesnetin toplam dönmesi
ϕ_{model}	Kolon-kiriş birleşiminden oluşan mesnetin rijit kütle hareketi
$\phi_{elastik}$	Kolon ve kirişin elastik dönmesi
δ_{dt}	Transducer Yerdeğiştirmesi
d	Transducer arası mesafe

olmak üzere Nogueiro P. ve diğ. (2006) mesnette meydana gelen dönmeyi denklem 2 deki gibi ifade etmişlerdir.



Şekil 7a. Deneysel çalışma detayları (Nogueiro P. ve diğ., 2006).



Şekil 7b. Deneysel çalışma detayları (Nogueiro P. ve diğ., 2006).

$$\varphi_{\text{dönme}} = \varphi_{\text{toplam}} - \varphi_{\text{model}} - \varphi_{\text{elastik}} \quad (3)$$

Buna göre mesnetteki net dönme, tüm modelin dönmesinden, kiriş ve kolondaki elastik dönmeler çıkartılarak elde edilir. Ayrıca deney düzeneğinde meydana gelen dönmenin de (Φ_{model}) hesap edilen toplam dönmeden çıkartılması gerekmektedir. Bu durum deneysel çalışma için geçerlidir. Simülasyon çalışmasında model dönmesi durumu olmadığı için Φ_{model} dikkate alınmamıştır.

Referans çalışmada belirtildiği üzere birleşimde meydana gelen net dönme farklı noktalardan tespit edilebilir. Simülasyon çalışmasında, birleşimde meydana gelen net dönmenin tespiti için 13 ve 14 numaralı ölçüm noktaları kullanılmıştır. Bu noktalarda yapılan ölçümde kirişte meydana gelen elastik yer değiştirmeden bahsedilemez.

Bu sebeplerle simülasyon çalışmasında birleşimin dönmesi aşağıdaki gibi hesap edilmiştir.

$$\varphi_{\text{dönme}} = a \tan\left(\frac{\delta_{dt13} - \delta_{dt14}}{d_2}\right) \quad (4)$$

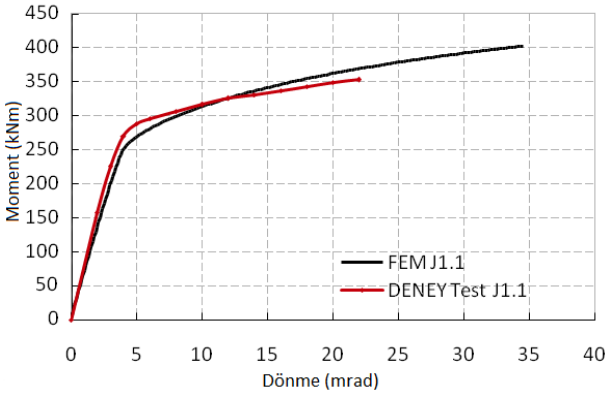
3. Bulgular ve tartışma

3.1. Moment-dönme eğrileri

Mesnet momenti hesaplanırken moment kolu 1147 mm olarak kabul edilmiş ve kolon yüzünde oluşan

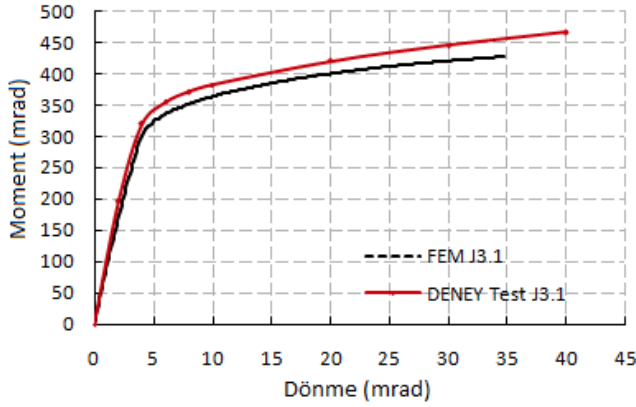
moment dikkate alınmıştır. Moment-dönme grafiklerinin sonuçları aşağıda gösterilmektedir.

Grafikler kıyas edildiğinde grafiklerin başlangıç kısmındaki doğrusal bölgenin oldukça yakın olduğu görülmektedir. Grafiğin doğrusal olmayan bölgesi de önemli oranda yakınlık göstermektedir. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar çalışması sonucu elde edilen mesnet kapasiteleri tablo olarak aşağıda sunulmuştur. Buna göre Sonlu elemanlar ile elde edilen mesnet kapasitesinin deneysel çalışma ile elde edilen mesnet kapasitesine oranı Test J1.1 numunesi için 0.986, Test J3.1 numunesi için 0.994, olarak tespit edilmiştir. Böylelikle sonlu elemanlar çalışması yapılarak deneysel çalışma sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar elde edilebileceği görülmektedir. Ancak her iki çalışma arasında meydana gelen farklılıkların sebepleri şöyle sıralanabilir. Malzeme modeli olarak sonlu elemanlarda elastik-mükemmel plastik malzeme modeli kabul edilmiş ve malzemede meydana gelen pekleşme etkisi göz ardı edilmiştir. Bulonlara uygulanmak istenen ön-germe kuvveti ile gerçekte uygulanan ön-germe kuvvetinin değişiklik gösterebilmesi ve fabrikada imal edilen malzemelerde meydana gelen imalat kusurları deneysel çalışma ile nümerik çalışma sonuçları arasında farklılıklara sebebiyet vermektedir.



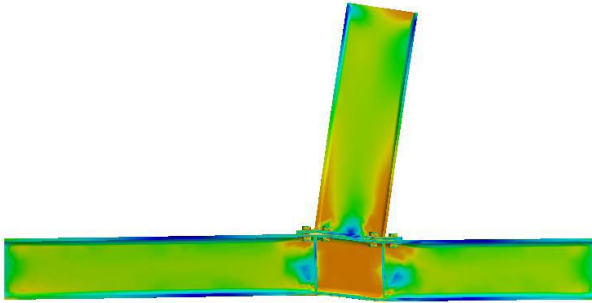
Moment-Dönme Eğrisi

Şekil 8 : Deney J1.1 ile FEM çalışmasının karşılaştırılması



Moment-Dönme Eğrisi

Şekil 9. Deney J3.1 ile FEM çalışmasının karşılaştırılması



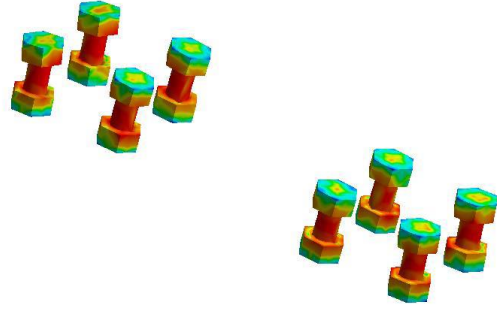
Şekil 10. Meydana gelen Von Mises gerilmelerinin gösterimi

Tablo 4. Deneysel çalışma ile FEA çalışması birleşim kapasiteleri.

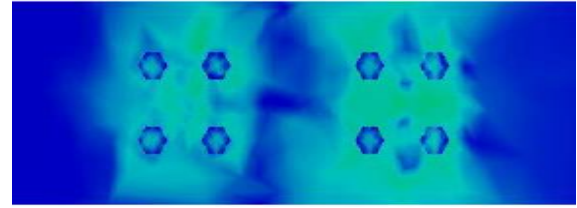
Numune	Test (KNm)	Sonlu Eleman (KNm)	Test/Sonlu Eleman
Test J1.1	288	284	0.986
Test J3.1	336	338	0.994

Tablo 5. Deneysel çalışma ile sayısal analiz çalışması başlangıç rijitlikleri.

Numune	Test (KNm/rad)	Sonlu Eleman (KNm/rad)	Test/Sonlu Eleman
Test J1.1	69500	70000	0.993
Test J3.1	100000	90000	1.11



Şekil 11. Bulonlarda meydana gelen Von Mises gerilmelerinin gösterimi



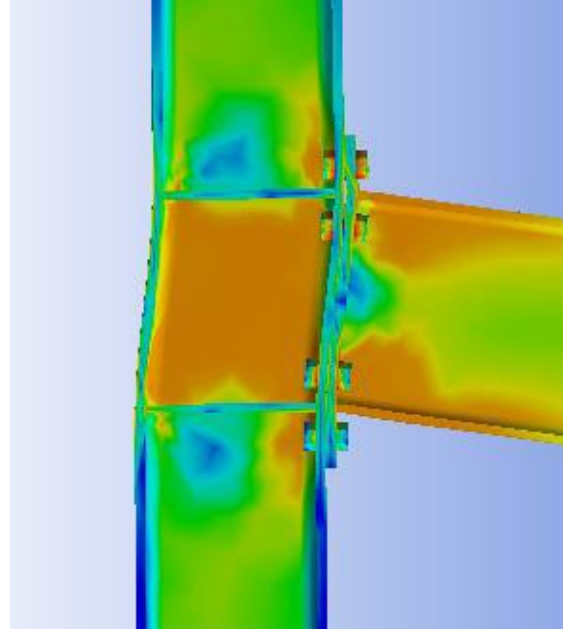
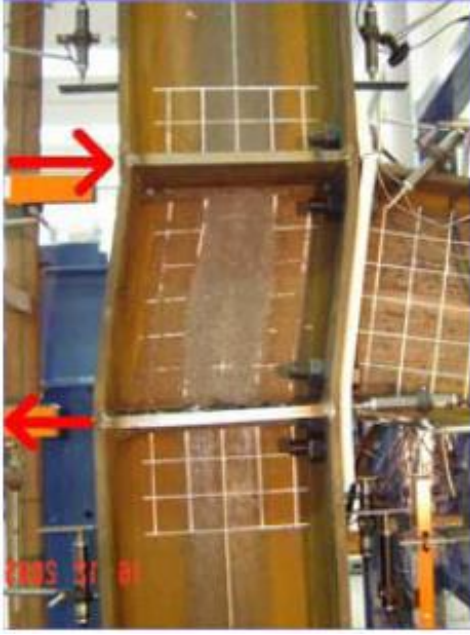
Şekil 12. Kolon yüzünde meydana gelen kayma gerilmelerinin gösterimi.

3.2. Gerimeler

247 kN ön-germe kuvveti altında bulonlarda meydana gelen en fazla Von- Mises gerilmesi J1.1 modeli için 612,6 Mpa, J3.1. modeli için ise 604,6 Mpa bulunmuştur. 50 mm kiriş uç deplasmanı için en fazla Von Mises gerilmesi J1.1 modeli için 1051,6 Mpa , J3.1. modeli için ise 1082,5 Mpa olarak tespit edilmiştir.

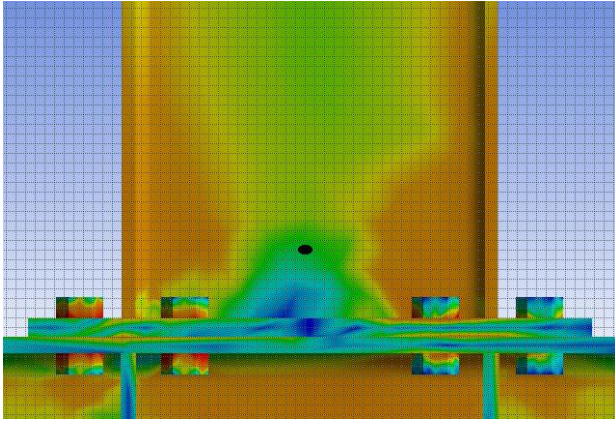
3.3. Plastik Mafsalsal Yeri

Referans çalışmasında plastik mafsalsal oluşumu ile ilgili bilgi verilmemiştir. Ancak simülasyon çalışmasında kirişte meydana gelen plastik mafsalsal bölgesinin yeri görseller üzerinde kareyaj yapılarak incelenmiştir.



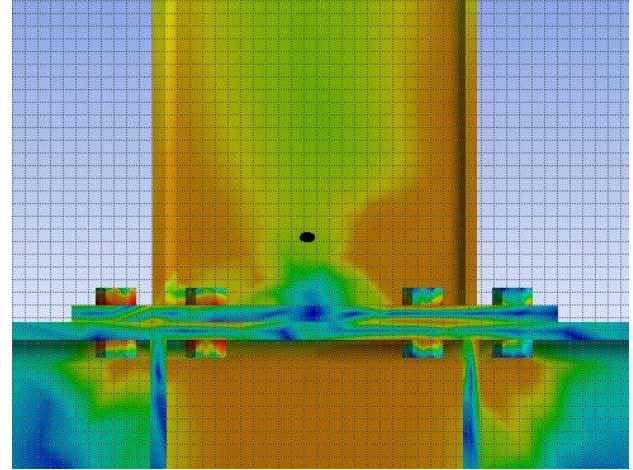
Şekil 13. Test J3.1. için deneysel çalışma ile simülasyonun karşılaştırılması

d_b kiriş profil derinliği, d_c kolon profil derinliği b_{bf} kiriş başlık genişliği, t_p alın levhası kalınlığı olmak üzere FEMA358 (2016) plastik mafsalsal yerini kolon yüzünden $\min(d_b/2; 3.b_{bf})$ uzaklıkta belirtirken FEMA350 (2000) plastik mafsalsal yerini kolon merkez aksından $(d_c / 2 + t_{pl} + d_b / 3)$ mesafesi kadar uzaklıkta belirtmiştir.



Şekil 14. Plastik mafsalsal yeri J1.1

Plastik mafsalsal oluşan bölgenin noktasal olarak tespiti kolay değildir. Simülasyon çalışmasında plastik mafsalsal merkez noktasının alın levhasına uzaklığı yaklaşık olarak $(d_b/5)$ tespit edilmiştir. Ancak kolon başlığında meydana gelen eğilme momentini hesap ederken güvende kalmak maksadıyla plastik mafsalsal uzaklığının $(d_b/3)$ olarak kabul edilmesinin uygun olduğu düşünülmüştür.



Şekil 15. Plastik mafsalsal yeri J3.1.

4. Sonuç

Bu çalışmada bulonları ön gerilme verilerek sıkılmış alın levhalı kolon-kiriş birleşimlerinin sonlu eleman analizi anlatılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sonlu eleman çalışması ile alın levhalı kolon-kiriş birleşimlerinin monotonik yükleme altındaki genel davranışı, (göçme modu, rijitliği) tespit edilebilmektedir.
- Birleşimde meydana gelen bölgesel etkiler, birleşimi meydana getiren parçaların davranışı ve deformasyonu (panel bölgesi, alın levhası ve bulonlar) mesnetteki basınç-çekme gerilme dağılımları, oluşan

maksimum ve minimum gerilmeler tespit edilebilmektedir. Bulon ön-germe kuvveti başarılı bir şekilde simüle edilebilmektedir. Deneysel çalışmada incelesi zor olan alın levhası ile kolon başlığı arasında meydana gelen sürtünme etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle kolaylıkla tespit edilebilmektedir.

- Simülasyon çalışması ile plastik mafsallık bölgesinin yeri gerçeğe yakın olarak tespit edilmiştir.
- Sonlu elemanlar çalışmasının doğruluğu deneysel çalışmalar ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Sonlu elemanlar çalışması parametrik çalışmalar yapmaya ve şartnameler için yeni tasarım metotları geliştirmeye imkân tanımaktadır.

Kaynaklar

ANSI/AISC 341-10 (2010), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction; Chicago, IL, USA.

ANSI/AISC 358-10 (2010), Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction; Chicago, IL, USA.

ANSYS (2007), Swanson Analysis Systems online manual, version 11.0, and theory reference.

AISC Design Guide 4 (2003), Extended End-Plate Moment Connections, Seismic and Wind Applications (Second Edition), American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.

Augusto H., Rebelo C, Simões da Silva L. S., Castro J.M., 2012. Modeling of the Dissipative Behavior of Partial-Strength Beam-to-Column Steel Connections, The 15th World Conference on Earthquake Engineering.

Bahaari M.R., Sherbourne A.N., 1994. Computer modelling of an extended end-plate bolted connection Computers & Structures, Volume 52, Issue 5, 3 September, Pages 879-893

Chen X., Shi G. (2016), Finite element analysis and moment resistance of ultra-large capacity end-plate

joints. Journal of Constructional Steel Research, 126, Pages 153-162

Choi C.K., Chung G.T., Song M.K., 1996. Refined Three-Dimensional Finite Element Model for End-Plate Connections Advances in Steel Structures (ICASS '96), Pages 365-370

Concepción Díaz, Mariano Victoria, Pascual Martí, Osvaldo M. Querin FE model of beam-to-column extended end-plate joints Journal of Constructional Steel Research, Volume 67, Issue 10, October 2011, Pages 1578-1590

Çelik Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (2016)

EN1993-1-8, Eurocode 3. 2005.-Design of Steel Structures Part 1.8: Design of Joints. Commission of the European Communities, Brussels.

Krishnamurthy N., Graddy D.E., 1976. Correlation between 2- and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections. Computers & Structures, Volume 6, Issues 4-5, August-October 1976, Pages 381-389

Kukreti A.R. , T.M. Murray T.M. , 1987. Abolmaali A. End-plate connection moment-rotation relationship Journal of Constructional Steel Research, Volume 8, Pages 137-157

Kukreti A. R., Zhou F. (2006). Eight-bolt end-plate connection and its influence on frame behaviour. Engineering Structures, 28(11), 1483-1493.

Maggi Y.I., Gonçalves R.M., Leon R.T., Ribeiro L.F.L., 2005. Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling Journal of Constructional Steel Research, Volume 61, Issue 5, Pages 689-708

Mashaly E., El-Heweity M., Abou-Elfath H., Osman M., 2011. Finite element analysis of beam-to-column joints in steel frames under cyclic loading Alexandria Engineering Journal, Volume 50, Issue 1, Pages 91-104

Nemati N., Houedec D. Le, Zandonini R., 2000. Numerical modelling of the cyclic behaviour of the basic components of steel end plate connections Advances in Engineering Software, Volume 31, Issue 11, Pages 837-849

Nogueiro, P., Simões da Silva L., Bento R. and Simões, R. ,2006. Experimental behaviour of standardised european endplate beam-to-column steel joints under arbitrary cyclic loading, Stab. Ductil. Steel Struct.,Lisbon, Portugal.

Sherbourne Archibald N., Bahaari Mohammed R., 1996. 3D simulation of bolted connections to unstiffened columns—I. T-stub connections Journal of Constructional Steel Research, Volume 40, Issue 3, December, Pages 169-187

Shi G., Shi Y., Wang Y., Bradford M. A., 2008. Numerical simulation of steel pre-tensioned bolted end-plate connections of different types and details Engineering Structures, Volume 30, Issue 10 , Pages 2677-2686

Shi G., Chen X., Wang D. (2017) Experimental study of ultra-large capacity end-plate joints. Journal of Constructional Steel Research, Volume 128, January, Pages 354-361