



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy  
2011, Volume: 6, Number: 4, Article Number: 1A0245

**ENGINEERING SCIENCES**

Received: May 2011  
Accepted: October 2011  
Series : 1A  
ISSN : 1308-7231  
© 2010 www.newwsa.com

**Emine Aydın**  
**Muharrem Aktaş**  
Sakarya University  
emineb@sakarya.edu.tr  
Sakarya-Turkey

**İNCE PLAKLARIN BURKULMASINDA GEOMETRİK KUSURLARIN ETKİSİ**

**ÖZET**

Narin yapı elemanları, aksenal yükler ve deprem yükleri altında yerel ve global burkulmalara maruz kalırlar. Yapı elemanının bünyesinde bulunan geometrik kusurlar burkulma yükünü etkilemektedir ve bu tür elemanlar Euler burkulma yük seviyesine ulaşmamaktadırlar. Bu çalışmada; narin çelik plakların burkulmasında geometrik kusurların etkisi araştırılmıştır. Burkulma deneyi yapılan artı kesitli kolon elemanının bilgisayar modeli oluşturulmuştur. Modelde farklı narinlik oranlarına sahip elemanlara farklı geometrik kusurlar uygulanarak analizler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Burkulma, Geometrik Kusur, Narinlik,  
Doğrusal Olmayan Analiz, Kolon

**INFLUENCE OF THE GEOMETRIC IMPERFECTIONS ON THE BUCKLING OF THIN PLATES**

**ABSTRACT**

Slender structural elements are subjected to both local buckling and global buckling under impact loading and earthquake loading. More over it is obvious that structural elements with imperfections can never achieve the Euler Buckling load levels and all the structural members come with their own geometric imperfections. In this study; influence of geometrical imperfections on the buckling of slender steel plates is investigated.

**Keywords:** Buckling, Geometric Imperfection, Slenderness,  
Non-Linear Analysis, Column

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir stabilite problemi olan burkulma, basınç gerilmesi altında bulunan elemanlarda gerilme probleminden daha önemli bir problemdir. Burkulma problemleri çok zor olan aksenal basınç yükleme deneyi ile anlaşılmalı çalışılır. Gerek malzeme bakımından gerekse geometri bakımından doğrusal olmayan analiz sonucundan benzer davranışları izlemek mümkündür.

Yapı elemanlarının davranışlarını incelerken deneysel metotlar en doğru yaklaşım yöntemidir. Ancak deney parametrelerinin artması ile gereken deney sayılarının artacak olması hem ekonomik açıdan hem de zaman açısından sakıncalar doğurmaktadır. Bu sorun doğrusal olmayan sonlu eleman programları kullanılarak giderilebilir. Ancak bu programlarda üretilen modeller deneysel bir veri ile gerçekleştirildikten sonra gerek statik gerekse dinamik yükler altında parametrik çalışmalarda kullanılmalıdır.

İnce cidarlı çelik yapı elemanlarının sonlu eleman modellemesinde doğrusal olmayan geometrik analiz yapılması gerçek davranışının yakalanması açısından önemlidir. Doğrusal olmayan geometrik analiz yapılmadan önce elemana ilkel kusurlar verilerek burkulmasına yardımcı olmak gerekmektedir [1].

Bu çalışmada, üç kenarından mesnetli çelik plak elemanlarına geometrik kusur tanımlanarak doğrusal olmayan analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanmıştır. Analiz için Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

## 2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Çelik elemanlarıyla aksenal basınç deneyleri yapmak zor bir işlemdir. Mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar modellemesiyle gerçek deneyler nümerik olarak yapılabilir. Ancak çelik elemanlarda geometrik kusurların modellerle aktarılması gerekmektedir. Bu kusurların hangi büyüklükte ve ne şekilde verileceği araştırılmalıdır. Bu çalışmada kusur oranları eleman uzunluğuna bağlı olarak değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile deney sonuçları kıyaslanarak gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

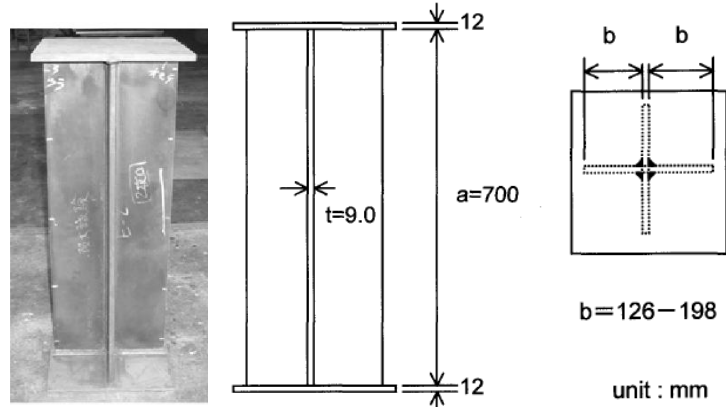
## 3. SEM'İN (SONLU ELEMAN MODELİNİN) DOĞRULANMASI (VERIFICATION OF FINITE ELEMENT MODELING)

Burkulmada geometrik kusur etkisinin araştırılması için literatürden Mikihiro Hirohata and You-Chul Kim tarafından yapılan çalışma kullanılmıştır [2]. Çalışmada kullanılan deney numunesine ait malzemenin mekanik özellikleri ve boyutları Tablo 1' de, geometrisi Şekil 1' de, yük-deplasman grafiği de Şekil 2' te sunulmuştur.

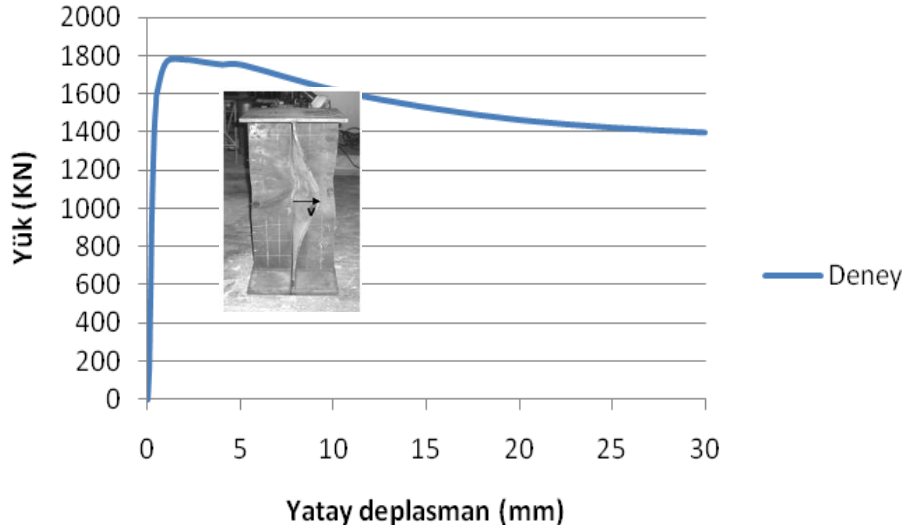
Deney numunesi üç kenarından mesnetli 4 adet plaktan oluşan artı kesitli bir basınç elemanıdır. Bu elemanda meydana gelecek olan burkulma kararlı bir burkulma olacağından ölçüm alınması daha kolaydır.

Tablo 1. Deney numunesinin mekanik özellikleri ve boyutları [2]  
(Table 1. Mechanical properties and dimensions of experimental samples [2])

Malzeme	SM490YA
Elastisite Modülü E (GPa)	200
Akma gerilmesi $\sigma_y$ (MPa)	412
Çekme gerilmesi $\sigma_u$ (MPa)	539
Poisson oranı	0.3
Yükseklik a (mm)	700
Genişlik b (mm)	126
Kalınlık t (mm)	9



Şekil 1. Deney numunesi [3]  
(Figure 1. Test element [3])



Şekil 2. Yük-deplasman grafiği [2]  
(Figure 2. Load-displacement plot [2])

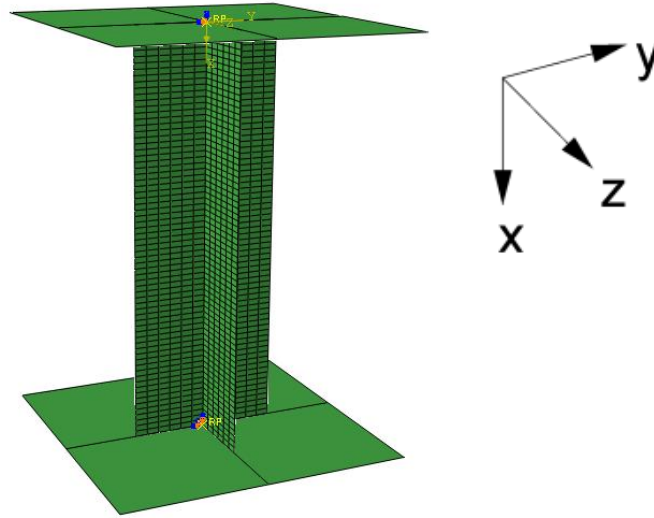
### 3.1. Sonlu Eleman Modelinin (SEM) Oluşturulması (Finite Element Modeling Strategies)

- **Çözüm ağı:** Sonlu Eleman Modelinde (SEM) kolon elemanda S4R kabuk eleman, alt ve üst başlıklarda R3D4 rijit elemanlar tanımlanmıştır.

S4R elemanı, 4 düğüm noktalı, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman olup her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi vardır. S4R elemanı sonlu şekil değiştirmeyi ele aldığından büyük şekil değiştirme analizleri için de uygundur[4].

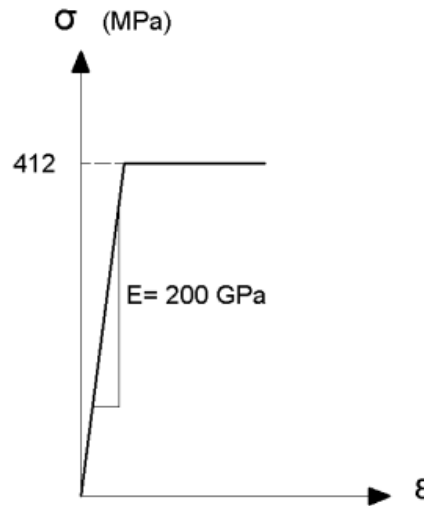
R3D4 elemanı, üç boyutlu 4 düğüm noktalı rijit elemanlardır. Üç boyutlu katı cismin iki boyutlu yüzey modeli olarak oluşturulmasında kullanılır. Bu çalışmada alt ve üst başlıkta mesnet bölgelerinde kullanılmıştır.

Deney elemanına ait sonlu elemanlarla oluşturulan çözüm ağı Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3. Modelin çözüm ağı  
(Figure 3. Mesh layout of the model)

- **Sınır koşulları ve yük uygulanması:** Deneysel eleman sınır koşulu olarak alt başlıktan ankastre ( $u_1, u_2, u_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3 = 0$ ), üst başlıkta ise x doğrultusunda yer değiştirmesi ( $u_1$ ) ve y ekseninde dönmesi ( $\theta_2$ ) serbest değerleri de ( $u_2, u_3, \theta_1, \theta_3 = 0$ ) tutulu olarak mesnetlenmiştir. SEM' de modele üst başlıktan X yönü doğrultusunda ağırlık merkezine gelen tekil yük uygulanmıştır.
- **Malzeme modeli:** Malzeme matematik modeli için elastik mükemmel plastik davranışı kabul edilmiştir. Sonlu eleman modelinde kullanılan malzemenin  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 4. Malzeme  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği  
(Figure 4.  $\sigma$ - $\epsilon$  relationship of test material)

#### 4. GEOMETRİK KUSUR TANIMLAMA (MODELING OF GEOMETRIC IMPERFECTION)

Non-linear geometrik analizde denge denklemleri deforme olmuş geometri referans alınarak oluşturulur. Deplasmanlar, hesaplanabilmelerine rağmen, yapı statik teorisinde hareket ve denge denklemleri yazılırken ihmal edilirler. Özellikle burkulma sonrası

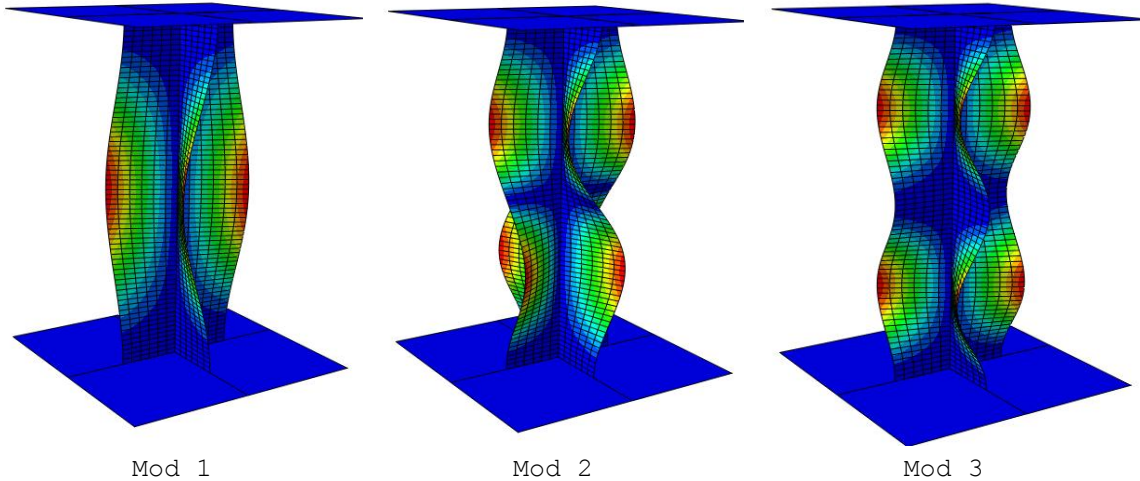
davranışın takip edilebilmesi, ikinci mertebe etkilerinden dolayı oluşan kuvvetlerin hesaplanması için denge denklemlerinin deforme olmuş geometriye göre yazılmaları gerekmektedir. İnce cidarlı geometrilerinden dolayı çelik profiller yerel ve global burkulmaya açık yapı elemanlarıdır. Özellikle yerel burkulmaların etkilerinin izlenebilmesi için non-lineer geometrik analiz yapılmalıdır. Bundan dolayı sonlu eleman modellerine gerçekteki gibi burkulmasına yardımcı olmak amacıyla başlangıçta ilkel kusurlar eklenmelidir. Aslında bu ilkel kusurların eklenmesi gerçekte hiçbir elemanın kusursuz olmadığı gerçeği ile de örtüşmektedir. İlkel kusurların sonlu eleman modeline entegre edilmesinde iki yöntem önerilir.

- Yöntem: Var olan kusurun sinüs dalgası formülasyonu ile idealize edilmesi, [5]
- Yöntem: Kusursuz sistemin lineer burkulma analizi yapılarak birinci burkulma modunun ölçeklendirilerek kusurlu sistemmiş gibi kabul edilmesi, [6]

Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılarak geometrik kusurların değişiminin etkisi incelenecektir. Sonlu eleman analizi iki aşamada yürütülecektir.

Birinci aşamada Yapı elemanı önce kusursuz bir şekilde modellenir ve lineer burkulma analizi yaptırılarak burkulma modları elde edilir. Elde edilen burkulma modlarının en küçüğü bir sayı ile ölçeklendirilerek kusurlu sistemin geometrisiymiş gibi sayısal modele aktarılır [1].

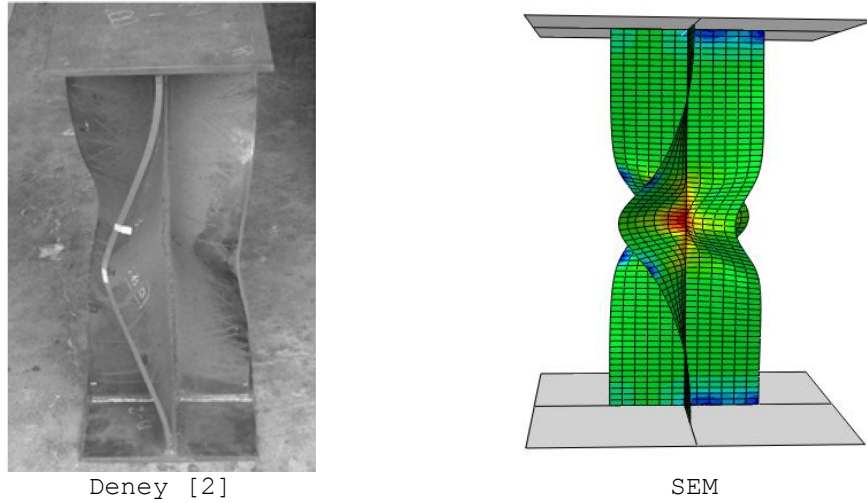
İkinci aşamada ise statik analiz yapılacaktır. Statik analiz bu kusurlu çözüm ağı üzerinden yürütülür. Bu çalışmada en küçük mod yerine ilk üç mod üst üste süperpoze edilerek kusurlu çözüm ağı elde edilmiştir. Kusursuz elemana burkulma analizi yapılarak ilk üç moda ait burkulma formları şekil 5' te verilmiştir.



Mod 1 Mod 2 Mod 3  
Şekil 5. Kusursuz elemana ait burkulma mod şekilleri  
(Figure 5. Buckling mode shapes of perfect geometry)

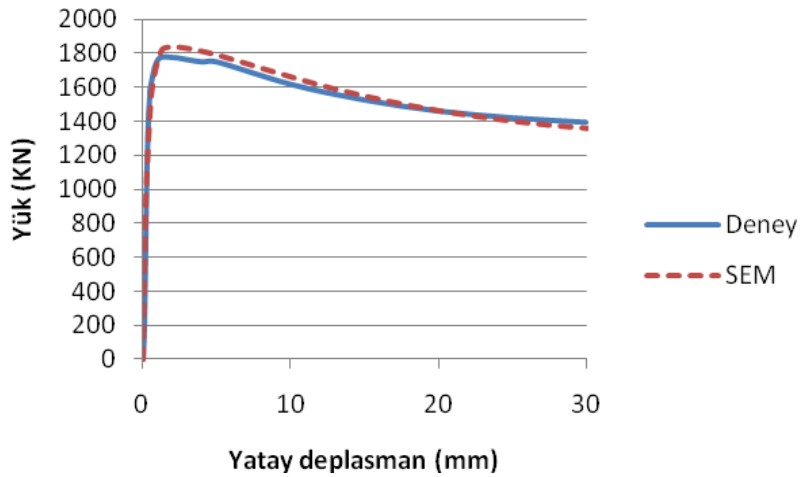
#### 4.1. Modelleme Tekniğinin Doğrulanması (Verification of Modeling Technique)

Sonlu elemanlar modeliyle lineer burkulma analizi yapıldıktan sonra ölçeklendirme olarak  $L/2500$  ( $L$ : eleman yüksekliği) kullanılarak kusurlu eleman modeli oluşturulmuştur [6]. Literatürden alınan deney ile SEM ile yapılan statik analiz sonucunda elde edilen şekil değiştirmeler şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 6. Deney ve SEM' e ait şekil değiştirmeler  
(Figure 6. Deformed geometry of both test element and finite element model)

Görüldüğü üzere SEM, deneyden elde edilen burkulma şeklini yakalayabilmiştir (Şekil 7).

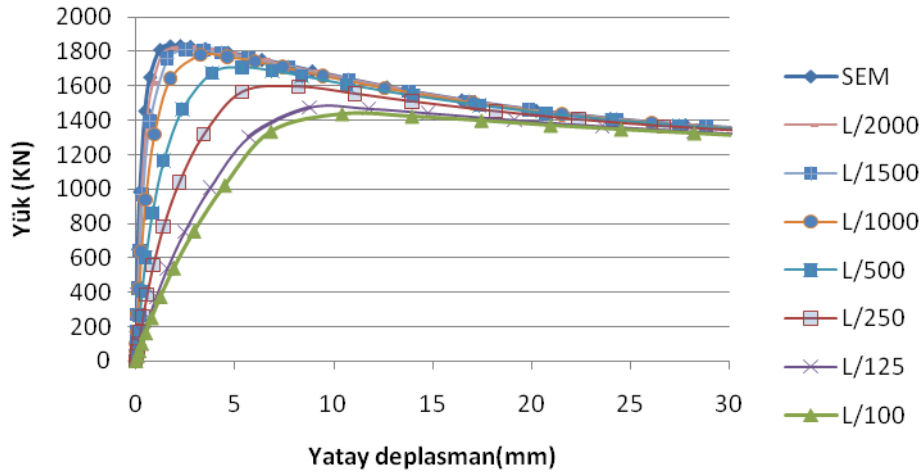


Şekil 7. SEM ve deney çalışmasının yük-deplasman grafiği  
(Figure 7. Load-displacement graph of FEM and test)

Ayrıca yük- deplasman grafikleri incelendiğinde SEM sonuçlarının deney sonuçlarını kabul edilebilir yakınlıkta yakaladığı görülmektedir. Hazırlanan sonlu eleman modelinin gerçek deney sonuçlarını yakaladığından dolayı bundan sonra deney yerine nümerik deneyler yapılarak kusur etkisi incelenecektir.

##### 5. GEOMETRİK KUSUR ETKİSİ (IMPACT OF GEOMETRIC IMPERFECTION)

Basınç elemanına L/2000, L/1500, L/1000, L/500, L/250, L/125, L/100 ölçeklerinde kusurlar verilerek aşağıdaki grafik elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Geometrik kusur etkisi  
(Figure 8. Impact of geometric imperfection)

Doğrusal olmayan analiz sonucunda, çelik elemanların geometrik kusurları arttıkça rijitliklerinin ve yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmektedir.

#### 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kusurlu elemandaki maksimum yük-deplasman değerleri ile deneyle doğrulanan elemandaki maksimum yük-deplasman değerleri oranlandığında elde edilen değerler Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo2. Yük-deplasman oranları  
(Table 2. Load-displacement ratios)

Ölçek	$P_{\text{kusur maks.}}/P_{\text{deney maks.}} (\%)$	$\delta_{\text{kusur maks. yük}}/\delta_{\text{deney mak. yük}} (\%)$
L/2000	0.005	0.034
L/1500	0.015	0.524
L/1000	0.030	0.450
L/500	0.070	1.396
L/250	0.130	2.653
L/125	0.195	2.908
L/100	0.215	3.658

Tablo 2' deki değerlere bakıldığında kusur miktarının artmasıyla burkulma yükünü %21,5' e kadar azaldığı, burkulma anındaki deplasmanında %366 kadar arttığı görülmektedir. Bu çalışma ile, basınç elemanlarında kusur varlığının sonuçları oldukça değiştirdiği açıkça ortaya konmuştur.

#### NOT (NOTICE)

Bu makale, 28-30 Eylül 2011 tarihleri arasında Elazığ Fırat Üniversitesinde "International Participated Construction Congress" IPCC11'de sözlü sunum olarak sunulmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dere, Y.Z., Mercan, E.D., Aktas, M. ve Elmas, M., (2010), Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde çelik eğilme elemanlarının geometrik kusurlarının tanımlanması, Türkiye Abaqus kullanıcıları Toplantısı, ss:215-222.

2. Hirohata, M. ve Kim, Y.C., (2007). Dominant Factors Deciding Compressive Behavior of CruciformColumn Projection Panel Corrected by Heating, *Steel Structures* 7, ss:193-199.
3. Hirohata, M., Kim, Y.C. ve Kawazu, H., (2004). Safety Evaluation of Cruciform Columns Corrected by Heating, *Trans. JWRI*, Vol 33, No.1, ss:53-58.
4. Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, İMO 6. Oturum, ss:273-280
5. Aktas, M., (2004), Minor Axis Flexure and Combined Loading Response of I-Shaped Steel Members, Pittsburgh Üniversitesi, Doktora tezi, University of Pittsburgh School of Engineering.
6. Thomas, S. ve Earls, C.J., (2003a), Cross Sectional Compactness and Bracing Requirements For HPS483W Girders", *J struct. Eng.*, ASCE, 129 (12), ss:1569-1583