



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanıl burkulma sınır uzunluğuna etkisi

## *Influence of web distortions on inelastic lateral buckling length*

Yazar(lar) (Author(s)): M. Fethi ERTENLİ <sup>1</sup>, İlker KALKAN <sup>2</sup>, Alper BÜYÜKKARAGÖZ<sup>3</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-7310-8720

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5987-631

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-1074-7637

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Ertenli M. F., Kalkan İ. ve Büyükkaragöz A., “Gövde buruşmalarının elastik olmayan yanıl burkulma sınır uzunluğuna etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 24(1): 347-354, (2021).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.821093

# Gövde Buruşmalarının Elastik Olmayan Yanal Burkulma Sınır Uzunluęuna Etkisi

## Influence of Web Distortions on Inelastic Lateral Buckling Length

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Çift simetrik çelik I kirişlerin moment kapasitesi-serbest uzunluk grafikleri nümerik olarak çizilmiştir. (The moment capacity-unbraced length curves of doubly-symmetric steel I-beams were drawn numerically.)
- ❖ Yönetmelikle elde edilen inelastik burkulma sınır uzunlukları ilgili nümerik değerlerle karşılaştırılmıştır. (The inelastic limit lengths from the code were compared to the respective numerical values.)
- ❖ Gövde buruşmaları, kirişlerin inelastik yanal burkulma bölgelerini büyötmektedir. (Web distortions expand the inelastic buckling regions of the beams.)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Sonlu eleman analizleri yardımıyla geniş başlıklı çift simetri eksenli I-enkesitli çelik kirişlerin moment kapasitelerinin serbest uzunluğa göre değişimini gösteren grafikler elde edilmiş ve kirişlerin nümerik elastik olmayan burkulma sınır uzunlukları belirlenmiştir (Şekil 1). (Numerical curves illustrating the variation of moment capacity with unbraced span length were obtained for various wide-flange doubly-symmetric steel I-beams and the limiting unbraced length values for inelastic lateral buckling were determined (Figure 1).)



Şekil 1 Nümerik ve analitik süreç / Figure. 1 Numerical and analytical process

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada, çift simetri eksenli I-enkesitli çelik kirişlerin gövde buruşmalarının ve yanal buruşmalı burkulma (YBŞB) modunun inelastik burkulma sınır uzunluk değeri üzerindeki etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. / The effects of web distortions and lateral distortional buckling (LDB) mode on the limiting laterally unbraced length for inelastic buckling of doubly-symmetric steel I-beams were aimed to be determined in the present study.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sonlu elemanlar methodu (SEM) kullanılarak modellenen kirişler için statik analiz yapılmıştır. / A static analysis was performed for the beams using the finite element method (FEM).

### Özgünlük (Originality)

Güncel yönetmelikler, kirişlerin inelastik burkulma sınır uzunluğunu belirlerken YBŞB modunu göz ardı etmektedir. Bu çalışma, gövde narinlikleri büyük olan kirişlerde YBŞB'nin inelastik burkulma sınır uzunluğuna etkisini ortaya koymaktadır. / The current codes ignore the LDB mode when determining the limiting unbraced length for inelastic buckling. This study underscores the effects of LDB on inelastic buckling limit length in especially the beams with slender webs.

### Bulgular (Findings)

Tüm kesitlerin SEM ile belirlenen nümerik inelastik burkulma sınır uzunluğu değelerinin, Türkiye Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik [16]'ya göre hesaplanan ilgili teorik değelerden büyük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kesitlerin gövde narinlikleri arttıkça nümerik uzunluğun teorik uzunluğa oranı artmaktadır. / The numerical inelastic limiting unbraced length values of all analyzed sections from FEM were determined to exceed the respective theoretical values from the Turkish Steel Structures Design Code [16]. What's more, the ratio of the numerical length to the theoretical one increases with increasing web slenderness.

### Sonuç (Conclusion)

Bu bulgular, yönetmelik formülünün kirişlerdeki gövde buruşmalarını dikkate almamasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışma, YBŞB modunu da hesaba katan formüllerin yürürlükteki çelik yapı tasarım şartnamesine dahil edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. / These findings stem from the fact that the code formulations do not take the web distortions in the beams into account. This study revealed that formulae accounting for the LDB mode should be included in the current steel regulation.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Gövde Buruşmalarının Elastik Olmayan Yanal Burkulma Sınır Uzunluęuna Etkisi

*Arařtırma Makalesi / Research Article*

**M. Fethi ERTENLİ<sup>1\*2</sup>, İlker KALKAN<sup>3</sup>, Alper BÜYÜKKARAGÖZ<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat ABD. Doktora Öğrencisi, Kırıkkale, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

<sup>3</sup>Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Türkiye

<sup>4</sup>Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 04.11.2020 ; Kabul/Accepted : 14.12.2020)

## ÖZ

Çift simetri eksenli I-enkesitli çelik kirişlerin gövde narinlik oranları büyük olduğunda, yanal buruşmalı burkulma (YBŞB) olarak adlandırılan bir göçme şekli ortaya çıkmaktadır. YBŞB, yanal burulmalı burkulma modu ile gövde yerel burkulma modunun etkileşimi sonucu ortaya çıkan bir burkulma şeklidir. Gövde narinliği ve başlık kompaktlığı, YBŞB modu üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu çalışma, çift simetri eksenli I-enkesitli çelik kirişlerin inelastik YBŞB davranışlarını araştırmaktadır. Kiriş serbest açıklığı azaldıkça elastik olmayan davranışın arttığı ve gövde kesitinde (tarafsız eksen ile basınç başlığı arasındaki bölgede) akmanın başlamasıyla gövde buruşmalarının oluştuğu bilinmektedir. Özellikle inelastik davranan kirişlerde gövde buruşmaları daha sık gözlenmektedir. Bu çalışmada, farklı gövde narinliklerine sahip kesitler için Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelikte önerilen inelastik burkulma sınır uzunluk ( $L_r$ ) formülünden elde edilen analitik değerler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen ilgili uzunluklar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma ile gövdede meydana gelen buruşmaların, kesitin inelastik davrandığı serbest uzunluk aralığını genişlettiği görülmüştür. Gövde buruşmalarının oluşmasında akmanın etkin bir parametre olduğu tespit edilmiştir. İlgili analizlerde genel olarak, YBŞB etkisiyle yönetmelik tahminlerinden daha yüksek  $L_r$  değerleri elde edilmiştir. Ancak kesitlerin gövde narinlikleri arttıkça nümerik yöntem ile belirlenen  $L_r$  değerlerinin analitik formül ile belirlenen  $L_r$  değerlerine oranı artmaktadır. Yapılan çalışma ile yürürlükte bulunan çelik yapı tasarım şartnamesine, önemli bir stabilite problemi olan YBŞB formüllerinin de dahil edilmesi gerekliliği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yanal buruşmalı burkulma, yanal burulmalı burkulma, lokal burkulma, elastik olmayan burkulma boyu, sonlu elemanlar modeli.

# Influence of Web Distortions on Inelastic Lateral Buckling Length

## ABSTRACT

A critical failure mode is encountered in double symmetric steel I-beams, which is known as lateral distortional buckling (LDB), when the web slenderness ratio of the section is relatively high. LDB is a buckling mode arising through the interaction of the well-known lateral torsion buckling (LTB) and web buckling, i.e. local buckling (LB), modes. Web slenderness and flange compactness have significant effects on LDB. This study focused on the inelastic LDB behavior of doubly-symmetric steel I-beams. The inelastic behavior increases and web distortions take place with the initiation of yielding in the web (between neutral axis and compression flange) with decreasing beam length. Generally, web distortions are encountered more commonly in the inelastic range of buckling. In this study, analytical limiting unbraced length ( $L_r$ ) values of the beams with different web slenderness values from the inelastic LTB ( $L_r$ ) formula of the Turkish Steel Structures Design Code (TSSDC 2016) were compared to the respective finite element results.  $L_r$  values were observed to increase due to web distortions. Yielding was determined to be the most influential parameter on web distortions. As a result of LDB, numerical  $L_r$  values were higher than the respective analytical estimates from code formulations. However, as the web slenderness of the section increases, the numerical-to-analytical  $L_r$  ratio was shown to increase. The study underscored the need to include LDB formulas into the current steel structure design specifications.

**Keywords:** Lateral distortional buckling, lateral torsional buckling, local buckling, inelastic buckling length, finite element model.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Önemli momentlerin oluştuğu büyük açıklıklı demiryolu ve karayolu köprüleri ile eksenel yük ve eğilme momenti seviyelerinin yüksek olduğu çok katlı yapılar, yapısal çeliğin sıklıkla tercih edildiği yapı türleri olarak öne çıkmaktadır. Yapısal çeliğin betonarme ve öngerilmeli

betona göre daha maliyetli bir yapı malzemesi olması, bulonlu ve kaynaklı birleşimlerin gerektirdiği nitelikli işçilik, bu malzemenin ülkemizde kullanımını sınırlandırmaktadır. Ancak, ilk inşaat sürecinde karşılaşılan bu olumsuzluklar, çelik yapıların yapım sürelerinin daha kısa olması ile üretime ve kullanıma daha erken geçilmesi sayesinde aşılabilmektedir. Örneğin, bir sanayi yapısının çelik taşıyıcı sisteme sahip olması, betonarme bir sisteme göre daha yüksek yapım

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : m.fethiartenli@karabuk.edu.tr

maliyetleri ortaya çıkarsa da sanayi yapısının üretime erken geçişi ile işverenin bu ilave harcamaları telafi edilmektedir. Ayrıca; çeliğin geri dönüşüme uygun bir malzeme olması, çelik yapıların demontaj-montaj kolaylığı da yapısal çeliğin önemli avantajları olarak ortaya çıkmaktadır.

Sismik açıdan aktif bir bölgede yer alan Türkiye; Avrasya levhası, Arap levhası ve Afrika levhası arasında bulunmaktadır. Türkiye, sınırları içerisinde bulunan Kuzey Anadolu fay hattı, Doğu Anadolu fay hattı ve Batı Anadolu fay hattı ile deprem kuşağında yer almaktadır. Bir deprem kuşağında olması nedeniyle, Türkiye'deki yapı stoğunun depreme dayanıklı olması gerekmektedir. Deprem kuvvetleri gibi yanal etkiler, çelik yapıların yanal stabilite problemlerini arttırmakta ve eleman burkulmalarını tetikleyebilmektedir.

Çelik yapıların tasarım ve kullanımındaki sınırlayıcı etkenlerden birisi de yapısal elemanlardaki stabilite sorunları ve burkulma problemleridir. Çeliğin dayanımı yüksek olan bir malzeme olması nedeniyle, çelik yapılardaki eleman kesitleri diğer yapı türlerine (betonarme, ahşap, vs.) göre daha küçüktür. Bu durum, eleman rijitliklerinin azalmasına ve kullanılabilirlik ile stabilite sorunlarına yol açmaktadır. Çelik yapı tasarımında, elemanlara stabilite kazandıracak bağlantıların yapılması en önemli tasarım unsuru haline gelmekte ve yapı tasarımını zorlaştırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, elastik ötesi (inelastik) davranış gösteren çelik kirişlerin stabilite problemlerinden birini teşkil eden yanal buruşmalı burkulma (YBŞB) modu, analitik ve nümerik olarak araştırılmıştır. Geçmişte yapılmış çalışmaların aksine, YBŞB modunun eleman elastik ve inelastik burkulma boyu sınırlarına ve burkulma bölgelerine etkisi incelenmiş ve yönetmeliklerde yer alan sınır uzunluğu formüllerinin, YBŞB moduna göre yeniden düzenlenmesi için gerekli olan analiz sonuçlarına ulaşılmıştır.

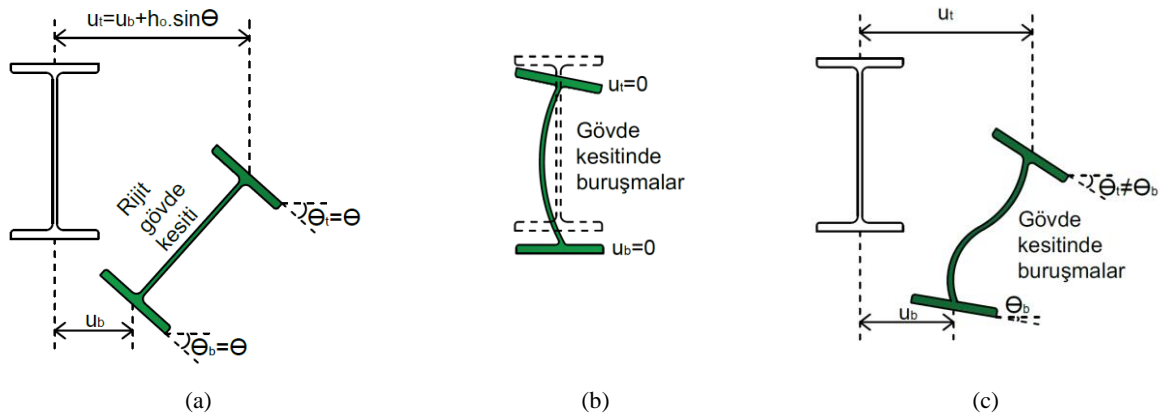
## 2. YANAL BURUŞMALI BURKULMA (YBŞB) (LATERAL DISTORTIONAL BUCKLING (LDB))

Yanal ötelenme ve burulmaya karşı yeterince rijit olmayan kirişler, zayıf eksene göre eğilme ile burulmanın

birleşimi olan yanal burulmalı burkulma (YBLB) modu sonucu göçerler. Bu davranış şeklinde, kritik bir yük değerinin aşılması ile yanal ötelenmeler ve boyuna eksene göre dönme meydana gelir. Kuvvetli eksenine göre eğilmeye maruz kalan bir kirişin çekme ve basınç bölgelerinin farklı yanal burkulma eğilimleri, kiriş boyuna eksenine göre dönmenin (burulma) ortaya çıkmasına neden olur.

Kiriş serbest uzunluğu, başlık ve gövde narinlikleri, çelik kirişlerin maruz kalacağı burkulma modunu belirler. I-enkesitli çelik kirişler, başlık burkulması ve gövde burkulmasını içeren lokal burkulma modları (LB) ile YBLB ve YBŞB modlarını içeren global burkulma modlarına maruz kalabilir. YBLB, lokal burkulma içermeyen salt global yanal burkulma modudur ve bu davranış şeklinde başlık ve gövdede burkulma meydana gelmez. LB ise, genel bir yanal hareket olmadan başlık ve/veya gövde plakasının burkulması şeklinde meydana gelir. YBLB ve LB'nin bir kombinasyonu olan YBŞB, başlık narinliğinin gövde narinliğine oranı azaldıkça belirginleşen, birleşik bir yanal burkulma şeklidir. YBŞB'de, kiriş yanal yönde ötelenir ve burulur, gövde plakası buruşur. Bu nedenle, M. A. Bradford ve Ronagh [1], YBŞB durumunda kesitin burulma rijitliği ve dolayısıyla burkulma momenti kapasitesinin azaldığı sonucuna varmıştır. Şekil 1'de, çift simetri eksenli I-enkesitli çelik bir kirişin burkulma modları verilmiştir.

Literatürde YBLB ve YBŞB üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Ancak, bu çalışmaların hiçbiri YBŞB burkulma modunun, elastik ve inelastik burkulma bölgelerini ayıran sınır değerler üzerindeki etkisi üzerine yoğunlaşmamıştır. M. A. Bradford [2], sonlu eleman analizlerinden elde ettiği yük tahminlerinin, yeniden düzenlenmiş Trahair [3], Southwell [4] ve Massey [5] metodlarına göre hesaplanan yük değerleri ile iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermiştir. N. S. Trahair [6], tek açıklıklı kuvvetli başlıklı I-enkesitli kirişlerde elastik YBŞB davranışının burkulma yüklerini azalttığını tespit etmiştir. M. A. Bradford [7], narin gövdeli ve kuvvetli başlıklı I kirişlerde YBŞB etkisiyle elastik ve inelastik burkulma momentlerinin kayda değer derecede azaldığını göstermiştir. Zirakian ve Showkati [8], gövde derinlikleri arttırılmış I-enkesitli çelik kirişleri açıklık



Şekil 1. Çift simetri eksenli I-enkesitli çelik bir kirişin burkulma modları: (a) YBLB; (b) LB; (c) YBŞB (Buckling modes of a doubly-symmetric steel I beam: (a) LTB, (b) LB, (c) LDB)

ortası tekil yük altında test etmiş ve numunelerin narinliklerini, AISC/LRFD 360 [9] plastik ve elastik narinlik sınırları arasında kalacak şekilde seçmiştir. Açıklık ortası ve çeyrek noktalarındaki gerilme ölçümlerine dayanarak, numunelerin YBŞB ile göçmeye ulaştıkları çıkarımı yapılmıştır. Deneysel burkulma yükleri, AISC/LRFD 360 [9] ve AS4100 [10]'ün önerdiği formüllerden elde edilen analitik değerler ile karşılaştırılmıştır. İki şartnamenin önerdiği formüllerin, inelastik davranış gösteren kirişlerde deneysel değerlerden önemli ölçüde sapan analitik değerler verdikleri belirlenmiştir.

I-enkesitli çelik kirişlerin sonlu eleman analizlerine dayalı olarak, Pi ve Trahair [11][12], gövde levhasının eğilmesinin kirişlerin burulma rijitliklerini azalttığını ve bu azalmanın YBŞB modunu etkilediğini ortaya koymuştur. Kalkan ve Buyukkaragoz [13], çift simetri eksenli I-enkesitli çelik kirişlerin burkulma momentlerinin belirlenmesinde kullanılacak ve gövde buruşmalarının burkulma üzerindeki etkilerini hesaba katan azaltılmış burulma ve çarpılma rijitliği ifadeleri geliştirmiştir. Önerilen analitik ifadelerden elde edilen değerler, nümerik sonuçlarla kıyaslanmış ve daha yakın bir uyuma ulaşılmıştır. Ellobody [14], petek kirişlerde YBŞB modunun kiriş burkulma yükünü önemli derecede azalttığını belirlemiştir. Kalkan ve Buyukkaragoz [13]; M. A. Bradford [7], Pi ve Trahair [12] ve Nethercot ve Trahair [15]'in çalışmalarına dayalı olarak, çift simetri eksenli I en-kesitli çelik profillerin elastik ve inelastik YBŞB momentlerinin hesabında kullanılacak denklemler geliştirmiştir: Eşitlik (1)

$$M_{crd} = \begin{cases} \text{eğer } L_b \leq L_{rd}; \Rightarrow M_p \left[ 0,7 + \frac{0,3 \cdot \left[ 1 - 0,7 \cdot \frac{M_p}{\alpha_m M_{od}} \right]}{0,61 - 0,3 \cdot \beta_m + 0,07 \cdot \beta_m^2} \right] \leq \min(\alpha_m M_{od}, M_p) \\ \text{eğer } L_b > L_{rd}; \Rightarrow \frac{C\pi}{L} \sqrt{EI_y \cdot GJ_e \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot \frac{EI_{we}}{GJ_e} \right]} \end{cases} \quad (1)$$

Kalkan ve Buyukkaragoz [13]  $\alpha_m$ 'nin hesaplanması için eşitlik (2)'nin kullanımını önermiştir:

$$\alpha_m = 1.75 + 1.05\beta_m + 0.3\beta_m^2 \leq 2.56 \quad (2)$$

Eşitlik 1'de yer alan  $M_{od}$  eşitlik (3) yardımıyla belirlenmektedir:

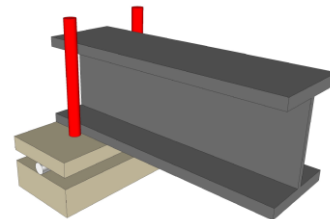
$$M_{od} = \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y \left( GJ_e + \frac{\pi^2 EI_{we}}{L_b} \right)} \quad (3)$$

Bu çalışma kapsamında, teorik burkulma momenti hesapları yapılmamış, elastik ve inelastik burkulma bölgeleri ile plastik davranış bölgelerini birbirlerinden ayıran limit serbest uzunluk değerlerinin hesaplanmasında teorik formüllere başvurulmuştur. Çalışmada kullanılan kesitlerin inelastik yanal burulmalı burkulma sınır uzunlukları ( $L_{r(teorik)}$ ), ülkemizde çelik yapıların tasarımında kullanılan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik [16]'te yer alan eşitlik (4)'e göre teorik olarak hesaplanmıştır:

$$L_r = 1,95i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{JC}{W_{ex}h_o} + \sqrt{\left( \frac{JC}{W_{ex}h_o} \right)^2 + 6,76 \times \left( \frac{0,7F_y}{E} \right)^2}} \quad (4)$$

## 2. SONLU ELEMANLAR MODELİ (FINITE ELEMENT MODEL)

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında Abaqus/CAE [17] yazılımı kullanılmıştır. Farklı gövde narinliklerine sahip (Çizelge 1) 15 adet Amerikan geniş başlıklı I en-kesit (W kesit) modellenmiştir. Kiriş modellerinde, sonlu eleman yazılımının kayıtlı elemanlarından olan ve dört adet düğüm noktası bulunan, dikdörtgen şekilli S4R elemanı kullanılmıştır. Bu eleman, üç boyutta yerel burkulma ve eğilmeyi simule etmek ve 3 boyutlu kabuk model oluşturmak için literatürde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu elemanın isminde yer alan "S" harfi, kabuk elemanı olduğunu; "4" sayısı, 4 dört adet düğüm noktası bulunduğunu; ve "R" harfi, 4 adet düğüm noktasını 1'e düşürerek analizlerin daha hızlı yapılabilmesi için azaltılmış entegrasyona olanak sağladığını ifade etmektedir. Farklı sonlu eleman boyutları için bir dizi analiz gerçekleştirilerek, optimum sonlu eleman boyutu 20 mm olarak belirlenmiştir. Sonlu eleman analizlerinde, S355 sınıfı yapısal çeliğin idealize edilmiş elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu bağlamda, yapısal çeliğin akma sınırına kadar doğrusal elastik davranış gösterdiği, akmadan sonra ise ideal plastik özelliklere sahip olduğu ve hiç pekleşme yapmadığı kabul edilmiştir. Mesnet ve yükleme bölgelerinde kayma gerilme yığılmasının ortaya çıkmasını engellemek için açıklık boyunca üniform moment yüklemesi kullanılmıştır. Bu yükleme düzeni, tekil yük uygulama noktalarında ortaya çıkabilecek başlık ve gövde levhası buruşmalarının da önüne geçmiştir. Modellenen kirişlerin her iki ucunda çatal mesnet olarak da tabir edilen Şekil 2'de verilen mesnet şartları tanımlanmıştır. Bunun için mesnet bölgelerinde elemanın yanal hareketi sınırlandırılmıştır.



Şekil 2. Teorik çatal mesnet (Theoretical fork supports)

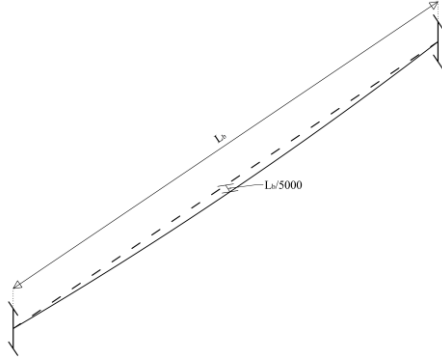
Modellenen kirişlerin elastik olmayan yanal buruşmalı burkulma sınır uzunluklarını belirlemek için elastik olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Bu nedenle, kirişlere başlangıç geometrik önkusuru tanımlanmıştır. Sonlu eleman analizlerinde, eleman modelinin geometrik önkusurlu olarak oluşturulması analiz sonuçlarına büyük oranda etki etmektedir. AISC 360-16 [18] yönetmeliği, kirişler için yapılacak doğrusal olmayan analizlerde,  $L_b/1000$  büyüklüğünde bir merkez (açıklık ortası)



**Çizelge 1** Analiz edilen kesitler (Analyzed cross-sections)

| Kesit Adı | Gövde Narinliği Oranı<br>( $h/t_w$ ) | Başlık Narinliği Oranı<br>( $b_f/2t_f$ ) | Gövde Narinliği Oranı /<br>Başlık Narinliği Oranı | $L_{r,teorik}$<br>(m) | $L_{r,nümerik}$<br>(m) | $L_{r,nümerik}$<br>/<br>$L_{r,teorik}$ |
|-----------|--------------------------------------|--|---|-----------------------|------------------------|--|
| W18x234   | 15,90                                | 2,74                                     | 5,81  | 18,01                 | 20,77                  | 1,15                                   |
| W36x652   | 18,91                                | 2,77                                     | 6,84  | 20,55                 | 24,29                  | 1,18                                   |
| W30x391   | 22,41                                | 3,21                                     | 6,99  | 16,97                 | 20,69                  | 1,22                                   |
| W24x250   | 23,06                                | 3,50                                     | 6,59  | 14,00                 | 17,16                  | 1,23                                   |
| W30x357   | 24,40                                | 3,44                                     | 7,09  | 15,87                 | 19,76                  | 1,25                                   |
| W33x318   | 31,29                                | 4,27                                     | 7,33  | 13,59                 | 17,77                  | 1,31                                   |
| W36x330   | 35,75                                | 4,43                                     | 8,07  | 14,38                 | 19,00                  | 1,32                                   |
| W36x302   | 38,07                                | 4,93                                     | 7,73  | 12,82                 | 17,51                  | 1,37                                   |
| W40x297   | 40,40                                | 4,89                                     | 8,27  | 11,64                 | 16,31                  | 1,40                                   |
| W44x335   | 42,25                                | 4,57                                     | 9,24  | 11,49                 | 16,39                  | 1,43                                   |
| W27x129   | 42,40                                | 4,44                                     | 9,54  | 7,24                  | 10,29                  | 1,42                                   |
| W33x169   | 47,46                                | 4,60                                     | 10,32   | 7,98                  | 11,36                  | 1,42                                   |
| W30x124   | 51,89                                | 5,60                                     | 9,27  | 6,93                  | 9,96                   | 1,44                                   |
| W30x99    | 57,88                                | 7,64                                     | 7,58  | 6,49                  | 9,57                   | 1,47                                   |
| W44x230   | 60,55                                | 6,30                                     | 9,61  | 10,37                 | 15,39                  | 1,48                                   |

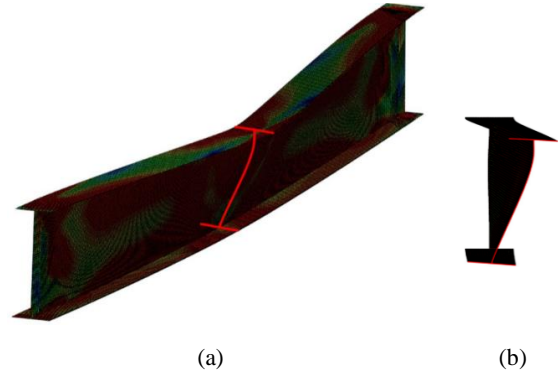
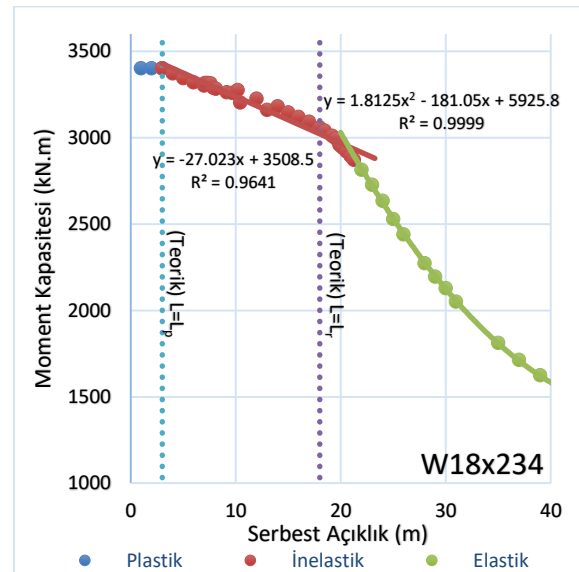
başlangıç yanal deformasyonunun tanımlanmasını öngörmektedir. Mevcut çalışmada ise, geometrik önkusurların analiz sonuçları üzerindeki etkisini asgari seviyeye indirmek için daha küçük bir önkusur ( $L_b/5000$ ) tanımlanmış (Şekil 3) ve statik analiz gerçekleştirilmiştir.

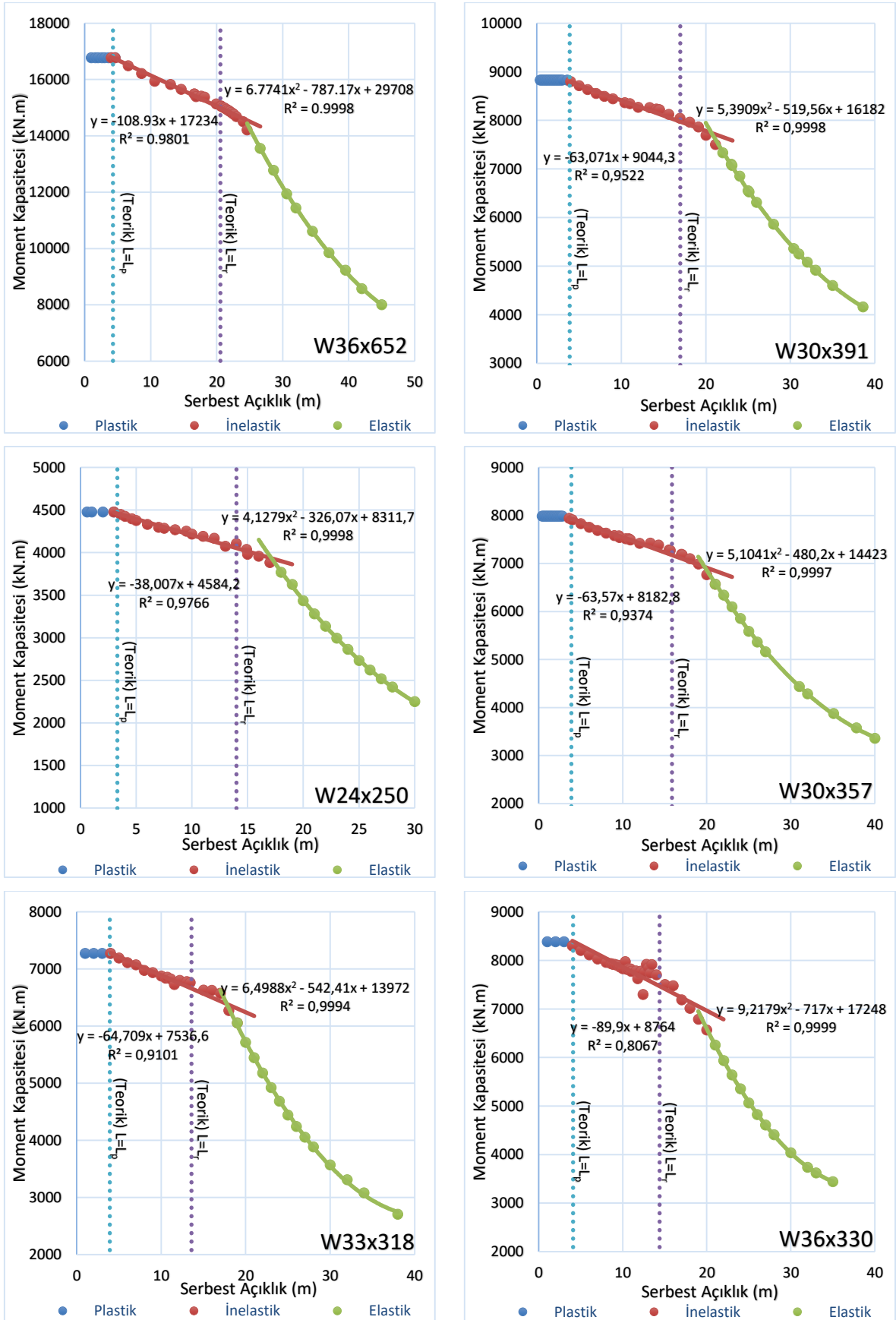
**Şekil 3.** Başlangıç geometrik önkusuru (Initial geometric imperfection)

Kirişler üzerine yapılan statik analizler sonucu, kiriş gövdesinde ortaya çıkan şekil değiştirmeler Şekil 4'te gösterilmiştir. Analizler sonrasında elemanın gövde kesitinin narin olmasından dolayı gövdenin yapısal formunun bozulduğu ve buruşmaların meydana geldiği görülmüştür.

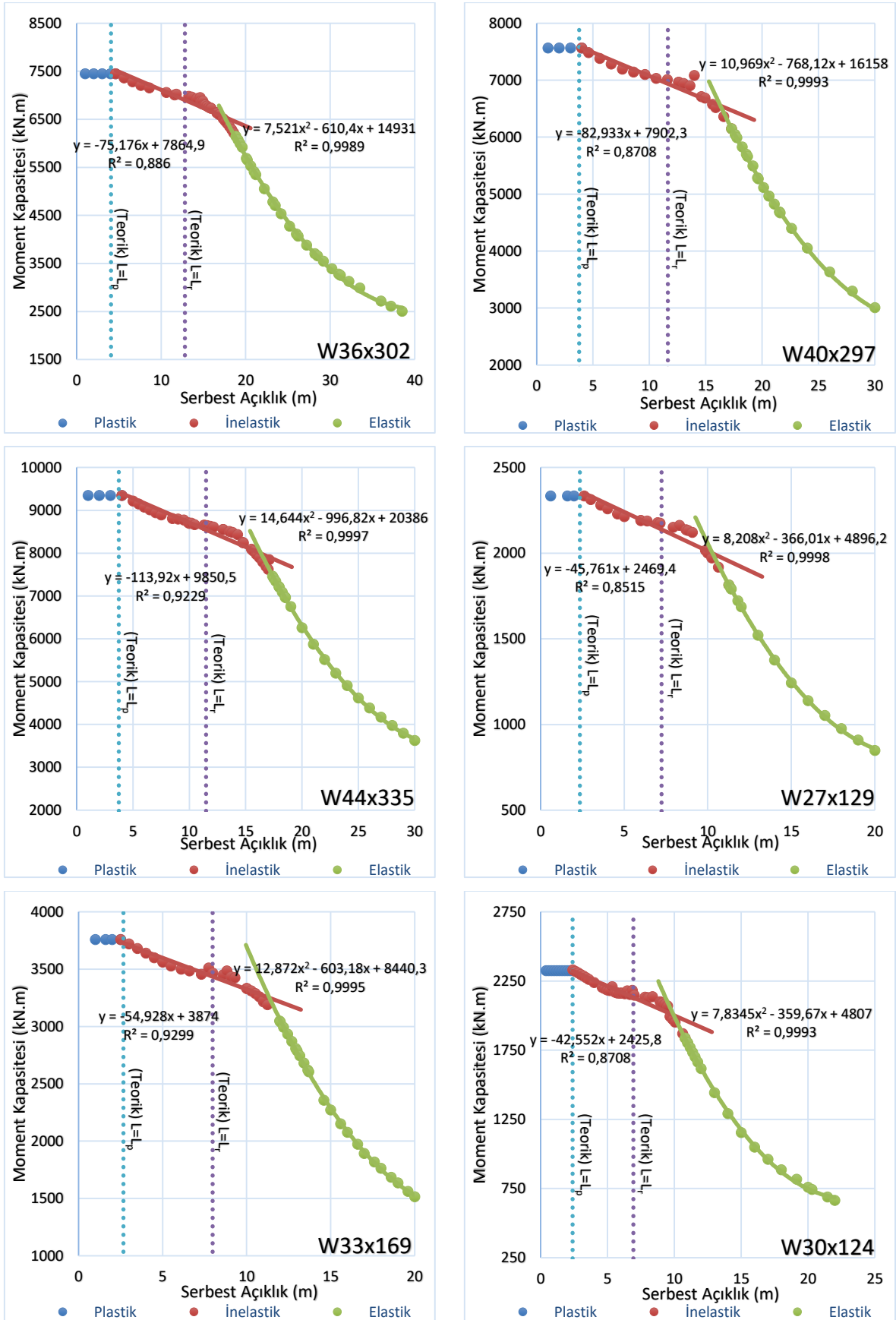
Analiz edilen kesitlerin açıklıklarına göre değişen moment taşıma gücü grafikleri Şekil 5-8'de gösterilmektedir. Bu grafikler, serbest açıklığa göre ortaya çıkan davranış aralıklarının plastik, elastik olmayan (inelastik) burkulma ve elastik burkulma şeklinde sıralandığını açıkça göstermekte ve bu davranış aralıklarını birbirinden ayıran sınır uzunluk değerlerini ortaya koymaktadır. Tüm grafiklerde yönetmelik [18] formüllerinden elde edilen  $L_p$  ve  $L_r$  değerleri de gösterilmiş ve bu sayede gövde buruşmalarının bu sınır değerler üzerindeki etkisinin anlaşılması amaçlanmıştır. Çizelge 1'de verilen değerler, başlık narinliği oranları birbirine yakın değerlerde olduğunda, elastik ve inelastik burkulma bölgelerini ayıran  $L_r$  sınır uzunluğunun, yönetmelik formülünden elde edilen değerden uzaklaştığını göstermektedir. Yani, gövde buruşmaları

arttıkça elastik olmayan burkulma bölgesi genişlemekte ve nümerik  $L_r$  değerinin analitik  $L_r$  değerine oranı artmaktadır.

**Şekil 4.** Nümerik modellerde eleman gövdesinde oluşan buruşmalar: (a) İzometrik; (b) Kesit görünüşü (Web distortions on the numerical models: (a) Isometric; (b) Cross-section)**Şekil 5.** W18x234 kesitinin nümerik moment kapasitesi-serbest açıklık grafikleri (Numerical moment capacity-unbraced length curves of W18x234 section)

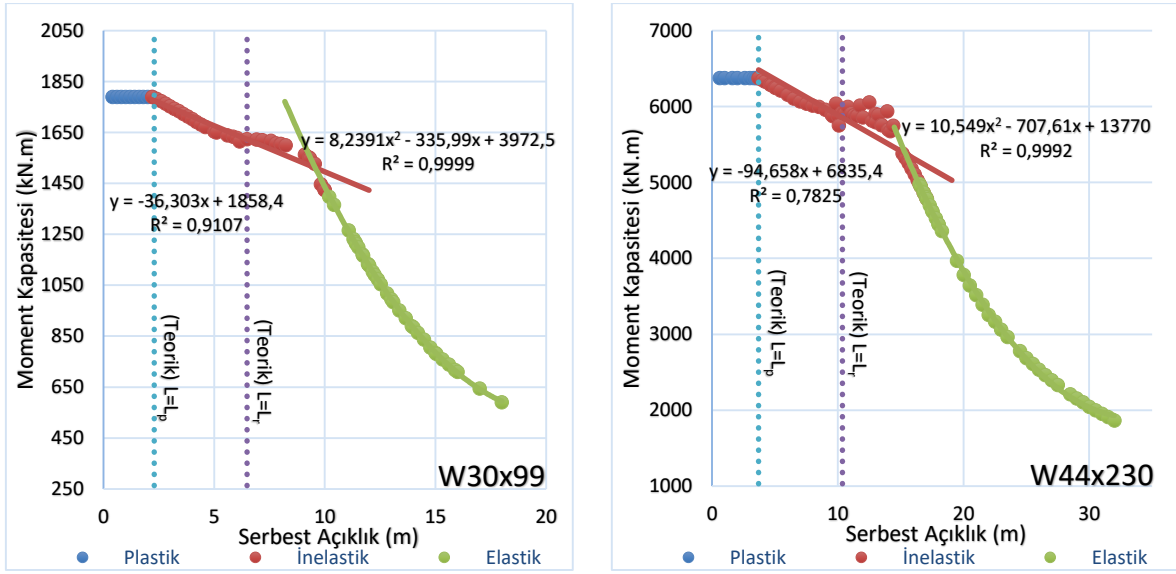


Şekil 6. Analiz edilen kesitlerin nümerik moment kapasitesi-serbest açıklık grafikleri (Numerical moment capacity-unbraced length curves of the analyzed cross sections)



Şekil 7. Analiz edilen kesitlerin nümerik moment kapasitesi- serbest açıklık grafikleri (Numerical moment capacity-unbraced length curves of the analyzed cross sections)





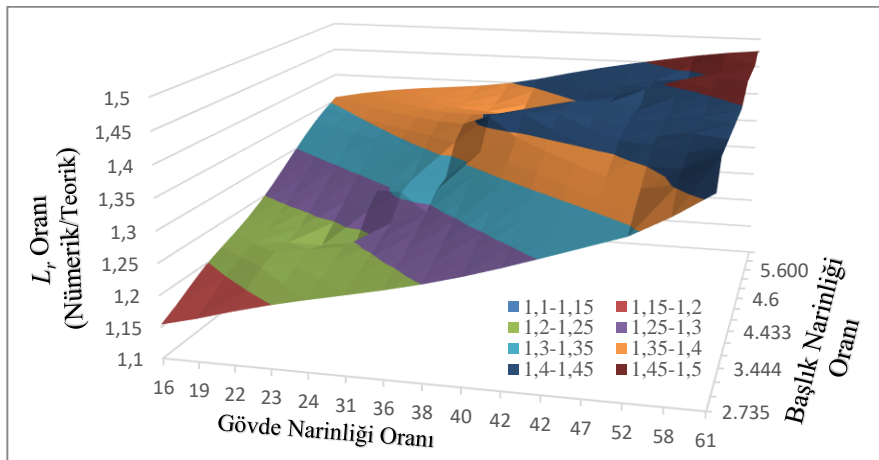
Şekil 8. Analiz edilen kesitlerin nümerik moment kapasitesi- serbest açıklık grafikleri (Numerical moment capacity-unbraced length curves of the analyzed cross sections)

Şekil 9’da verilen 3 boyutlu grafikte kesitlerin  $L_{r,nümerik}/L_{r,teorik}$  oranlarının, gövde narinliği ve başlık kompaktlığına göre değişimi gösterilmiştir.

Şekil 9, gövde narinliği arttıkça kesit gövdesindeki buruşmalardan kaynaklı olarak nümerik  $L_r$  ile teorik  $L_r$  arasındaki farkın açıldığını göstermektedir. Analiz edilen kesitlerin başlık narinliği değerleri genel olarak birbirine yakın seçilmiş ve bu sayede gövde narinliğinin YBŞB üzerindeki etkilerinin daha net ortaya çıkması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında; başlık narinlikleri birbirine yakın olan kesitlerin seçilmiş olması ile başlık narinliği değerlerindeki değişimin analizler ile izlenen sonuçlar üzerindeki etkileri sınırlı tutulmaya çalışılmıştır. Bu nedenle bu çalışma kapsamındaki analiz sonuçları, başlık narinliğinin elastik olmayan burkulma boyu sınırı üzerindeki etkilerini açıkça göstermemektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Çift simetri eksenli geniş başlıklı I-kenesitli çelik kirişlerin yanal buruşmalı burkulma (YBŞB) davranışlarının araştırıldığı bu çalışma kapsamında, nümerik ve analitik elastik-inelastik burkulma sınır uzunluk değerleri karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2016) [16]’te yer alan inelastik burkulma sınır uzunluk ( $L_r$ ) formülünden elde edilen analitik değerlerin, YBŞB etkisindeki kirişlerin nümerik analizlerinden elde edilen ilgili değerlerden düşük olduğu gösterilmiştir. Bu durum, yönetmelikte önerilen  $L_r$  formülünün kesit gövdesinde meydana gelen buruşma etkilerini gözardı etmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, yapılan bir dizi sonlu eleman analizi ile kesitlerin gövde narinlikleri arttıkça, nümerik  $L_r$  uzunluklarının



Şekil 9. Analiz edilen tüm kesitlerde  $L_{r,nümerik}/L_{r,teorik}$  oranlarının gövde narinliği ve başlık kompaktlığına göre değişimi (The variations of  $L_{r,nümerik}/L_{r,teorik}$  ratios of all analyzed sections according to web slenderness and flange compactness)

analitik  $L_r$  uzunluklarına oranının da arttığı görülmüştür. Çalışma kapsamında analiz edilen kiriş kesitlerinin başlık narinlik oranları birbirlerine yakın olduğu için, başlık narinliği ile YBŞB momenti arasındaki ilişki yeterli netlikte ortaya konamamıştır.

Türkiye’de büyük deprem oluşturma potansiyeline sahip Kuzey Anadolu Fayı, yanal atımlı bir faydır. Bu tür bir fayın üreteceği deprem, yapı elemanlarında önemli yanal kuvvetler meydana getirecektir. Bu tür depremler, yapısal çelik kirişlerin gövde buruşma risklerini de arttıracığı için kirişlerde YBŞB modunu tetikleyebilecektir. Özellikle, deprem esnasında meydana gelecek ilave etkiler, gövde plakasının buruşması ve akmasına neden olabilecek ve inelastik burkulma bölgesinde yer alan kirişlerin yanal burulmalı burkulma (YBLB) modu yerine YBŞB moduna maruz kalmasına neden olabilecektir.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler

#### SİMGE VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

|            |   |
|------------|---|
| $EI_y$     | Yanal eğilme rijitliği  |
| $EI_{we}$  | Efektif (azaltılmış) çarpılma rijitliği   |
| $GJe$      | Efektif (azaltılmış) burulma rijitliği  |
| $h_o$      | I-enkesitte başlık ağırlık merkezleri arasındaki mesafe   |
| $L_b$      | Kirişin serbest uzunluğu  |
| $L_r$      | İnelastik yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğu   |
| $L_{rd}$   | İnelastik yanal buruşmalı burkulma sınır durumu için yanal yönde desteklenmemiş uzunluk sınırı                                  |
| $M_p$      | Plastik moment  |
| $M_{od}$   | Yanal yönde desteklenmemiş açıklık boyunca düzgün yayılı eğilme momenti durumundaki referans elastik buruşmalı burkulma momenti |
| $u_b$      | Alt başlık ötelenmesi   |
| $u_t$      | Üst başlık ötelenmesi   |
| $W_{ex}$   | x-eksenine göre elastik mukavemet momenti   |
| $\alpha_m$ | Serbest açıklık boyunca üniform olmayan moment dağılımı için hesaplanan moment düzeltme katsayısı                               |
| $\beta_m$  | Desteklenmemiş açıklığın uç momentleri oranı  |
| $\theta$   | Dönme açısı   |
| $\theta_b$ | Alt başlık dönme açısı  |
| $\theta_t$ | Üst başlık dönme açısı  |

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bradford M. A. and Ronagh H. R., “Generalized elastic buckling of restrained I-beams by FEM,” *Journal of Structural Engineering (J. Struct. Eng.)* 123:1631-1637., (1997).

- [2] Bradford M. A., “Inelastic distortional buckling of I-beams,” *Computers & Structures (Comput. Struct.)*, Volume 24, Issue 6: 923-933 (1986).
- [3] Trahair N., “Deformations of Geometrically Imperfect Beams,” *Journal of the Structural Division (J. Struct. Div.)* Vol. 95, Issue 7:1475-1496, (1969).
- [4] Southwell R. V., “On the Analysis of Experimental Observations in Problems of Elastic Stability,” *Proceedings of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.)* Volume 135, Issue 828:601-616, (1932).
- [5] Massey C., “Elastic and inelastic lateral instability of I-beams,” *The Engineer*, 216:672-4., (1963).
- [6] Trahair N. S., “Lateral-distortional buckling of monorails,” *Engineering structures (Eng. Struct.)*, vol. 31, no. 12, pp. 2873-2879, Dec. (2009).
- [7] Bradford M. A., “Lateral-Distortional buckling of steel I-Section members,” *Journal of Constructional Steel Research (J. Constr. Steel Res.)* Volume 23, Issues 1-3:97-116, (1992).
- [8] Zirakian T. and Showkati H., “Experiments on distortional buckling of I-beams,” *Journal of Structural Engineering (J. Struct. Eng.)* 133:1009-1017, (2007).
- [9] ANSI/AISC 360-10, "American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-10. Specification for Structural Steel Buildings," (2010).
- [10] AS4100, "Standards Association of Australia, AS 4100 steel structures." (1998).
- [11] Pi Y. L. and Trahair N. S., “Distortion and warping at beam supports,” *Center for Advanced Structural Engineering Research Report No. R790. Sydney, Australia: University of Sydney;* (1999).
- [12] Pi Y. L. and Trahair N. S., “Distortion and warping at beam supports,” *Journal of Structural Engineering (J. Struct. Eng.)* 126:1279-1287 New York, N.Y., (2000).
- [13] Kalkan I. and Buyukkaragoz A., “A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams,” *Journal of Constructional Steel Research (J. Constr. Steel Res.)*, vol. 70, pp. 289-297, Mar. (2012).
- [14] Ellobody E., “Interaction of buckling modes in castellated steel beams,” *Journal of Constructional Steel Research (J. Constr. Steel Res.)*, vol. 67, no. 5, pp. 814-825, May (2011).
- [15] Nethercot D. A. and Trahair N. S., “Inelastic lateral buckling of determinate beams,” *Journal of the Structural Division (ASCE J Struct Div.)*, 102(ST4):701-17. (1976).
- [16] “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” (2016).
- [17] Simulia 3DS, “Abaqus Analysis User’s Manual (version 6.12),” *University of Cambridge - Faculty of Mathematics*, (2015).
- [18] ANSI/AISC 360-16, "American Institute of Steel Construction, ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings", (2016).