



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Çelik Çapraz Elemanların Elastik Ötesi Burkulma Davranışlarının Modelleme Yaklaşımları ile İncelenmesi

A. Hakan POLAT<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Mimarlık Bölümü, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: hakanpolat@duzce.edu.tr

### ÖZET

Çelik taşıyıcı yapısal sistemlerinin yatay yükler altında enerji tüketmesi ve bu yükler altında elastik ötesi davranışları; sisteme bağlanan çelik çapraz elemanların kesit geometrisine, eleman boyuna, çerçeve gözü içerisindeki bağlantı düzenine bağlı olarak değişebilmektedir. Yatay yük taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranışını sistemin çelik çapraz elemanlarının elastik ötesi davranışından bağımsız düşünmek mümkün değildir. Bu nedenle çelik çapraz elemanların elastik ötesi davranışlarının bilinmesi ayrı bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, çelik çapraz elemanların elastik ötesi davranışlarının güvenilir ve gerçekçi olarak modellenebilmesi için çelik çapraz elemanlar; çerçeve sistemden izole edilmiş basınç elemanı ve çerçeveye merkezi bağlı çapraz perde elemanı olarak incelenmiştir. Çalışmada çapraz elemanlar kesit geometrisi hücre elemanlara bölünerek, yayılı plastisite teorisi ve kuvvet tabanlı çerçeve elemanı yaklaşımı ile modellenmiştir. Çapraz elemanın çerçeve elemanı ile olan bağı üç farklı duruma göre değerlendirilmiş olup bunlar; bağ plakasının çapraz uçlarında elastik ötesi davranış gösteren eleman, plakanın düzlem dışına dönebilen mafsal eleman ve bağ plakasının çapraz uçlarında modellenmediği kabulleridir. Modellemelerin sonuçları, tekil basınç elemanının statik itme ve çevrimsel yükleme altındaki ve ters "V" merkezi çaprazlı çerçeve sistemin tek modlu itme yükü altındaki değerleri göz önüne alınarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik çapraz, merkezi ters v çaprazlı çerçeve, elastik ötesi davranış, yayılı plastisite, basınç elemanı, burkulma,

## An Investigation of Steel Braces Members Inelastic Buckling Behavior with Different Modeling Approach

### ABSTRACT

Energy dissipation of steel structural systems under horizontal loads and their inelastic behavior under these loads may change depending on sectional geometry of steel diagonal members connected to the system, the size of the element, and the connection scheme in the frame eye. It is not possible to separate the inelastic behavior of the horizontal load-carrying system from the inelastic behavior of the steel diagonal members of the system. Therefore, it is of great importance to know the inelastic behaviors of steel diagonal elements. In this study, the frame was considered as pressure element isolated from the system and diagonal screen element center connected to the

frame in order to model the inelastic behavior of steel diagonal elements in a reliable way. In the study, sectional geometry of diagonal elements were modelled by dividing in cell elements with the use of spread plasticity theory and force-based frame element approach. The connection of diagonal element with the frame element was based on those there conditions: the element with ultra-elastic behavior at the diagonal ends of bond plate, the joint element that can be rotated out of the plate, and the bond plate not modelled at the diagonal ends. The results of modeling are based on the singular compression member's under static pushover and cyclicloading loading with inverted "V" braced steel frame's first mode pushover loading.

**Keywords:** *Steel brace, concentric inverted V barced frame, inelastic behavior, spread plastcity, compression member, buckling*

## I. GİRİŞ

Çelik taşıyıcı sistemlerin yatay yük taşıma kapasiteleri ve performansları; çerçeve gözü içerisinde düzenlenmiş olan merkezi veya dışmerkez (eksantrik) bağlı çapraz elemanların çevrimli yükler veya tek yönlü itme yükü altındaki davranışı ile doğrudan ilintilidir. Çapraz elemanların çevrimli yükler altında davranışı; elamanın çekme yükü altında akma gerilmesine ulaşması, basınç yükü altında burkulması ve burkulma sonrası davranışı olarak tanımlanabilir. Bu davranışın gerçekçi olarak modellenmesi elemanın elastik ve özellikle elastik ötesi davranışı ile sistemin kapasite ve performansının belirlenmesinde etkilidir. Yatay yükler altında çerçevenin giriş ve kolon elemanlarının elastik davranış bölgesi içerisinde kalması veya sınırlı elastik ötesi davranış gösterirken, çapraz bağ elemanların yerel burkulma yükleri altında burkulmaları ve çapraz elemanların bağ plakalarında da sınırlı seviyede elastik ötesi deformasyona izin verilmesi bir performans seviyesi olarak kabul edilebilir. Diğer taraftan mevcut yönetmeliklere uygun bir performans seviyesini belirleyebilmek için, çelik taşıyıcı sistemin elastik ötesi davranışını matematiksel model olarak modelleyip, lineer sınır dışındaki davranışını belirlemek oldukça zor ve karmaşıktır.

Çelik çapraz çerçevelerin tersinir yükler altındaki histeresis davranışı sayısız deneysel ve analitik birçok çalışmaya konu olmuştur. Black vd.(1980), Gugerli ve Goel (1980), Lee ve Goel (1987), Liu ve Goel (1988), Sherman ve Erzurumlu (1976), Wakabayashi vd. (1997); Jain vd. (1978), Zayas vd. (1980), Astaneh-Asl ve Goel (1984), Boutros (1999), Elchalakani vd.(2003) Shaback ve Brown (2003), Goggins vd.(2006). Tüm bu çalışmalarda, beton dolgulu tüp kesitlerde dâhil olmak üzere çeşitli tiplerde en kesitler kullanılmıştır. Çalışmalar narinliğin tüm burkulma üzerine olan etkisini, genişlik-kalınlık oranının yerel burkulma üzerine olan etkisi ile beraber uç mesnetlenme tipinin ve düşük çevrimsel yüklemdeki yorulmanın çapraz davranışına olan etkisini açıklamışlardır [1,2].

Çelik çapraz elemanların elastik ötesi davranışlarının modellenmesi için literatürde üç farklı modelleme yaklaşımı tanımlanmıştır [3].

Bu yaklaşımlardan birincisi Phenomenological Model (PM) dir. Bu yaklaşımda çapraz eleman bir kafes giriş elemanı olarak düşünülüp, matematiksel veya histeresis olarak daha önceden tanımlanmış eksenel yük-eksenel deformasyon ilişkisine uygun olarak davrandığı esasına dayanır.

İkinci yaklaşım ise Physical Theory Model (PTM) dir. Bu yaklaşımda modelleme parametreleri; malzemenin akma dayanımı, en kesit alanı, atalet momenti, plastik mukavemet momenti gibi malzeme ve kesitin mühendislik özellikleri üzerine dayandırılır. Modelleme genellikle çapraz eleman ortasındaki plastik dönme mafsalına bağlı olarak elastik davranan iki elastik giriş elemandan şeklinde oluşmaktadır. Üçüncü yaklaşım ise Finite Element Model (FEM) dir. Bu modelleme yaklaşımında ise çapraz eleman boyuna yönde birden fazla elemana bölünürken en kesit ise kesit alanını oluşturan birçok elemana bölüp, çapraz eleman malzemesinin elasto-plastik davranış özelliği göz önüne alınarak yayılı plastisite teorisi kullanılarak modellenir [4].

Phenomenological model (PM); hesaplama süresi bakımından kısa ve etkin olmasına karşın, modellemeye ait nümerik katsayılar içermesi sebebi ile yeteri kadar test datası, histeresis eğrisi kuralı olan çapraz tip ve kesitlerinde uygulanabilir [4]. Finite Element Model (FEM) çapraz elemanın çevrimli yükler altındaki aksel yük-deformasyon davranışını daha gerçekçi modellemesine karşılık, hesaplama süresi bakımından daha uzun, daha zahmetli ve daha pahalıdır [2]. Physical Theory Model (PTM) ise Finite Element Metoduna göre oldukça kolay olmakla beraber Finite Element Metodunun içerdiği gerçekçilik ile Phenomenological modelin hesaplama basitliğini birleştiren bir metottur [4].

Bu çalışmada çerçeveden bağımsız boru kesitli çapraz elemanın üç farklı modelleme yaklaşımı ile burkulma yükleri ve burkulma sonrası davranışları ile çerçeve gözü içerisinde ters V merkezi bağlı boru kesitli çelik çaprazlı çerçevenin itme (pushover) yükü altındaki davranışları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların çözümlerinde esas itibarı ile Finite Element Model (FEM) metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalara esas teşkil eden modelleme yaklaşımları; çapraz uçlarındaki bağ plakasının elasto-plastik eleman olarak modellendiği Uriz-Mahin (2008) modeli, Hsiao ve diğerleri (2012) tarafından önerilen bağ plakasının düzlem dışı dönme mafsalı olarak tanımlandığı ve çapraz uçlarında bağ plakasını dikkate almadan Physical Theory Model (PTM) ile çapraz eleman kesitinin mukavemet özelliklerine dayalı dönme mafsalı tanımlanması olarak tanımlandığı üç farklı model yaklaşımıdır.

Araştırma çalışmanın ilk bölümünde çelik çapraz eleman çerçeve gözü içerisinde izole edilerek tek başına ele alınmıştır. Finite Element Model (FEM) metodu ile çapraz elemanın mesnet şartları, elemanın bölünme sayısı, eleman boyunca integrasyon noktası sayısı, kesit alanının bölünme sayısı ve modellemede eleman uçlarında bağ plakasının modellenip modellenmemesi durumlarında statik itme yükü ve çevrimli yükleme altında bu değişkenlerin elemanın burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışına diğer bir deyimle elastik ve elasto-plastik davranışlarına nasıl etki ettiği araştırılmıştır.

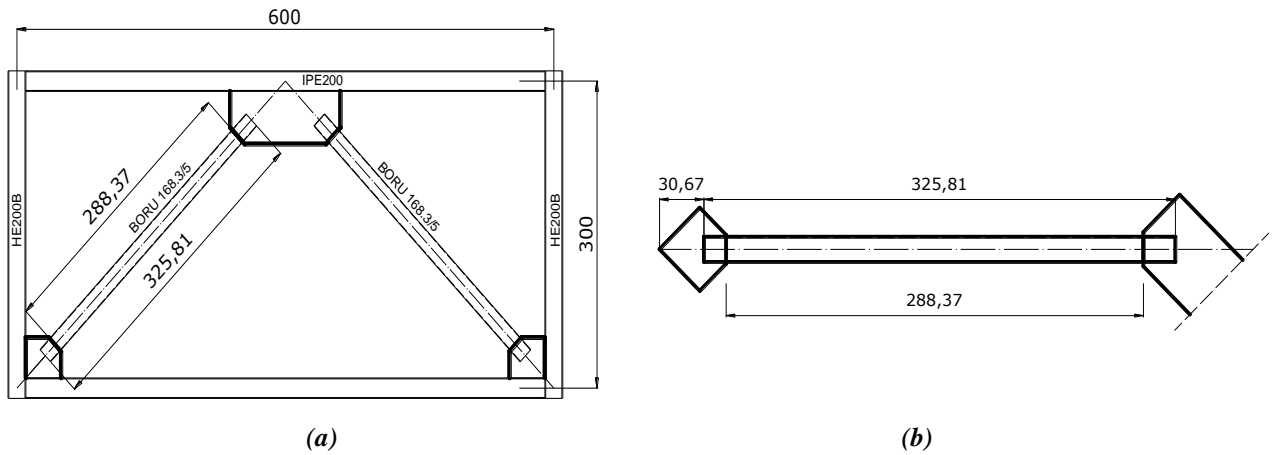
Physical Theory Model (PTM) metodu ile çapraz elemanın uçlarındaki bağ plakasının olmaması halinde çapraz eleman üzerinde üç farklı biçimde tanımlanan dönme mafsalı ile elemanın statik itme yükü altındaki davranışları elemanın elsto-plastik malzeme tanımlamaları için yapılarak, bağ plakasının dikkate alındığı Uriz-Mahin (2008) ve Hsiao vd. (2012) modelleri ile karşılaştırılmıştır.

Araştırma çalışmasının ikinci bölümünde tek açıklıklı ters V merkezi çaprazlı çelik çerçeve ele alınarak, çapraz bağlantı elemanların Uriz-Mahin (2008), Hsiao vd. (2012) ve Physical Theory Model (PTM) modelleme yaklaşımları ile modellenmesi halinde kapasite eğrilerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Modellemelerin analizleri Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) programı ile yapılmıştır [5].

## II. ARAŞTIRMA MODELİ VE MODELLEME KABULLERİ

### A. ANALİZLERDE KULLANILAN MERKEZİ TERS V ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVE MODEL

Araştırmanın materyalini teşkil eden ters V merkezi çelik çaprazlı çerçeve sistem şekil (1) de gösterilmiştir. Çerçeve sistemin boyutları yatayda L=600 cm düşeyde H=300 cm olup sistemin L/H oranı 2.0 olarak belirlenmiştir. Çerçeve sistemin kolonları HE200B, kirişi IPE200 ve çapraz elemanları; çap D=168.3mm kalınlık t=5mm borudan oluşmaktadır. Çerçeve sistem elemanları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) [6] Bölüm 4 hükümlerine göre tasarlanmış olup kolon kiriş birleşim bölgesinin moment aktaracak şekilde bağlı olduğu kabul edilmiştir. Sistem elemanlarının elastisite modülü  $E=210000\text{N/mm}^2$ , akma dayanımı  $\sigma_a=235\text{N/mm}^2$  dir.



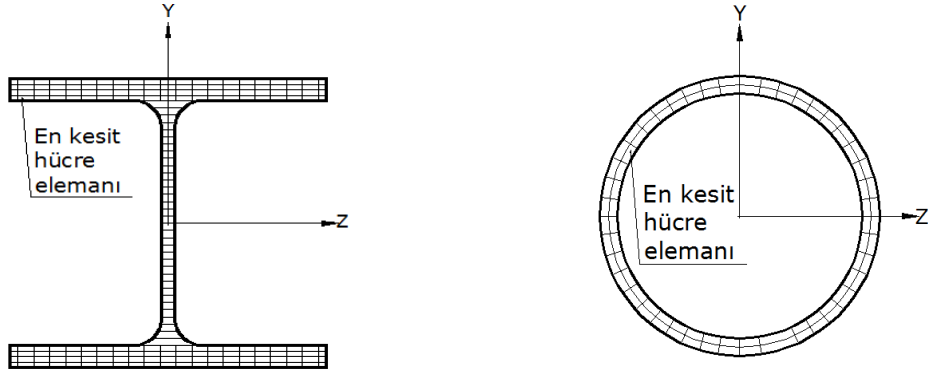
Şekil 1. (a) İki boyutlu ters V merkezi çaprazlı model çelik çerçeve (b) Boru çapraz eleman ve ölçüleri. (cm)

### B. GENEL MODELLEME KABULLERİ

Araştırmanın materyali üzerine uygulanan modelleme metotları ve yapılan kabuller aşağıda özetlenmiştir. Çalışmada uygulanan nümerik modeller Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Modellemede elemanların elasto-plastik davranışları kuvvet tabanlı ve eleman boyunca olan yayılı plastisite kabulüne göre modellenmiştir.[7] Bu modelleme için yazılımın nonlinearBeamColumn eleman tanımlama özelliğinden faydalanılmıştır. Kesitin gerçekçi davranışını modelleyebilmek için; eleman en kesitleri tarafsız eksenlerine paralel doğrultuda bölünerek birden fazla en kesit elemanı oluşturulmuştur Şekil (2). Kesitte oluşturulan her bir hücre elemanın malzeme davranışı çeliğin tek eksenli gerilme-deformasyon davranışı ile uyumlu olacak şekilde Menegotto-Pinto (MP) histeresis modeli ile tanımlanmıştır [8]. Yazılımın uniaxialMaterial Steel02 malzeme tanımlama özelliğinden faydalanılarak malzeme için kullanılan değerler tablo 1'de verilmiştir.

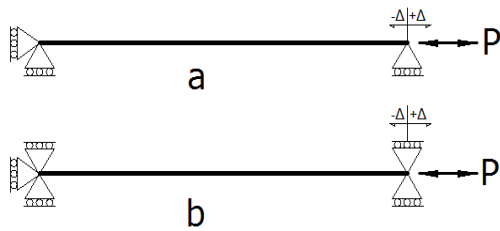
Tablo 1. Çelik malzeme için Menegotto-pinto histeresis model parametreleri

Çelik Model	b	R <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> =A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> =A <sub>4</sub>
MP model değeri	0.005	20.00	0.925	0.15	0.0005	0.01

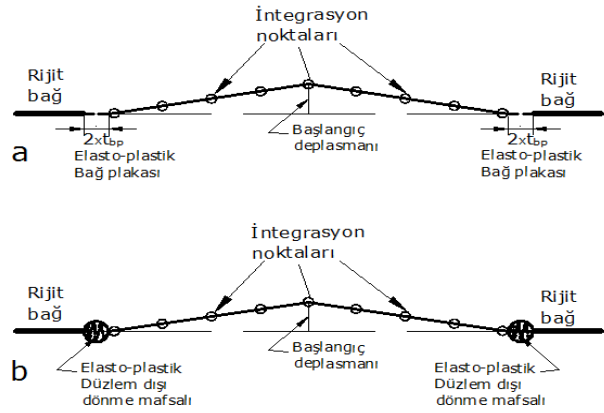


Şekil 2. Çerçeve elemanları için tipik en kesit hücre elemanı bölünmesi.

Çerçeve sistemin  $D=168.3$  mm  $t=5.0$  mm boru çapraz elemanları tek başına ele alınarak, statik itme ve çevrimli yükler altındaki davranışı; çapraz eleman uçlarında bağ plakasının modellenmemesi, bağ plakasının elasto plastik davranan düzlem elamanı olması ve bağ plakasının düzlem dışı elasto-plastik dönme mafsalı olarak modelleme yaklaşımları için; mesnet şartları, eleman sayısı, integrasyon noktası sayısı gibi modelleme değişkenleri de değiştirilerek ayrı ayrı incelenmiştir şekil (3,4). Çapraz elemanın uçlarında bağ plakasını düzlem elasto-plastik elamanı olarak modellenmesi Uriz-Mahin (2008) [9] tarafından önerilen bir modelleme yaklaşımı iken, bağ plakasının düzlem dışı dönebilen elasto-plastik dönme mafsalı olarak modellenmesi ise Hsiao vd. [10] tarafından önerilen diğer bir modelleme yaklaşımıdır. Çapraz elemanlar yayılı plastisite teorisine göre elasto-plastik davrandıkları kabulü her iki yaklaşımda da Finite Element Model (FEM) metodu kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3. Çapraz elemanın yükleme ve mesnet şartları a) her iki uç dönmeye serbest (mafsallı) b) her iki uç dönmeye tutulu. (ankastre)



Şekil 4. Bağ plakasının Çapraz elemanın ucunda modellenme yaklaşımları a) Düzlem elasto-plastik eleman, b) Düzlem dışı dönebilen elasto-plastik dönme mafsalı..

Çerçeve sistemin modellenmesinde ise; kolon, kiriş ve çapraz elemanların yayılı plastisite teorisine göre elasto-plastik davranan çerçeve elamanı olarak davrandıkları kabul edilmiştir. Çapraz elemanların uçlarında; eleman kesit alanının ve atalet momentinin on katı kadar elastik davranan rijit bölge elemanları tanımlanmıştır. Benzer şekilde bağ plakası-kolon ve bağ plakası-kiriş kaynaklanma bölgesinde de kolon ve kiriş elemanların en kesit alanlarının ve atalet momentlerinin on katı kadar elastik davranan rijit bölge elemanları tanımlanmıştır. Bağ plakasının elasto-plastik düzlem dışı dönme mafsalı olarak modellenmesinde, çapraz ucundan plaka kalınlığının iki katı kadar mesafe göz önüne alınmıştır şekil (5) .

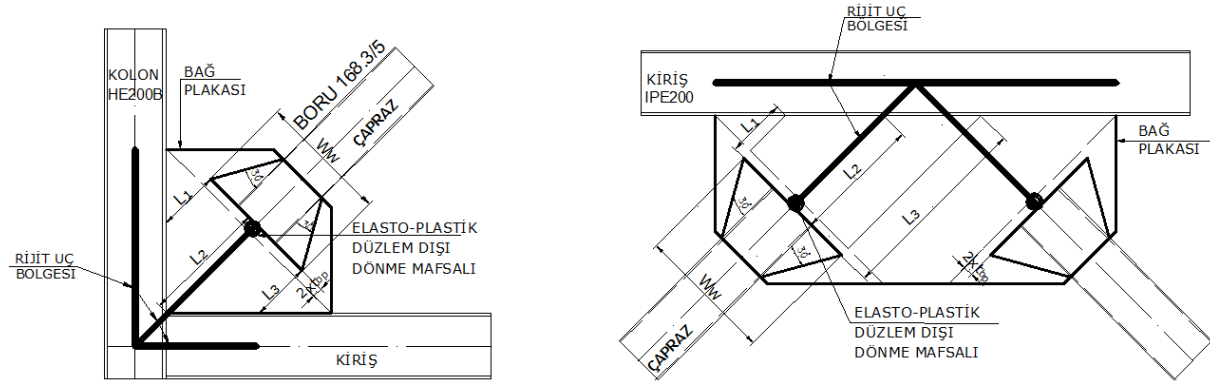
Bağ plakasının düzlem dışı dönme mafsali olarak tanımlanmasında etki eden önemli parametreler Withmore genişliği ( $W_w$ ), ortalama yüksekliği ( $L_{av}$ ) ve kalınlığı ( $t$ ) olup, dönme mafsalinın rijitliği ve akma momenti formül 1 ve formül 2 de tanımlı değerlere göre belirlenmiştir. [10]

$$K = \frac{E}{L_{av}} \left( \frac{W_w t^3}{12} \right) \quad (1)$$

$$M_y = \left( \frac{W_w t^2}{6} \right) \sigma_a \quad (2)$$

Formül 1 ve 2 de kullanılan değerler aşağıdaki gibidir.

E	: Elastisite modülü	210000 N/mm <sup>2</sup>
$L_{av}$	: Bağ plakasının ortalama yüksekliği $(L_1+L_2+L_3)/3$	195.2 mm / 395.0 mm
$W_w$	: Withmore genişliği	341.5 mm/ 423.4 mm
t	: Bağ plakası kalınlığı	15 mm
$\sigma_a$	: Bağ plakası akma dayanımı	235 N/mm <sup>2</sup>



**Şekil 5.** Analizlerde kullanılan çapraz eleman-kolon ve çapraz eleman-kiriş bağı detayı.[10].

### III. BORU KESİTLİ ÇAPRAZ ELEMANIN BURKULMA ANALİZİ

Çapraz elemanların burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışını Finite Element Model (FEM) ile modellemede en önemli parametre; çapraz orta noktasında başlangıç deplasman değerini gerçekçi olarak belirlemektir. Physical Theory Model (PTM) yaklaşımında çapraz orta noktasında başlangıç deplasman değeri için geliştirilen bazı yaklaşımlar aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır. Çapraz elemanın orta noktasındaki başlangıç deplasmanı; başlangıç bir sinüzoidal burkulma eğrisi ve bu noktada elemanın en dış kesitindeki lifi akma dayanımına ulaştırılan aksel burkulma yükü  $N_b$  ve eğilme momenti  $M(N_b)$  ikilisine bağlı olarak elde edilir [11]. Yukarıdaki yaklaşıma uygun olarak Georgescu (1996) aşağıdaki 3 numaralı formülü önermiştir [12].

$$\Delta_0 = \left( \frac{1}{\chi} - 1 \right) \cdot \left( 1 - \frac{\chi \cdot f_y}{\sigma_E} \right) \frac{W}{A} \quad (3)$$

$\chi$  burkulma yükü azaltma katsayısı  $\sigma_E$  Euler burkulma yükü gerilmesini ifade etmektedir.

Dicleli ve Mehta (2007); aksenal yük etkisinin meydana getirdiği ikinci mertbe momentin çapraz elemanın orta noktasındaki denge koşulunu ve lineer değişen deplasman eğrisi kabulüne göre çapraz orta noktasındaki eksantrisite için aşağıdaki 4 numaralı formülü önermişlerdir [13].

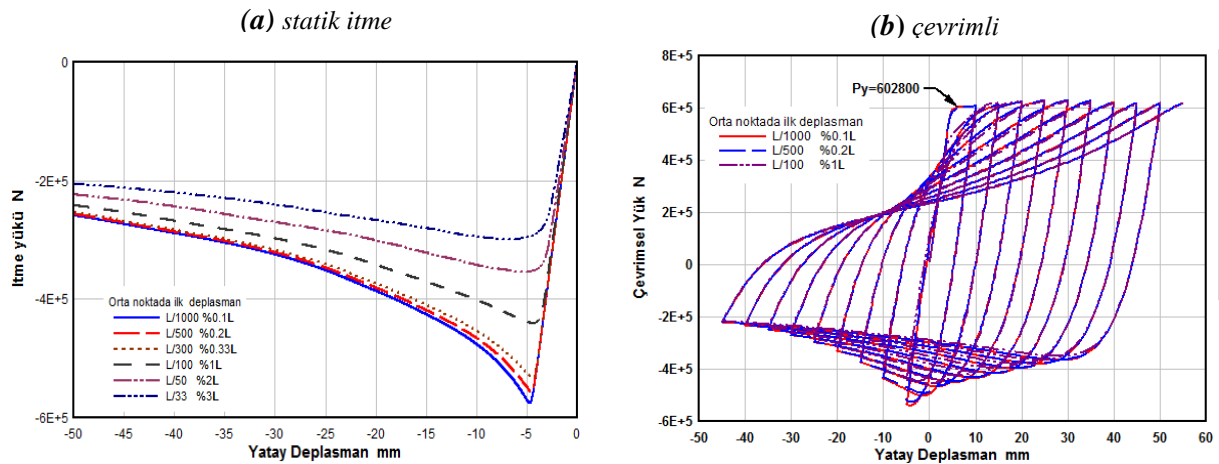
$$e = \frac{M_{pb}}{P_b} \left( 1 - \frac{P_b L^2}{12EI} \right) \quad (4)$$

Dicleli ve Çalık (2008); başlangıçta burkulma eğrisinin sinüzoidal olduğunu kabul ederek, ikinci mertbe etkisini ve çapraz eleman orta noktasındaki denge şartına bağlı olarak aşağıdaki 5 numaralı formülü önermişlerdir [14].

$$e = \frac{M_{pb}}{P_b \left( 1 - \frac{P_b L^2}{8EI \left( 1 + \frac{P_b L^2}{\pi^2 EI} \right)} \right)} \quad (5)$$

Çalışmada yukarıda verilen çapraz orta noktasındaki başlangıç deplasmanı değerleri formülleri yerine çapraz eleman boyunun belirlenen farklı oranları kullanılarak burkulma yükündeki değişim gözlemlenmiştir. Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE-2016) [15] tarafından önerilen burkulma eğrisi yaklaşımı kullanılarak hesaplanan burkulma yükü ile modelleme sonucunda bulunan burkulma yükleri karşılaştırılarak modelleme için uygun ilk deplasman değeri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu bölümde çerçeve sistemin elemanı olan boru çapraz elemanı Finite Element Model (FEM) metodu ve yayılı elasto-plastisite teorisi ile eleman uçlarında bağ plakası olmaması, bağ plakasının düzlem elasto-plastik davranan eleman ve elasto-plastik düzlem dışı dönme mafsalı olması durumları için burkulma analizleri statik itme ve çevrimli yüklemeler altında ayrı ayrı yapılarak analiz sonuçları elde edilmiştir.



**Şekil 6.** Çapraz elemanın her iki ucu dönmeye tutulu olması halinde orta noktası başlangıç deplasmanının burkulma yüküne etkisi.

Şekil 6 (a)'da de boru çapraz elemanın uçlarında bağ plakası olmaması ve çapraz uçlarının dönmeye tutulu olması durumunda statik itme yükü altındaki davranışı gösterilmiştir. Çapraz eleman; 2 alt eleman, 100 en kesit hücre elemanı ve 3 integrasyon noktası olarak Finite Element Model (FEM) ile

çözümlemiştir. Çapraz orta noktasındaki başlangıç deplasmanı çapraz boyunun L/1000, L/500, L/300, L/100, L/50 ve L/33 ü kadar değişen değerlerde alınmıştır. Başlangıç deplasman değerlerine ait burkulma yükleri sırası ile 576000N, 556578N, 532550N, 440473N, 354877N ve 299487N olarak bulunmuştur. Analitik değerler ve şekil 6 (a) incelendiğinde L/1000, L/500 ve L/300 ilk deplasman değerleri için burkulma yüklerinin ve artık dayanım değerlerinin birbirlerine çok yakın oldukları gözlenmektedir. L/100, L/50 ve L/33 ilk deplasman değerleri için burkulma yükleri görece olarak %50 ye varan farklılıklar göstermektedir. Ayrıca büyük başlangıç deplasmanı değerinin modellemede kullanmanın gerçekçi olamayacağı da şekil 6 (a)'da görülebilmektedir.

Şekil 6 (b)'de L/1000, L/500 ve L/100 başlangıç değerleri için yatay deplasmana serbest ucun  $\pm 50$ mm yatay deplasmanla çevrimsel yüklemesine ait histeresis eğrisi incelendiğinde burkulma yüklerinin sırası ile 540000N, 526558N ve 455844N oldukları ve statik itme yüklemesinde bulunan burkulma değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 6(b)'de histeresis eğrisinin en büyük çekme yükü 631427N olarak belirlenmiş olup bu değer  $\sigma_{axA}$  ( $235 \times 2565.11 = 602800$ N) değeri ve malzeme davranışı ile uyumludur.

Modellemede çapraz elemanın her iki ucu da dönmeye tutulu olması sebebi ile elemanın etkili burkulma boyu katsayısı  $K=0.5$  alınabilir. Bu durumda elemanın narinlik katsayısı, Euler burkulma yükü gerilmesi, kritik gerilme değeri ve burkulma yükü değerleri aşağıda tanımlanan formüller yardımı ile hesaplanabilir [15].

$$\lambda = \frac{0.5 \cdot 3959.8}{57.76} = 34.28$$

$$F_E = \frac{\pi^2 \cdot 200000}{34.28^2} = 1680.09 \text{ N/mm}^2$$

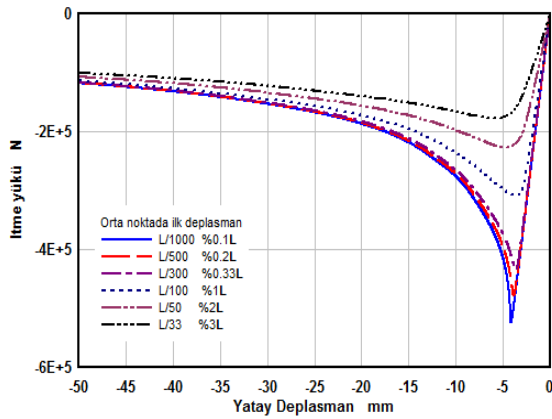
$$4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 140.79$$

$$F_{cr} = \left[ 0.658 \frac{235}{1680.09} \right] 235 = 221.64 \text{ N/mm}^2$$

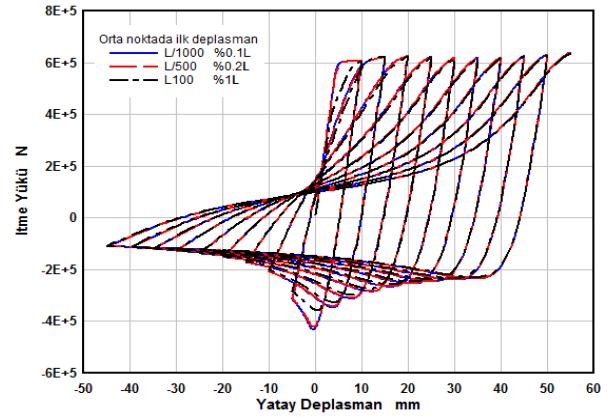
$$P_n = 221.64 \times 2565.11 = 568530.98 \text{ N}$$

Çapraz elemanın iki ucu dönmeye tutulu olması durumunda Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esasları (ÇYTHYE-2016) [15] yönetmeliği hükümlerine göre bulunan burkulma yükü; statik itme yükü ile yapılan modellemenin L/1000 ila L/500 başlangıç deplasman değerleri aralığında bir burkulma yüküne karşılık geldiği, çevrimli yüklemde ise yine L/1000 başlangıç deplasman değerine karşılık gelen burkulma yükü değeri ile uyumlu olduğu görülmektedir





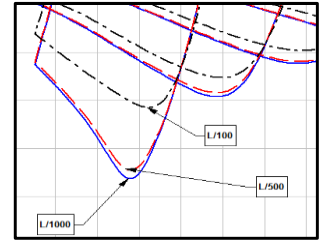
(a) statik itme yüklemesi



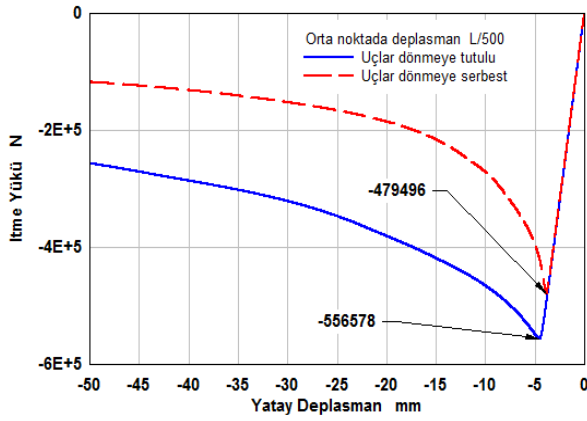
(b) çevrimli yükleme

Şekil 7. Çapraz elemanın her iki ucu dönmeye serbest olması halinde orta noktası başlangıç deplasmanının burkulma yüküne etkisi.

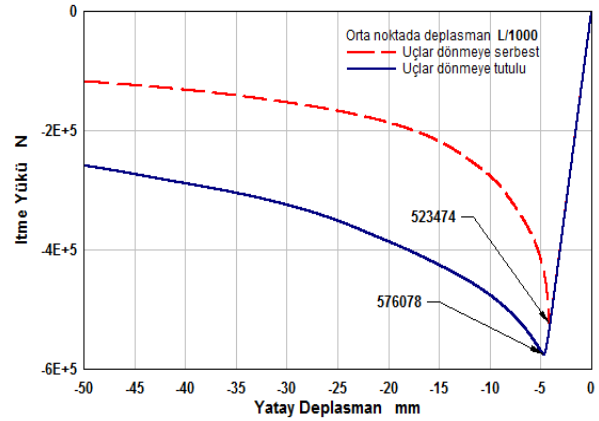
Şekil 7 (a)'da da boru çapraz elemanın uçlarında bağ plakası olmaması ve çapraz uçlarının dönmeye serbest olması durumunda itme yükü altındaki davranışı gösterilmiştir. Çapraz elemanın iki alt eleman, 100 en kesit hücre elemanı, üç integrasyon noktası ve uçlarının düzlemde dönmeye serbest mesnetli olarak modellendiği bu durumda; statik itme yüklemesi durumunda orta nokta başlangıç deplasmanı değerleri L/1000, L/500, L/300, L/100, L/50 ve L/33 olarak alınmış ve burkulma yükleri sırası ile 523498N, 479196N, 433770N, 309767N, 226174N ve 177871N olarak bulunmuştur. Bu değerler eleman ucunun dönmeye tutulu olarak modellendiği burkulma yüklerinden sırası ile %9, %13, %18, %29.6, %36 ve %40 daha azdır.



Şekil 7 (b)'de ise çevrimli yükleme halinde elde edilen L/1000, L/500 ve L/100 orta nokta deplasmanına karşılık gelen burkulma yükleri histeresis eğrisinden sırası ile 431306N, 422553N ve 357293N olup bu değerler uçların dönmeye tutulu olmasına karşılık gelen burkulma yüklerden sırası ile %20.1, %19.7 ve %21.6 daha azdır. Uçların dönmeye serbest olması hali için etkili burkulma boyu katsayısı  $K=1.00$  alındığında (ÇYTHYE-2016) [15] esaslarına göre;  $\lambda=68.55$  Euler burkulma yükü gerilmesi  $F_e=420.02N/mm^2$  kritik burkulma gerilmesi  $F_{cr}=185.94N/mm^2$  ve burkulma yükü  $P_n=476949.54N$  olarak belirlenmiştir. Bu durumda hesaplanan kritik burkulma yükü L/500 başlangıç deplasmanı ve statik itme yüklemesinden bulunan  $P=479196N$  burkulma yükü ile oldukça uyumlu olup, L/1000 başlangıç deplasmanı ve çevrimli yükleme histeresis eğrişinden bulunan  $P=431306N$  değerinden de %9 kadar büyüktür. Şekil 6 ve şekil 7 den belirlenen değerler ile (ÇYTHYE-2016) [15] kriterlerine göre hesaplanan tüm burkulma yükü değerleri bir arada değerlendirildiğinde uçların mafsalı-dönmeye serbest olarak modellenmesi durumunda ve statik itme yükü ile modellemeye orta nokta başlangıç deplasmanının L/500 kadar alınabileceği, uçların dönmeye tutulu olması halinde de hem statik yükleme hem de çevrimli yüklemede orta nokta başlangıç deplasmanının L/1000 ila L/500 aralığında bir değer kadar alınabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Fakat uçlardaki dönmenin dikkate alınması halinde hesaplanan burkulma yükü ( $P_n$ ) dönmenin dikkate alınmadığı burkulma yüküne oranla %16 daha fazladır. Çapraz elemanın burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışındaki farklılık; statik itme yükü altında orta noktanın başlangıç deplasmanına ve uçların dönmeye tutulu ve serbest olması durumundaki farklılıklar da şekil 8 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Özellikle çapraz elemanın burkulma sonrası davranışında ve artık dayanımında uçların mesnetlenmesinde kabul edilen dönmeye tutulu olma veya dönmeye serbest olma durumu belirleyici olmaktadır.

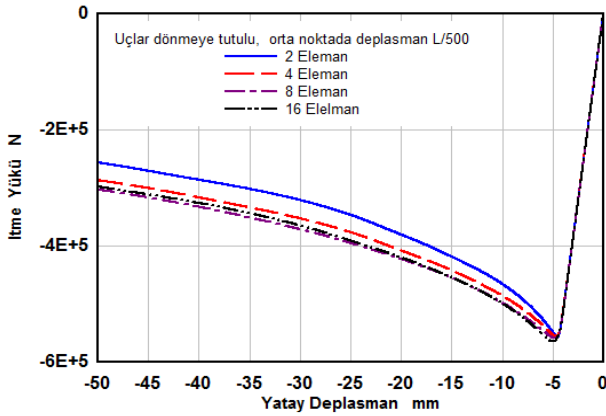


(a) orta nokta deplasmanı L/500

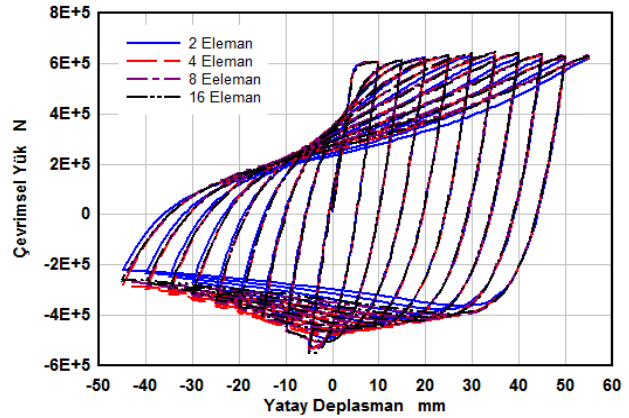


(b) orta nokta deplasmanı L/1000

Şekil 8. Statik itme yükü altında çapraz elemanın her iki ucunun dönmeye serbest ve tutulu olması durumunun, burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışına olan etkisi.



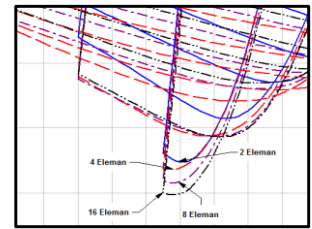
(a) statik itme yüklemesi

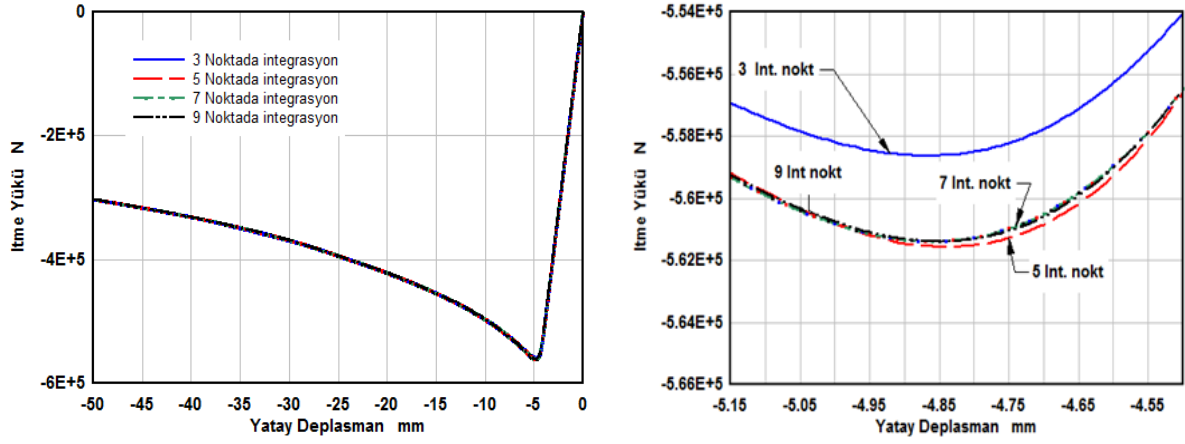


(b) çevrimli yüklemesi

Şekil 9. Çapraz elemanın her iki ucunun dönmeye tutulu olması ve L/500 başlangıç orta nokta deplasmanı için eleman sayısının burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışına etkisi.

Finite Element Model (FEM) metodu ve yayılı plastisite teorisi kullanılarak yapılan modellemelerde elemanın bölündüğü alt eleman sayı ve her bir eleman için belirlenen integrasyon noktası sayısının elemanın burkulma yüküne ve özellikle burkulma sonrası davranışına olan etkisi eleman ucunun dönmeye tutulu olması ve L/500 orta nokta başlangıç deplasmanı durumu için hem statik itme yükü hem de çevrimli itme yükü altındaki değişimi şekil 9 (a) ve (b)'de gösterilmiştir. Her iki şekilde çapraz elemanın integrasyon noktası sabit olduğu sürece bölündüğü eleman sayısı arttıkça burkulma yükü değerinin ve artık dayanım değerinin arttığını göstermektedir. Bu artış statik itme yükü altında %1.48 mertebesinde iken çevrimli yüklemesinde ise %4.56 mertebesinde. Daha gerçekçi burkulma yükü ve burkulma davranışı elde edebilmek için eleman sayısı 4 ve daha fazla olması gerektiği şekil (9) a'dan anlaşılmaktadır. Eleman sayısındaki üst sınır ise elemanın burkulma sonrası davranışı gözlemlenerek belirlenebilir.





(a) statik itme yükü yüklemesinde

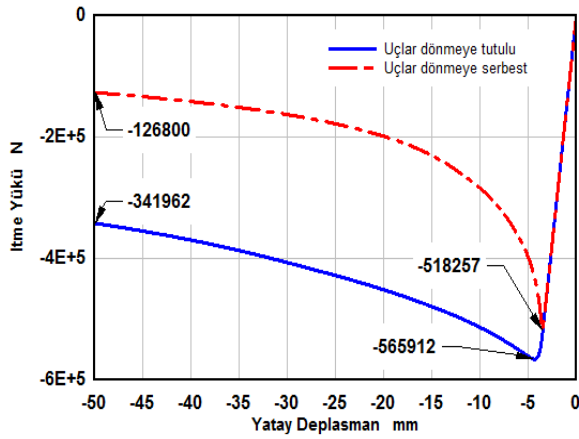
(b) maksimum değerdeki değişimin detayı

**Şekil 10.** Çapraz elemanın her iki ucunun dönmeye tutulu olması ve  $L/500$  başlangıç orta nokta deplasmanı için integrasyon noktası sayısının burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışına etkisi.

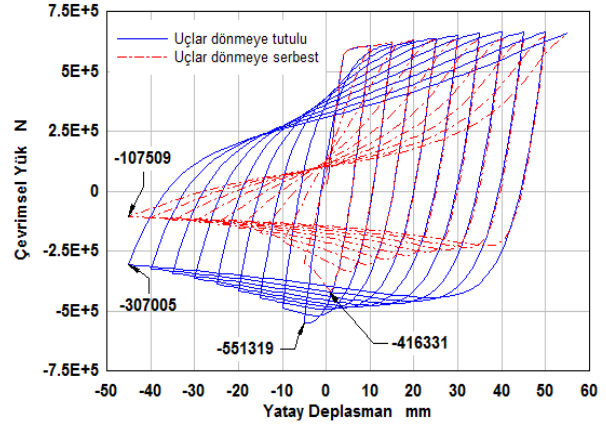
Çapraz elemanın bölünen her alt elemanı için yayılı plastisite teorisine göre malzemenin tek eksenli gerilme deformasyon değerlerinin elde edileceği noktalar birer integrasyon noktasıdır. Her bir eleman için iç kuvvet, gerilme ve deformasyon noktalarının hesaplanacağı nokta sayısı 3,5,7 ve 9 integrasyon noktası olacak şekilde değiştirilerek integrasyon noktası sayısının burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışına olan etkisi, iki ucun dönmeye tutulu ve çapraz eleman ortasında  $L/500$  başlangıç deplasmanı olması durumu için şekil (10)'da gösterilmiştir. Şekil 10 (a)'daki en büyük burkulma yükü 3 integrasyon noktası için 558634N 5, 7 ve 9 integrasyon noktası için ise 561390 N değerinde olup, integrasyon noktası sayısının 3 den fazla alınarak 7 integrasyon noktası sayısının hesaplama zamanı etkisi de göz önünde bulundurularak yeterli olabileceği görülmektedir.

#### A. ÇAPRAZ ELEMANIN RİJİT UÇ VE BAĞ PLAKASININ 2t KALINLIKTA ELASTO-PLASTİK DAVRANAN BAĞ ELEMANI OLARAK MODELLENMESİ. (URİZ-MAHİN 2008 MODELİ)

Çapraz elemanlar çerçeve sistem elemanlarına bağ plakaları ile bağlıdırlar. Kuşkusuz bağ plakasının elastik ve elastik ötesi davranışı elemanın burkulma yükünü etkileyecektir. Uriz-Mahin (2008) tarafından önerilen bu modellemede çapraz elemanın uçlarında, çapraz ucundan 2t kadar mesafe uzaklıkta başlayıp çerçeveye bağlantı noktasında kadar uzanan bölgede elemanın alan ve atalet momenti olarak 10 katı kadar olan ve elastik davranan bir rijit bölge tanımlı olup, eleman ve 2t kalınlığındaki bağ levhasının ise elasto-plastik davrandığı kabul edilir şekil 4 (a).



(a) statik itme yükü yüklemesinde burkulma yükü ve burkulma davranışı



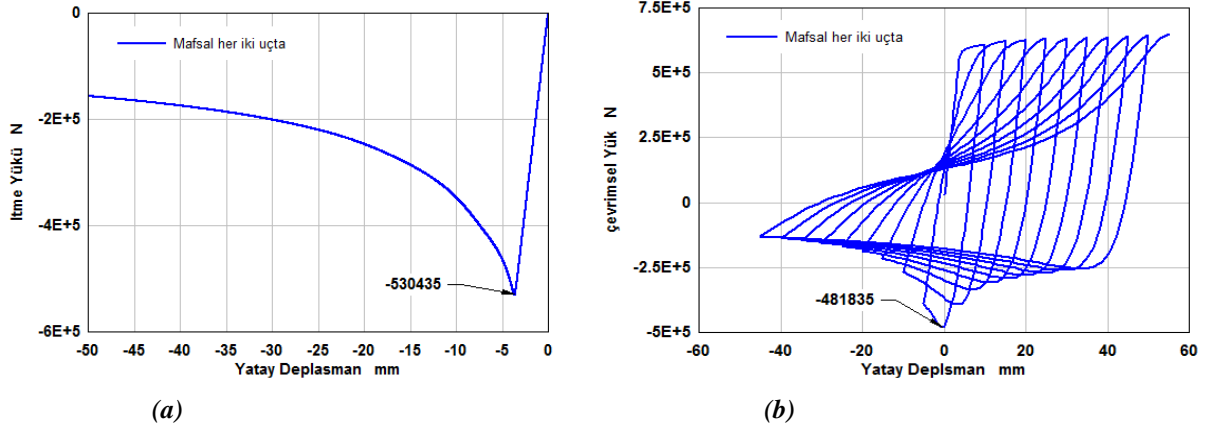
(b) çevrimsel yükle yüklenmesi durumunda burkulma davranışı histeresis davranışı.

Şekil 11. Uriz-Mahin(2008) modelleme yaklaşımı ile çapraz uçlarının dönmeye tutulu ve serbest olması durumunda.

Uriz-Mahin(2008) modeli çapraz elemanın 8 eleman, 7 integrasyon noktası ve L/500 başlangıç orta nokta deplasmanı şartları esas alınarak modellenmiştir. Şekil 11 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi çapraz elemanların mesnetlerindeki dönme şartı burkulma yükünü ve özellikle de burkulma sonrası davranışında etkilidir. Şekil 11 (b)'de her iki histeresis eğrisi karşılaştırıldığında elemanın çekmeye çalıştığı bölgede her iki mesnetlenme şartı için davranış eğrisi aynı iken basınç yükünden çekme yüküne geçtiği bölgedeki davranışları oldukça farklıdır. Bu farklılık her iki mesnetlenme türünde çapraz elemanın enerji yutma miktarının oldukça farklı olduğu ve uçların dönmeye tutulu olması kabulünde daha fazla enerji tükettiğini göstermektedir. Bu durumun da en temel göstergesi uçların mesnetlenme şartına göre çubuğun  $\lambda$  narinlik değerindeki değişimdir. Statik itme yükü altındaki burkulma yükleri dönmeye tutulu durum için 565912N, dönmeye serbest durum için 518257N olarak belirlenmiştir. Bu değerler çevrimli yükleme hali için sırası ile 551319N ve 416331N olarak bulunmuş olup bu farklılık çapraz elemanın burkulma sonrası çatlaması ve yorulmasına bağlı olarak açıklanabilir.

### B. ÇAPRAZ ELEMANIN RİJİT UÇ VE BAĞ PLAKASININ ELASTO-PLASTİK DÜZLEM DIŞI DÖNME MAFSALI ELEMANI OLARAK MODELLENMESİ. (HSIAO V.D 2012 MODELİ)

Hsiao v.d tarafından önerilen bu modelde; çapraz elemanı çerçeve elemanına bağlayan bağ plakasının Withmore yırtılma genişliği ve plaka kalınlığı göz önüne alınarak plakanın zayıf eksenine göre olan atalet momentine karşılık eğilme rijitliği ve eğilme momenti formül (1) ve formül (2) deki yerlerine konularak,  $K=98408683.40\text{Nmm}$  ve  $M_y=3009468.75\text{Nmm}$  olarak belirlenmiştir. Diğer modelleme yaklaşımları ile kıyaslama sağlamak için; çapraz eleman 8 eleman, 7 integrasyon noktası ve L/500 başlangıç orta nokta deplasmanı şartları ile düzlem dışı dönme mafsalının şekil 4 (b)' de gösterildiği gibi iki uç noktasında olduğu kabulleri yapılmıştır. Uçların dönmeye tutulu olması durumunda statik itme ve çevrimsel yükleme altında modellenerek sonuçlar elde edilmiştir şekil (12).



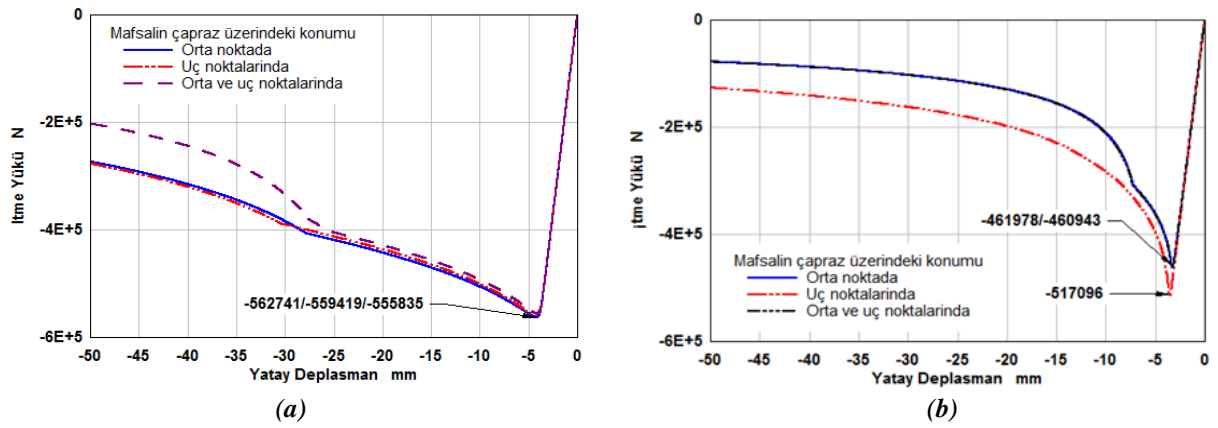
**Şekil 12.** Hsiao v.d (2012) modelleme yaklaşımı ile çapraz uçlarının dönmeye tutulu olması durumunda (a) statik itme yükü yüklemesinde burkulma yükü ve burkulma davranışı (b) çevrimsel yükle yüklenmesi durumunda histeresis davranışı.

Bu modelleme yaklaşımında uçların dönmeye serbest olarak modellenmesi durumu, modelleme sonuçlarında oldukça düşük burkulma yükü elde edilmiş olması sebebi ile dikkate alınmamıştır. Şekil 15 (b)'de tüm yaklaşımların karşılaştırılmasında gösterilen bu durum bu modelleme yaklaşımında çapraz uçlarının dönmeye tutulu olup olmadığının kabulüne oldukça hassas olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyimle düzlem dışı dönme mafsalı ankastre bir mesnet üzerinde tanımlanmalıdır. Modellemede anlamlı burkulma yükünün elde edilebilmesi için mafsal uçları dönmeye tutulu iken dönme mafsalının çapraz uçlarında tanımlanması modelin esasını teşkil etmektedir. Statik itme yüklemesinde her iki uçta mafsal olması durumunda burkulma yükü 530435N olarak belirlenmiştir. Çevrimsel yükleme durumunda ise her iki uçta dönme mafsalı olması halinde burkulma yükü 481835N olarak belirlenmiştir.

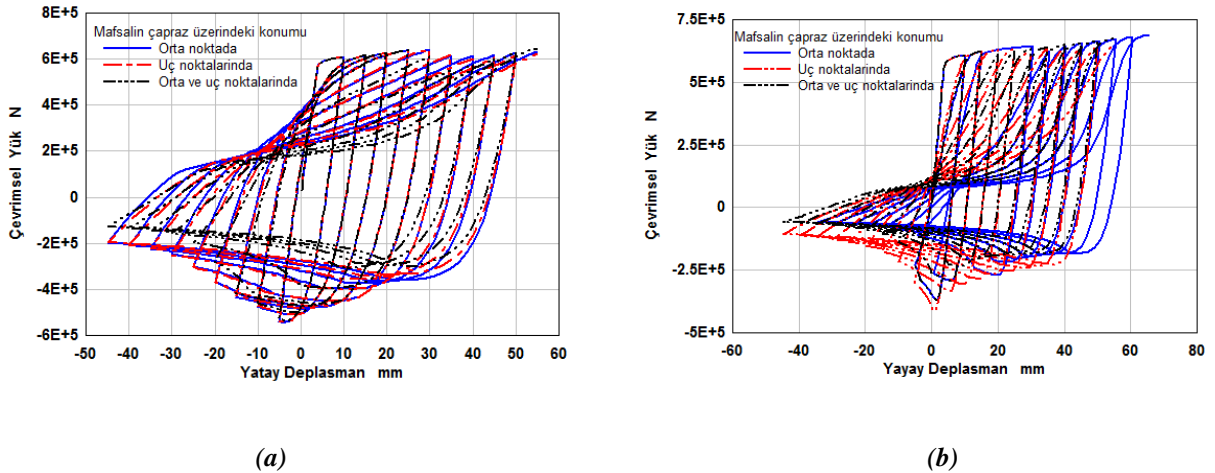
### C. ÇAPRAZ ELEMANIN RİJİT UÇ VE ÇAPRAZ ELEMAN KESİTİNİN DÖNME MAFSALI ELEMANI OLARAK MODELLENMESİ. PHYSICAL-THEORY MODEL (PTM).

Bu modelleme yaklaşımında çapraz elemanın çerçeve sisteme bağlantısını sağlayan bağ plakası göz önüne alınmaksızın çapraz kesitin, eğilme rijitliği, (K) elastik eğilme momenti (My) ve elastik dönme açısı ( $\theta_y$ ) değerleri göz önüne alınmıştır. Çapraz eleman bu elastik değerleri ve malzemenin pekleşme etkisi de göz önüne alınarak; elasto-plastik düzlem dışı dönebilen mafsal eleman, çaprazın orta noktasında, uçlarında ve hem artasında hem de uçlarında bulunması olarak üç farklı durum için modellemeler yapılmıştır. Modellemede çaprazın ortasındaki başlangıç deplasmanı değeri  $L/500$ , eleman sayısı 8. ve integrasyon noktası sayısı 7 ve kesitinde 80 hücre eleman olarak modellenmiştir. Analiz sonuçları statik itme yükü ve çevrimsel yükleme altında yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu metot da, çaprazın statik itme ve çevrimsel yükleme altındaki davranışı plastik dönme mafsalı ile birbirine bağlı iki elemandan oluşmaktadır. Mafsalın hem çapraz elemanın orta noktasında hem de eleman uçlarında tanımlanması durumunda da çapraz uçların dönmeye tutulu olarak modellenmesi Giberson 1967 tarafından da önerilmiştir [3]. Şekil 13 (a)'da her üç model için mafsal uçlarının dönmeye tutulu olması durumundaki burkulma yükü ve burkulma sonrası davranış gösterilmiştir. Her üç model için burkulma yükleri birbirlerine oldukça yakın olmasına karşın, burkulma sonrası davranışlar bakımından mafsalın uçlarla beraber ortada bulunduğu model diğer iki modele göre farklı davranış göstermekte ve burkulma yükü dayanımı daha fazla azalmaktadır. Şekil 13 (b)'de ise her üç model için uçların dönmeye serbest olması durumundaki burkulma yükü ve burkulma sonrası davranış

gösterilmiştir. Burkulma yükleri mafsalın yalnız orta noktada olması ve hem uç hem de orta noktada beraber bulunması modellemesi için çok yakın değerler iken, mafsalın yalnızca eleman uç noktalarında bulunması durumu için burkulma yükü daha büyüktür. Uçların dönmeye serbest olduğu bu üç farklı mafsal yeri modellemesinde; orta noktada mafsal modeli ile hem uçlarda hem de orta noktada mafsal bulunan modelin burkulma sonrası davranışları aynıdır. Özetle uçların dönmeye tutulu olduğu modellerde burkulma yükünde anlamlı bir farklılaşma gözlemlenmezken burkulma sonrası davranışa mafsal sayısının etki ettiği, uçların dönmeye serbest olduğu modelde ise burkulma yükleri farklılaşırken çapraz ortasındaki mafsalın burkulma davranışında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum modeldeki mafsal sayısı arttıkça tüketilebilecek enerji miktarının artmayacağını göstermekle beraber burkulma davranışında çapraz orta noktasındaki mafsalın daha etkili olduğu sonucunu ortaya koyduğu söylenebilir.



**Şekil 13.** Çapraz eleman kesitinin dönme mafsalı olarak farklı noktalarda Physical-Theory Model (PTM) ile statik itme yükü altında burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı. (a) uçlar dönmeye tutulu (b) uçlar dönmeye serbest.



**Şekil 14.** Çapraz eleman kesitinin dönme mafsalı olarak farklı noktalarda Physical-Theory Model (PTM) ile tanımlanarak çevrimsel itme yükü altında burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı. (a) uçlar dönmeye tutulu (b) uçlar dönmeye serbest.

Şekil 14 (a) ve (b)'de çapraz mafsal yerlerinin ve sayısının eleman üzerinde üç farklı biçimde modellenerek çevrimsel yük altındaki davranışları sırasıyla uçları dönmeye tutulu olması ve serbest olması durumları için verilmiştir. Şekil 14 (a)'da uçların dönmeye tutulu olduğu modelde de burkulma yükleri arasında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Burkulma yükleri modelleme sırasına göre

544215N, 543393N ve 535319N dur. Bulunan burkulma yükleri  $\lambda=KL/r =34.28$  değeri için Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına (ÇYTHYE-2016) [15] göre bulunan burkulma yükü değeri  $P_n=568523.6719N$  ile oldukça yakın değerlerdir. Statik itme yükü ile yapılan modelleme sonucu ile uyumlu olarak, mafsalin yalnız orta noktada bulunduğu model ile mafsalin uç noktalarda bulunduğu modelin burkulma sonrası ve histeresis davranışları birbirilerine yakın ve uyumludur. Hem çapraz ortasında hem de çapraz uçlarında mafsal bulunan modelin burkulma sonrası ve histeresis davranışı oldukça farklı olup, üçüncü çevrimden sonra farklılaşmanın başladığı gözlemlenmiştir. Bunun fiziksel anlamı ise, modeldeki mafsal sayısı arttıkça yutulan enerjinin de bağlı olarak artmayacağı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 14 (b)'de ise uçların dönmeye serbest olduğu modellerde; çapraz elemanın histeresis davranışları mafsalin çapraz üzerindeki konum ve adedi değişikçe değişiklik göstermektedir. Mafsalin orta noktasında ve hem orta noktasında hem de uçlarında bulunduğu modellerde burkulma yükleri aynı (370053N) fakat burkulma sonrası davranışları statik itme yükü altındaki davranışları şekil 13 (b)'de gösterildiği gibi aynı değildir. Çapraz elemanın uçlarında mafsal modellendiği durumdaki burkulma yükü (414291N) daha büyük ve enerji yutma kapasitesinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu modelleme yaklaşımında elde edilen burkulma yükleri  $\lambda=KL/r=68.55$  için Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına (ÇYTHYE-2016) [15] göre hesaplanan  $P_n=476949.5431$  N değerinden küçüktür.

#### IV. MODELLEME BULGULARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Çapraz eleman uçlarının dönmeye tutulu ve serbest olduğu durum esas alınarak, çapraz eleman ortasında  $L/500$  başlangıç deplasmanı bulunması ve çapraz elemanın 8 alt elemana bölünüp 7 integrasyon noktası olması durumu esas alınarak modelleme yaklaşımlarındaki burkulma yükü değeri ve burkulma sonrası davranışı ile histeresis davranış eğrileri karşılaştırılmıştır şekil 15 (a) (b).

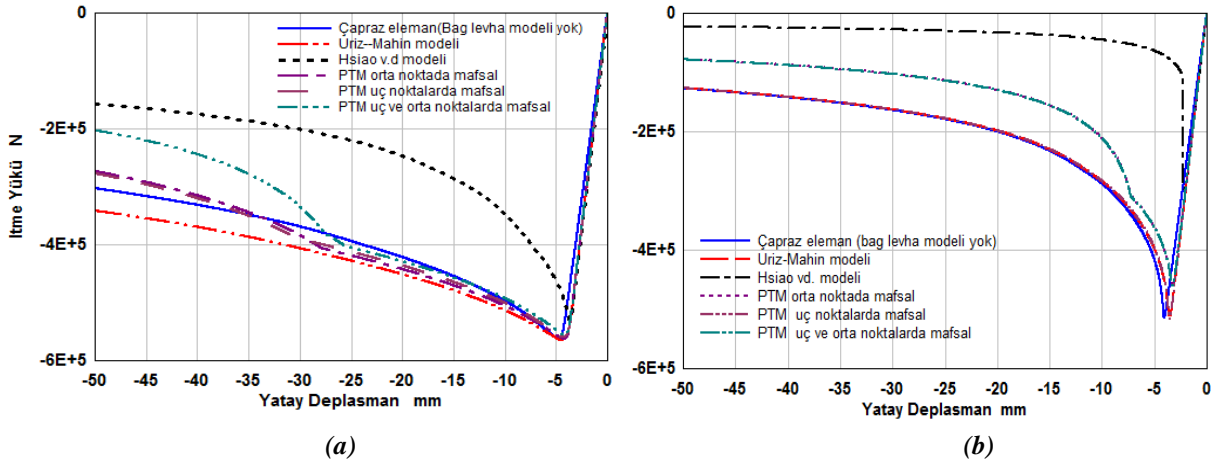
Şekil 15 (a)'da çapraz elemanın uçlarının dönmeye tutulu olması durumunda statik itme yükü altında tüm model yaklaşımlarının davranışları incelendiğinde; Hsiao vd.(2012) modeli haricinde tüm model yaklaşımlarının burkulma yüklerinin birbirlerine oldukça yakın ve Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esaslarına (ÇYTHYE-2016) [15] yönetmeliğine göre burkulma boyu katsayısı  $K=0.5$  için bulunan burkulma yükü ile uyumlu oldukları gözlemlenmektedir. Hsiao vd.(2012) model yaklaşımın burkulma yükü diğer model yaklaşımlarından %5.7 kadar daha düşüktür. Modellerin burkulma sonrası davranışları yine şekil 15 (a) üzerinden karşılaştırıldığında Uriz-Mahin(2008) modeli, Physical TheoryModel(PTM) de mafsalin sadece orta noktada bulunması ve mafsalin iki uça bulunması modelleme yaklaşımlarının burkulma sonrası davranışlarının oldukça benzer olduğu, fakat Hsiao vd.(2012) model yaklaşımının diğer model yaklaşımlarına göre oldukça farklı olduğu, Physical TheoryModel (PTM) de mafsalin hem orta noktada hem de uçlarda bulunması durumunun burkulma sonrası davranışının çapraz ucunun %0.63 (25mm) deplasmanından sonra farklılaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 15 (b)'de çapraz elemanın uçlarının dönmeye serbest olması durumunda statik itme yükü altında tüm model yaklaşımlarının davranışları incelendiğinde ise; burkulma yükü ve burkulma yükü sonrası davranışları bakımından; uçlarda bağ levhasının modellenmediği, Uriz-Mahin(2008) modeli ile Physical TheoryModel (PTM) de mafsalin çaprazın uçlarında olması durumları için yapılan model sonuçlarının tam bir uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Physical TheoryModel (PTM) yaklaşımının mafsalin çapraz uçları ile ortasında beraber bulunduğu durum ile mafsalin yalnız çapraz orta noktasında bulunduğu durumdaki model sonuçları da şekil 15(b)'de görüldüğü gibi uyum içerisindedir. Şekil 15 (b)'de en farklı sonuç Hsiao vd.(2012) modeli için bulunmuştur. Daha öncede açıklandığı gibi bu

modelleme yaklaşımında düzlem dışı dönme mafsalları çapraz uçlarında tanımlamak ve çapraz uçlarını dönmeye serbest kabul etmek diğer yaklaşımlara göre oldukça farklı sonuçlar vermektedir.

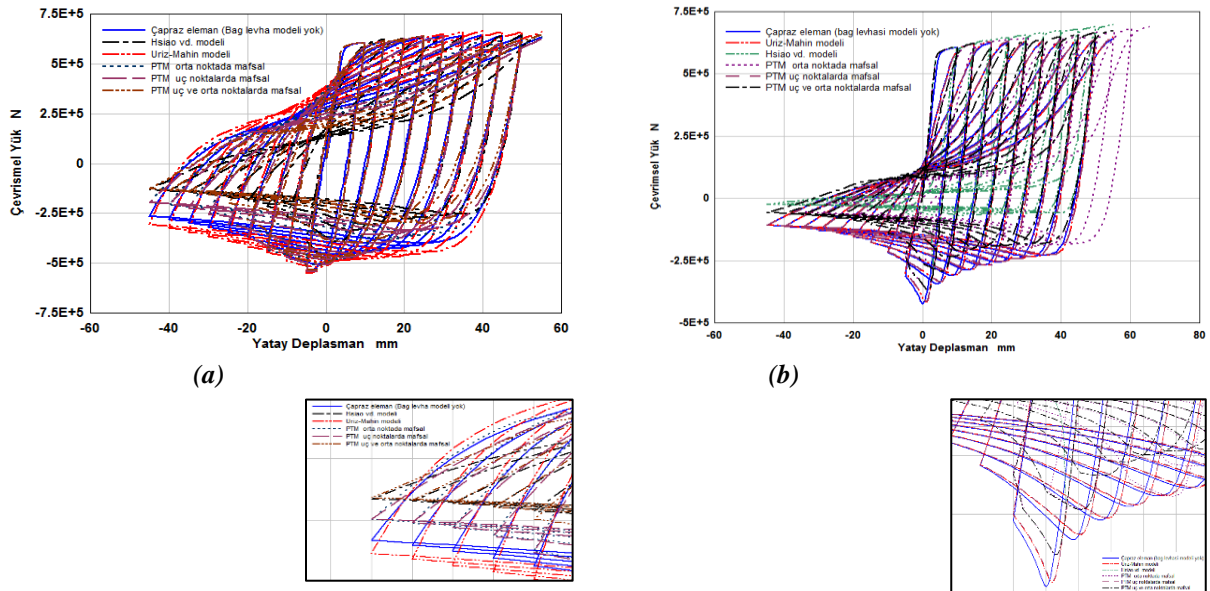
Şekil 16 (a)'da çapraz elemanın uçlarının dönmeye tutulu olması durumunda çevrimli yükler altındaki davranışı incelendiğinde; en büyük burkulma yükünün Uriz-Mahin(2008) modelinde elde edildiği görülmektedir. Çapraz uçlarında bağ levhasının dikkate alınmadığı model ile Physical Theory Model(PTM) ile çaprazın sadece orta noktasında mafsalları bulunması durumu ile çaprazın yalnız uç noktalarında mafsalları bulunması modelleme yaklaşımlarında da burkulma yükleri oldukça yakın değerlerdir. Physical Theory Model(PTM) ile mafsalları çapraz orta ve uç noktalarında bulunması modeli yaklaşımı ile Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımlarının burkulma yükleri birbirlerine yakın olmakla beraber burkulma sonrası davranışları da birbirine yakın olup Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımının histeresis alanı yani enerji yutma kapasitesi Physical Theory Model(PTM) ile mafsalları çapraz orta ve uç noktalarında bulunması modeli yaklaşımına göre daha düşüktür. Şekil 16(a)'da histeresis davranışları bakımından bir gruplama yapıldığında; Uriz-Mahin(2008) modeli ile çapraz uçlarında bağ levhasının modellenmediği durumdaki davranışların, Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalları yalnız orta noktada ve yalnız çapraz uç noktalarında bulunduğu durumdaki davranışların ve Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımı ile Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalları çaprazın hem orta noktada hem de uçlarda bulunması modelleme yaklaşımlarının birbirleri ile uyumlu oldukları gözlemlenmektedir. Fakat en büyük enerji yutma kapasitesi Uriz-Mahin(2008) modelinde gözlemlenmişken, en düşük enerji yutma kapasitesinin de Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımında olduğu şekil 16(a)'da ayrıca gözlemlenmiştir.

Şekil 16 (b)'de ise çapraz elemanın uçlarının dönmeye serbest olması durumunda çevrimli yükler altındaki histeresis davranışı gösterilmiştir. Şekil 16 (b) incelendiğinde modelleme sonuçları burkulma yükleri ve burkulma sonrası davranışları bakımından; bağ levhasının olmadığı model, Uriz-Mahin(2008) modeli ve Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalları çapraz uçlarında bulunması durumundaki modelleme sonuçları birbirleri ile oldukça uyumlu ve yakın sonuçlar vermişlerdir. Yine şekil 16(b)'den Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalları yalnız orta noktada bulunması ve hem çapraz uç noktalarında hem de orta noktasında bulunduğu durumdaki modelleme yaklaşımları da burkulma yükü ve burkulma yükü sonrası davranışları bakımından uyumluluk göstermişlerdir. Şekil 16(b)'de burkulma yükü ve burkulma sonrası davranış bakımından en farklı modelleme sonucu Hsiao vd(2012) modelleme sonucundan elde edilmiş olup histeresis eğrisinin burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı şekil 15(b)'de gösterilen davranışla oldukça uyumludur. Şekil 16(b) Histeresis davranışların tümü bakımından karşılaştırıldığında da Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımının diğer modelleme yaklaşımlarına göre en düşük enerji yutma kapasitesini ifade ederken, Uriz-Mahin(2008) modelleme yaklaşımı ve Physical theory Model (PTM) yaklaşımı ile mafsalları çapraz uçlarında modellendiği model yaklaşımı hem benzer davranış hem de en büyük enerji yutma kapasitesine sahiptirler.





Şekil 15. Farklı modelleme yaklaşımları için statik itme yükü altında burkulma yükü, burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışları. (a) Uçlar dönmeye tutulu (b) Uçlar dönmeye serbest.

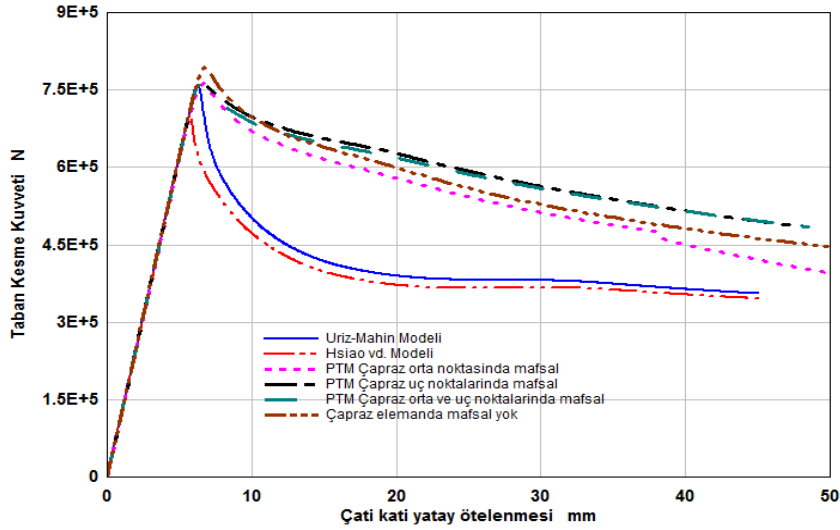


Şekil 16. Farklı modelleme yaklaşımları için statik çevrimsel yük altında burkulma yükü, burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışları. (a) Uçlar dönmeye tutulu (b) Uçlar dönmeye serbest.

## V. BORU KESİT ÇAPRAZ ELEMANLI ÇERÇEVE SİSTEMİN İTME ANALİZİ

Uygulamada çelik yapıların yatay yükler altındaki elastik ötesi davranışını belirlemek için; yatay yük taşıyıcı sistemin, tek modlu itme analizi (pushover), zaman tanım alanında lineer olmayan analizi veya çevrimsel yükleme altındaki lineer olmayan analizi yapılmalıdır. Bu bölümde şekil (1) de verilen çerçeve sistem esas alınarak; sistemin HEB200 kesitli kolon ve IPE200 kesitli kiriş elemanlarının yayılı plastisite teorisine göre davrandıkları kabul edilerek modellenmişleridir. Çerçeve sistemin ters V merkezi çaprazlı elemanları ise; mafsalsal modelinin kapasite eğrisine olan etkisini gösterebilmek için, Uriz-Mahin(2008), Hsiao vd.(2012), Physical Theory Model (PTM) için mafsalsalın yalnız çapraz orta noktasında bulunması, mafsalsalın çapraz uç noktalarında bulunması ve mafsalsalın hem uç noktalarında hem de orta noktada bulunması durumları göz önüne alınmıştır. Çapraz elemanın orta noktasındaki başlangıç deplasmanı tüm modellemelerde  $L/500$  olarak alınmış ve çapraz elemanda mafsalsal tanımlanmaksızın

yayıllı plastisite teorisine göre davranması durumundaki kapasite eğrisi de karşılaştırma amaçlı olarak belirlenmiştir şekil 16.



*Şekil 17. Çapraz elemanda farklı dönme mafsalı tanımlanmasının çerçeve sistemin yatay yük taşıma kapasite eğrisi üzerine olan etkisi.*

Şekil 17’de Çerçeve sistemin çapraz elemanlarında farklı yaklaşımlara göre modellenmesi ile tek modlu itme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrileri gösterilmiştir. Burada kapasite eğrilerini iki farklı grupta değerlendirilebilir. Birinci grup, bağ plakasının rijitliğini göz önüne alan modelleme yaklaşımları, ikinci grup ise bağ plakasının rihtliğini göz önüne almadan çapraz elemanın kesitinin dönme rijitliğini göz önüne alıp çaprazın farklı noktalarında dönme mafsalı olarak tanımlandığı modelleme yaklaşımlarıdır.

Çapraz elemanın bağ plakasını temel alan; Uriz-Mahin(2008) modeli ile Hsiao vd.(2012) tarafından önerilen iki modelde çerçeve sistemin taban kesme kuvvetleri sırası ile 757495 N ve 703078 N olup aralarında %7.7 kadar farklılık bulunmaktadır şekil (17). Diğer taraftan iki yaklaşım arasındaki burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışları arasındaki farklılık şekil 15 (a) ve (b)’de gözlemlenmesine karşılık, Hsiao vd.(2012) model yaklaşımı ile Uriz-Mahin (2008) model yaklaşımı arasında burkulma sonrası davranışları ve artık dayanımları arasındaki farklılık şekil (17)’de gözlemlenmemiştir. Çapraz elemanın tek başına basınç elemanı olarak modellendiği durumda burkulma sonrası davranışların farklılığı; Uriz-Mahin(2008) modelinde bağ plakasının tüm boyutlarının elasto-plastik davranan eleman olarak modellenmesine karşılık, Hsiao vd.(2012) ait modellemede ise bağ plakasının Withmore yırtılma genişliği kadar olan genişlik ve kalınlığının dikkate alınmıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil (17) ’da çaprazın çerçeve elemanı olarak modellendiği ve Uriz-Mahin(2008) modeli ile Hsiao vd.(2012) modeli arasındaki burkulma yükü sonrası davranış uyumu ise Uriz-Mahin(2008) modelinde bağ plakasının  $2t$  kadar kalınlıktaki mesafede elasto-plastik davranan eleman olarak modellenip bu  $2t$  kadar mesafedeki elemanın düzlem dışı dönme davranışının; Withmore genişliği, levha kalınlığı ve ortalama levha boyunu dikkate alan Hsiao vd.(2012) modelindeki düzlem dışı dönebilen dönme mafsalı ile benzer davranışı gösteriyor olmasıdır.

Çapraz elemanın bağ plakasını dikkate almayan Physical Theory Model (PTM) yaklaşımında; mafsalın çapraz uçlarında tanımlandığı model ile hem çapraz uçlarında hem de çapraz orta noktasında tanımlandığı modelin burkulma sonrası davranışları birbirlerine oldukça yakındır. Mafsalın yalnızca çapraz ortasında tanımlandığı modelde, burkulma sonrası davranışı ise diğer iki mafsal yerleşimine göre

daha düşük burkulma yükü değerlerine sahiptir. Bu durum çapraz eleman üzerinde mafsalsal noktaya arttıkça burkulma yükünde daha gerçekçi değerlerin elde edilebileceğini göstermektedir. Tanımlanabilecek mafsalsal sayısının da üç noktada tanımlanmasının yeterli olabileceği şekil (17)'den anlaşılmaktadır.

## VI. SONUÇ

Gerçek yapılarda çapraz elemanın bağ plakası ile çerçeve elemanına olan bağlantısı; ne dönme mafsalsal şeklinde ne de dönmeye tutulu tam ankastredir. Modellemelerdeki temel fikir çapraz elemanın bir basınç ve çekme çubuğu olarak çalıştığıdır.

Çapraz elemanın çerçeve sistemden izole edilip, tek başına basınç çubuğu olarak değerlendirilerek yapılan modellemelerde; burkulma yüküne ve burkulma sonrası davranışa etki eden en önemli modelleme değişkenleri çapraz orta noktasında tanımlanan başlangıç deplasman değeri ve mafsalsal uçlarının dönmeye tutulu olup olmadığıdır. Mafsalsal uçlarının dönmeye tutulu olup olmaması kabulü mafsalsal doğrudan burkulma boyunu ve dolayısı ile  $\lambda$  narinlik oranı etkilediğinden  $\lambda$  narinlik değerinin burkulma yüküne, mafsalsal orta noktasında tanımlanan başlangıç burkulma değerinin de burkulma sonrası davranışına etki ettiği gözlemlenmiştir. Araştırmada çapraz orta noktasındaki başlangıç deplasman değerinin mafsalsal boyunun 1/500'ü kadar alınabileceği, çapraz elemanın bölündüğü alt eleman sayısının 8 ve her bir eleman için integrasyon noktası sayısının 7 olması durumunun modelleme için optimum değerler olabileceği belirlenmiştir.

Çerçeve sistemden izole edilerek merkezi çaprazlı çerçeve sistemin kapasite eğrisinin elde edilmesinde kullanılabilecek modelleme yaklaşımı arayışında kullanılan üç modelleme yaklaşımı sonuçlarına göre; hem uçların dönmeye tutulu hem de dönmeye serbest olduğu model yaklaşımlarında model sonuçları arasında tam bir uyum olmamakla beraber uçların dönmeye tutulu olması durumunda Uriz-Mahin(2008) modeli ile Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalsal çapraz uçlarında modellenmesi sonuçları birbirleri ile oldukça uyumlu iken bu iki modelleme yaklaşımı uçların dönmeye tutulu olduğu durumda Physical Theory Model(PTM) ile modellemede mafsalsal yalnız ortada tanımlanması durumunda burkulma yükleri yine birbirlerine yakındır. Hsiao vd.(2012) modelleme yaklaşımı ancak çapraz uçlarının dönmeye tutulu olması ve bağ plakasının çapraz uçlarında düzlem dışı dönme mafsalsal olarak modellenmesi durumunda kullanılabilir olmakla beraber, model bağ plakasının düzlem dışı dönme davranışını temsil etmesi sebebi ile çapraz eleman kesitinin dönme mafsalsal olarak tanımlandığı modelleme yaklaşımında bağ plakası-çapraz eleman rijitlik karşılaştırmasına imkan tanımaktadır. Model sonuçlarının çevrimli yükler altında ortak özelliği ise; çapraz ucunun dönmeye tutulu kabul edildiği durumdaki histeresis alanı çapraz uçlarının dönmeye serbest olduğu durumdaki histeresis alanına oranla daha büyüktür. Bu durum  $\lambda$  narinlik değerinin çaprazın enerji yutma kapasitesinde doğrudan etkili olduğu şeklinde açıklanabilir.

Modeller arasındaki temel farklılık bağ plakasının modellemede dikkate alınıp alınmaması olarak birbirlerinden ayırt edildiğinde; bağ plakasının düzlem dışı dönme rijitliğinin çapraz elemanın düzlem dışı dönme rijitliğinden küçük olduğu durumda burkulma sonrası davranışları oldukça farklılaşmaktadır. Bu sebeple bağ plakasının düzlem dışına dönme rijitliği uygun bir yaklaşımla kontrol edilerek, gerektiği durumda rijitlik levhaları ile takviye edilmelidir.

Çapraz elemanın merkezi ters V çapraz/diyagonal elemanı olarak modellendiği çerçeve sistemin tek modlu itme analizi sonuçlarından; bağ plakasının modellendiği ve modellenmediği yaklaşımlar arasındaki temel farklılığın burkulma sonrası davranışlarını gösteren eğriler arasında farklılıklar olduğudur. Bağ plakasının çapraz ucunda elsto-plastik eleman olarak modellenmesini temel alan Uriz-Mahin(2008) model yaklaşımı ile bağ plakasını düzlem dışı dönme mafsalı olarak esas alan Hsiao vd.(2012 ) model yaklaşımının burkulma sonrası davranışları birbirine oldukça yakındır. Physical Theory Model(PTM) model yaklaşımı esas alınarak çapraz elemanın, orta noktasında, uçlarında ve hem uçlarında hem de orta noktasında dönme mafsalı tanımlanarak elde edilen kapasite eğrisinin burkulma sonrası davranışları birbirine yakın ve aynı özellikte olup bu modelleme yaklaşımı için çerçeve gözü içerisindeki çapraz elemanı elemanın iki ucunda dönme mafsalı olacak şekilde tanımlamanın daha gerçekçi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

## VII. KAYNAKLAR

- [1] P. Uriz, F. C. Filippou, ve S.A. Mahin, “Model for Cyclic Inelastic Buckling of Steel Braces,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 4, pp. 619-628, 2008.
- [2] M. Dicleli, E.Çalık, “Physical Theory Hysteretic Model for Steel Braces,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 7, pp. 1218-1228, 2008.
- [3] M. D’Aniello, G. La Manna Ambrosino, F.Portioli ve R. Landolfo, “The effect of different modelling approach on seismic analysis of steel concentric braced frames,” 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.
- [4] E. E. Çalık, “Development of a physical theory model for the simulation of hysteretic behavior of steel braces,” MSc thesis, Department of Engineering Sciences, Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2007.
- [5] S. Mazzoni, F. McKenna, M. Scott ve G. Fenves. (2006). *Open system for earthquake engineering simulation user command-language manual*. Erişim: <http://opensees.berkeley.edu>
- [6] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007) T.C. Resmi Gazete, Sayı: 26454, 06 Mart 2007.
- [7] F. C. Filippou, G.L. Fenves, “Earthquake Engineering From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering,” vol. 6, CRC Press LLC, 2006.
- [8] F. C. Filippou, E.P. Popov, V.V. Bertero, “Modelling of R/C Joints Under Cyclic Excitations,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 109, no. 11, pp. 2666-2684
- [9] P. Uriz, S. A. Mahin, “Toward Earthquake-Resistant Design of Concentrically Braced Steel-Frame Structures,” *Pacific Earthquake Engineering Research Center(PEER)*, University of California, Berkeley, USA, 8, 2008.

- [10] Po. C. Hsiao, D. Lehman, C.W. Roeder, "Improved Analytical Model for Special Concentrically Braced Frames," *Journal of Constructional Steel Research* vol. 73, pp, 80-94, 2012.
- [11] D. Sfintesco, "European Recommendations for Steel Construction," *European Convention for Constructional Steelwork*, Brussels, 1978.
- [12] D. Georgescu, "Earthquake-Recent Developments in Theoretical and Experimental Results on Steel Structures. Seismic Resistant Braced Frames," *Costruzioni metalliche*, vol.1, pp. 39-52, 1996.
- [13] M. Dicleli, A. Mehta, "Simulation of inelastic cyclic buckling behavior of steel box sections," *Computers and Structures*, vol.85, pp. 446-457, 2007.
- [14] M. Dicleli, E. Çalık, "Physical Theory Hysteretic Model for Steel Braces," *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 7, pp. 1215-1228, 2008.
- [15] Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esasları (2016), T.C. Resmi Gazete, Sayı: 29614, 04 Şubat 2016.