

## Çelik Levhalı Perdelerin Farklı Kolon Kiriş Birleşimlerine Göre Davranışının İncelenmesi

\*<sup>1</sup>Said Dusak ve <sup>2</sup>Ahmet Necati Yelgin

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye

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

### Abstract

A series of analytical studies have been carried out to investigate the behavior of a single-storey and single-bay steel plate shear wall under lateral loads according to different beam-to-column connection types. The load-displacement curves obtained from these analyzes are given comparatively. In the steel plate shear wall models, the beams are connected to the columns as pinned and semi-rigid. The connection of the columns to the foundation is designed as pins. The steel plates placed in the steel frame are modeled as parallel tension strips. Pushover analysis of the steel plate shear wall was made using the SAP2000 software. As a result of the analysis, the changes in load-displacement curves were evaluated by increasing the stiffness of the beam-to-column connections. All steel plate shear wall models exhibited ductile behavior and very good energy absorption under lateral loads.

### Özet

Bu makale kapsamında tek katlı ve tek açıklıklı bir çelik çerçeveye ince çelik levha ilave edilmek suretiyle elde edilen çelik levhalı perdenin farklı kolon kiriş birleşim türüne göre yatay yükler altındaki davranışını incelemek için yapılan bir dizi analitik çalışma sunulmuştur. Çalışmalar sonucu elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çelik levhalı perde modellerinde kirişler kolonlara mafsallı ve yarı-rijit olarak bağlanmış, kolonların temele bağlantısı ise mafsallı olarak tasarlanmıştır. Çerçeve içerisine ek levhası ve vida yardımıyla yerleştirilen çelik levhalar da paralel çekme çubukları şeklinde modellenmiştir. Çelik levhalı perdenin düzlemi doğrultusunda tepe noktasından yapılan yatay yükleme ile statik itme analizi yaptırılmıştır. Modellerde kolon-kiriş birleşimi rijitliklerinin artırılmasıyla modelin yük-yer değiştirme eğrilerindeki artışlar değerlendirilmiştir. Çelik levhalı perde modellerinin hepsi yatay yükler altında yüksek sünek davranış ve çok iyi enerji yutma özelliği göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik levhalı perde, kolon kiriş birleşimi, çubuk model

### 1. Giriş

Çelik levha dolgulu perdeler ilk olarak 1970'li yıllarda Japonya'da daha sonraki yıllarda ise Kanada ve Amerika'da araştırılan bir yatay yük taşıma sistemidir. Bu konuda yapılan ilk tasarımlarda levhaların düzlem dışına buruşmasını önlemek için yatay ve düşey rijitleştirici berkitme levhaları kullanılmıştır. 1980'li yılların başında Kanada'da ise Japonya'daki çalışmaların aksine çok ince çelik levhalar ile ve rijitleştirici levha kullanılmayan çelik levhalı perdeler tasarlanmıştır. İlk defa Wagner (1931) tarafından ortaya atılan ince çelik levhaların buruşma sonrasında da yatay yükleri taşımaya devam etmesi ilkesinden yola çıkılarak ince çelik levhaların, çelik çerçeve içerisine yerleştirilmesiyle oluşturulan perdeler üzerine teorik ve deneysel çalışmalar

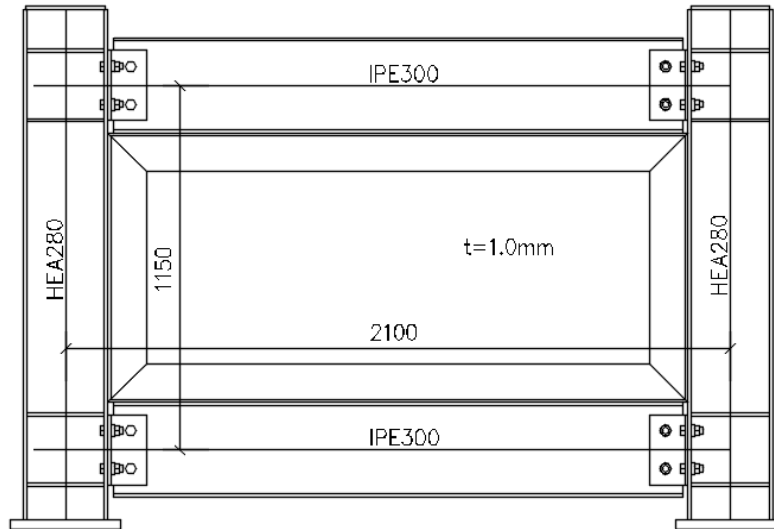
\*Corresponding author: Address: Hırka-i Şerif Mah. Adnan Menderes Bulvarı No:64 Fatih/İstanbul/TURKEY. E-mail address: sdusak@gmail.com, Phone: +905336320963

yapılmıştır [1,2]. Günümüzde Kanada ve Amerika’da çelik levha dolgulu perdeler ile ilgili tasarım ilkelerini içeren yönetmelikler bulunmaktadır. Ayrıca hem rijitleştirilmiş hem de rijitleştirilmemiş çelik levha dolgulu perdeler kullanılarak tasarlanmış pek çok yapı vardır [3,4]. Çelik levhalı perdelerin alternatif yatay yük taşıma sistemlerinden üstün yanları; başlangıç rijitliğinin yüksek olması, yüksek sünekliği, çok yüksek deplasman değerlerine kadar sistemin yük taşımaya devam etmesi ve çerçeveye sadece levha ilave edilerek çok yüksek yük değerleri elde edilmesidir.

Çelik levhalı perdelerle ilgili yapılmış olan çalışmalarda çerçevenin tepe noktasından deplasman kontrollü veya yük kontrollü olarak artan yatay yükleri temsil etmek üzere deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş olan çeşitli analitik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde çerçeve içerisine yerleştirilen çelik levhalar, levha düzleminde oluşan çekme gerilmeleri doğrultusunda tanımlanan iki ucu mafsallı çekme çubukları şeklinde modellenmiştir. Levhanın, birbirine paralel çekme çubukları şeklinde tanımlanmasıyla paralel çubuk modeli, farklı açılarla tanımlanmasıyla da farklı açılı çubuk modeli geliştirilmiştir. Sonlu eleman modeli oluşturularak yapılmış olan çalışmalar da bulunmaktadır. Konu ile ilgili yapılmış olan çalışmalarda çelik levhalı perdelerin çerçeve tasarımlarında farklı kolon kiriş birleşimleri kullanılmıştır. Birleşim aracına göre kaynaklı veya bulonlu, dönme rijitliğine göre ise rijit, yarı rijit veya mafsallı birleşimler kullanılmıştır.

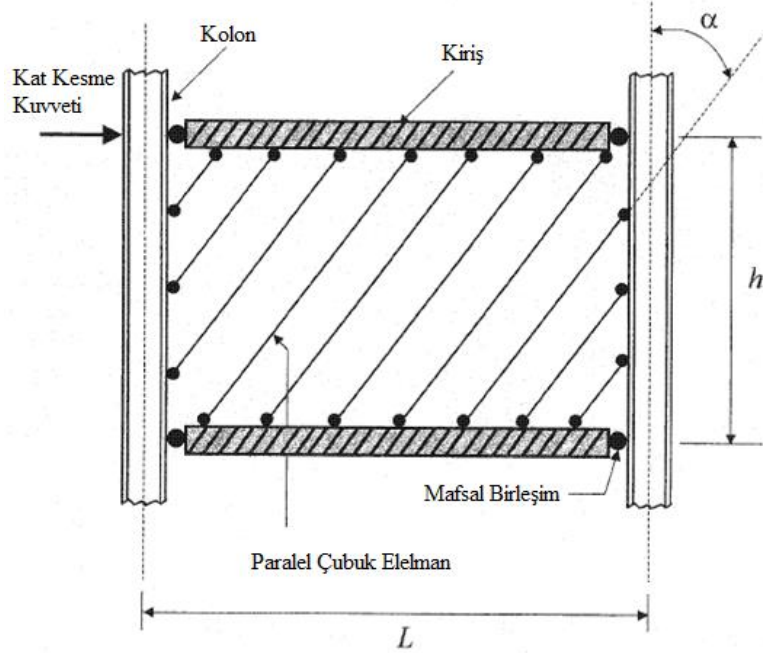
## 2. Amaç ve yöntem

Bu çalışmada analitik modellerden biri olan paralel çubuk modeli ile Sap2000 bilgisayar programından faydalanılarak çelik levhalı perde modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan analitik modelin statik itme analizi (pushover) ile yaptırılmıştır. Modelde Çelik levhalı perdenin çerçeve elemanları için S275, dolgu levhası için ise S235 çelik sınıfı tercih edilmiştir. Kolonlarda HEA280, kirişlerde ise IPE300 kesitli profil seçilmiştir. Model için seçilen levha kalınlığı 1.0mm’dir (Şekil 1).



Şekil 1. Analitik modele esas çelik levhalı perde

Çelik levhalı perde modellerinde kolon-kiriş birleşimlerinin rijitliklerinin artırılmasıyla sistemin yük-yer değiştirme eğrilerindeki değişiklikler incelenmiştir. Çelik levhalı perde tasarımı yapılırken en uygun kolon kiriş birleşim şeklini belirlemek ve öneride bulunmak hedeflenmiştir. Bu amaçla kolon kiriş birleşimleri farklı rijitliklere sahip olan üç model, paralel çubuk modeli kullanılarak hazırlanmıştır. Paralel çubuk modeli, diğer analitik modellere göre daha kolay sonuca ulaştıran bir modeldir [5]. Burada levha belirli aralıklarla ve eğim açısıyla çubuklara ayrılır. Çubuklardan her biri levhanın, belirlenen çubuk için kesit alanına eşdeğer bir alanı temsil etmektedir. Şekil 2’de de görüldüğü gibi uçlarındaki mafsallar yardımıyla çerçeve elemanlarına bağlanır. Çubuk kesitinin akma dayanımına karşı gelen yüklemeye çubukların mafsallaşacağı kabul edilir ve bu kabule göre sistemin bilgisayar modeli hazırlanmış olur. Sistemin göçme yükü, yük taşıma kapasitesindeki ani düşüşün meydana geldiği levhayı temsil eden her bir çubuk elemanının akması sonucu levhanın yük taşıma özelliğini kaybettiği andır [6, 7]. Kolon-kiriş birleşim şeklinin, çerçevenin yük-yerdeğiştirme eğrisine etkisini incelemek için çerçeve kirişlerinin kolona bağlanma şekillerine göre farklı moment dönme oranları için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Kolon-kiriş birleşiminin plastik mafsal kapasitesinin, kiriş plastik mafsal kapasitesine oranları % 0, % 10 ve %50 değerleri için yük-yerdeğiştirme eğrileri hazırlanmıştır. Burada % 0; kirişin kolon başlığına tam mafsallı olarak bağlanması durumunu, % 10 ve %50 ise kirişin kolon başlığına farklı dönme-rijitlik oranlarında yarı-rijit olarak bağlanması durumlarını ifade etmektedir.



Şekil 2. Thorburn ve ark. (1983) tarafından geliştirilen paralel çubuk modeli

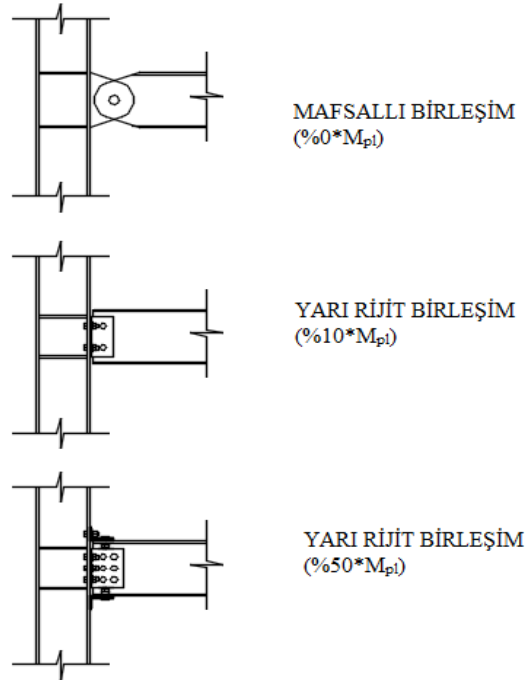
### 3. Kapsam

Bu çalışma kapsamında 3 adet çelik levhalı perde modeli hazırlanmıştır. Çelik çerçeve içerisine yerleştirilen levhalar üç modelde de sadece çekme gerilmelerini taşıyabilen iki ucu mafsallı çubuk elemanlar olarak tanımlanmıştır. Seçilen kolon-kiriş birleşimlerinin detayları ve birbirlerinden farkları ise aşağıda anlatılmıştır (Şekil 3). İlk modelde kirişlerin kolonlara kiriş gövdesinden tek

bulon ile bağlandığı, moment taşıma kapasitesi olmayan, herhangi bir plastik şekil değiştirme meydana gelmeden, birleşimin rahatlıkla dönebildiği, mafsallı birleşim tasarlanmıştır. Bu modeldeki çerçeve boş çerçeve olarak kullanılması durumunda uygulanacak yatay yükler karşısında labil olan bir sistemdir. Çerçeve içine yerleştirilen levhadan dolayı sistem labil olmaktan çıkmaktadır. Böylelikle levhalara kuvvet aktarımını daha kolay sağlamak suretiyle levhanın kendi başına (çerçeve etkisi olmadan) kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi ve araştırılan diğer parametrelerin değişimi izlenmek istenmiştir.

İkinci modelde kirişlerin kolonlara sadece kiriş gövdesinden çift taraflı korniyer ile bağlandığı yarı rijit bir kolon-kiriş birleşimi tasarlanmıştır. Bu birleşim tipinde birleşimin moment taşıma kapasitesi, çerçeve %5 ila %15'i arasında olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada bu değer kiriş plastik moment kapasitesinin %10'u ( $0.10 \cdot M_{pl}$ ) kabulü ile çalışmalara devam edilmiştir [8]. Bu birleşim şekli moment taşıma kapasitesinin çok düşük olmasından dolayı mafsala yakın davranış gösterdiği kabul edilmektedir. Bu birleşimin tercih edilmesinin diğer bir sebebi de uygulamada sık kullanılan moment aktarmayan birleşim türü olmasıdır.

Üçüncü modelde ise daha rijit bir kolon-kiriş birleşimi elde etmek için kirişlerin kolonlara kiriş başlığı ve gövdesinden çift taraflı korniyer ile bağlandığı, rijitliği daha yüksek olan yarı rijit bir kolon-kiriş birleşimi tasarlanmıştır. Bu birleşim tipinde birleşimin moment taşıma kapasitesi, çerçeve kirişinin plastik moment kapasitesinin %50'si ( $0.50 \cdot M_{pl}$ ) oranında olduğu kabul edilmiştir. Bu birleşim, dönme rijitliğinin artması durumunda sistem davranışına katkısı hakkında fikir sahibi olmak için seçilmiştir.



Şekil 3. Çelik levhali perde modellerinde kullanılan kolon-kiriş birleşimleri ve  $M_{pl}$  oranları

#### 4. Analitik Modelin Oluşturulması

Sistemin analitik modeli, Thorburn ve ark. (1983) tarafından geliştirilmiş olan “Paralel Çubuk Modeli” kullanılarak oluşturulmuştur. Bu modelde çerçeve içerisine yerleştirilen levhanın düzlemi doğrultusunda uygulanan yük etkisiyle buruşması sonrası oluşan diyagonal çekme bölgeleri Şekil 2’deki gibi birer çubuk olarak kabul edilir [5]. Thorburn ve ark. (1983) tarafından oluşturulmuş olan (1) numaralı formül ve daha sonra Timler ve Kulak (1983) [9,10] tarafından çerçeve kolonlarının eğilme rijitliklerinin de hesaba dahil edilmesi suretiyle geliştirilmiş ve böylece (2) numaralı formül ile çekme çubuklarının yönelim açısı hesaplanmaktadır [11].

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{Lt_p}{2A_c}}{1 + \frac{ht_p}{A_b}} \quad (1)$$

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_p L}{2A_c}}{1 + t_w h \left( \frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)} \quad (2)$$

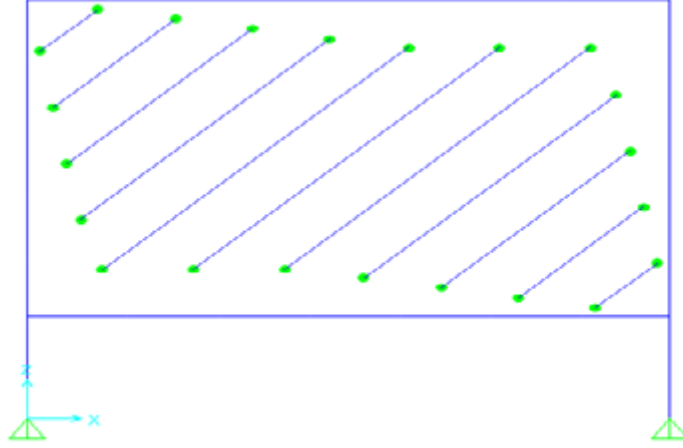
- $\alpha$  : Eğim açısı  
 L : Kolon aksları arası açıklık  
 t : Dolgu levhası kalınlığı  
 $A_b$  : Kiriş kesit alanı  
 $A_c$  : Kolon kesit alanı  
 $I_c$  : Kolon atalet momentidir.

Paralel Çubuk Modeli, levha boyunca yatay veya düşey rijitleştirici kullanılmayan çelik levhalı perdeler için geliştirilmiştir. Çerçevenin tepe noktasından uygulanan yatay yük altında levhanın buruşması öncesinde levhanın kayma rijitliği ihmal edilir. Sistemin ana yük taşıma mekanizması dolgu levhasının buruşması sonrası oluşan çekme çubuklarının davranışları ile şekillenmektedir. Bu çekme çubukları çerçeveye bağlandıkları uç noktaları mafsallı olarak tanımlanmakta yüklenme sonucu akmaya ulaştığı anda taşıma kapasitesini aşmış ve sistemden ayrılmış olmaktadır. [12,13,14]. Çalışmamızda yukarıda kısaca anlatılan paralel çubuk modeli, Sap2000 bilgisayar programı [15] ile oluşturulmuştur (Şekil 4).

## 5. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve değerlendirme

Çerçevadaki kolon-kiriş birleşimi rijitliklerinin değiştirilmesiyle sistem davranışındaki rijitlik, yük taşıma ve enerji yutma kapasitesindeki değişiklikleri izlemek için her modelin yük-yer değiştirme eğrileri hazırlanmıştır. Bu doğrultuda kolon-kiriş birleşiminin rijitlik oranlarına göre levhalı ve levhasız yük-yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırma kolaylığı açısından aynı grafik üzerinde verilmiştir. Mafsallı birleşim kullanılan çelik levhalı perde modelinde 37.0mm yer değiştirmede 319 kN yük değerine ulaşılmıştır (Şekil 5). Kolon kiriş birleşim rijitliği kiriş plastik moment kapasitesinin %10’u olan ikinci modelde boş çerçeve için 52 kN yük değerine ulaşıncaya plastikleşme oluşurken aynı çerçeveye çelik levha ilavesiyle 39.0mm yer değiştirmede 365 kN yük değeri elde edilmiştir (Şekil 6). Kolon kiriş birleşim rijitliği kiriş plastik moment kapasitesinin %50’si olan üçüncü modelde birleşim rijitliği daha yüksek olduğundan boş çerçeve için plastikleşmenin

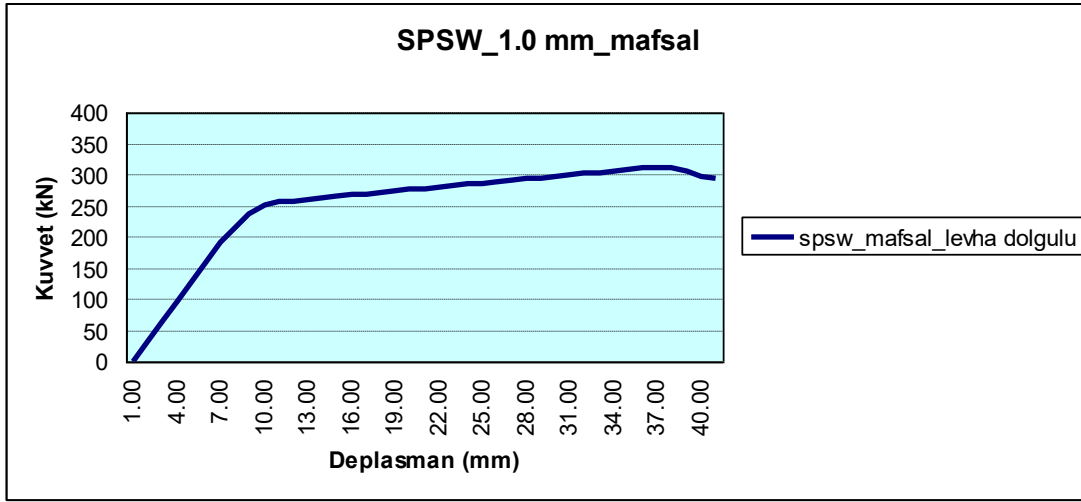
oluşturduğu yük değeri 278 kN yükselmiştir. Aynı çerçeveye çelik levha ilavesiyle 40.0mm yer değiştirme için 585 kN yük değeri elde edilmiştir (Şekil 7).



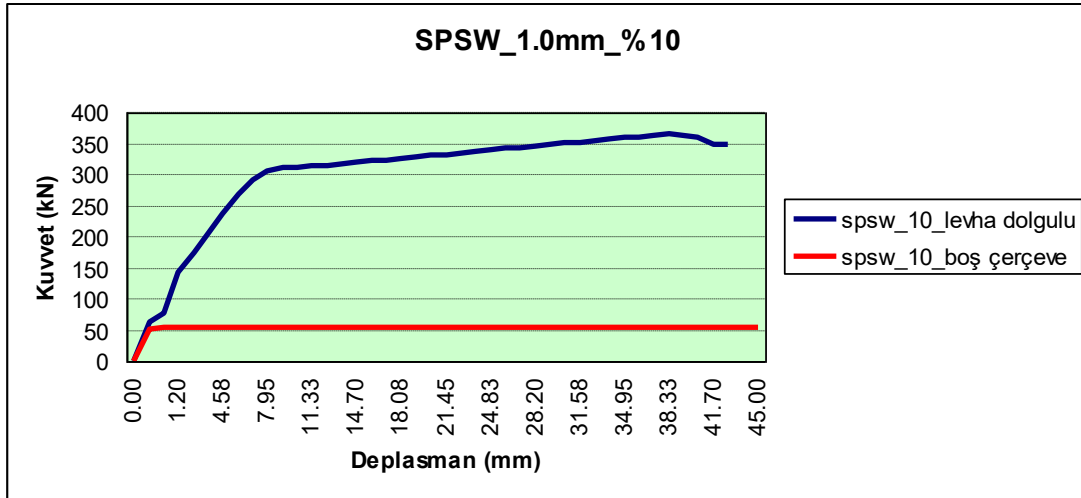
Şekil 4. Sap2000 Bilgisayar Programında Paralel Çubuk Modeline Göre Çelik Levhalı Perdenin Modellenmesi

Bu analitik ve parametrik çalışmaya ilave olarak kolon-kiriş birleşiminin tam rijit olması durumu için modellenen çelik levhalı perdenin analizi sonucunda lineer bir eğri elde edildiği ve herhangi bir plastikleşmenin olmadığı ayrıca levhalı ve levhasız durumların ikisi için de birbirine yakın grafikler elde edildiği görülmüştür. Buna göre kolon-kiriş birleşiminin rijit olması durumunda çerçeve içerisine ilave edilen levhanın, çerçevenin sünekliğine, enerji yutma kapasitesine ve maksimum yük taşıma kapasitesine katkısının toplam sünekliğe ve toplam enerji yutma kapasitesine oranla az olduğu sonucuna varılmıştır. Görüldüğü gibi birleşimin rijitliği arttığı oranda bu artışa bağlı olarak yük değerlerinde de artış olmuştur. Ancak rijitlik arttıkça çelik levhanın çerçeveye katkısı olan bu artış oranı azalmaktadır. Elde edilen eğrilerden kolon kiriş birleşiminin tam mafsalı veya mafsala yakın oranda moment aktarma kapasitesine sahip bir rijitlikte olması durumlarında levhanın çerçeve davranışına katkısı daha belirgin olmaktadır.

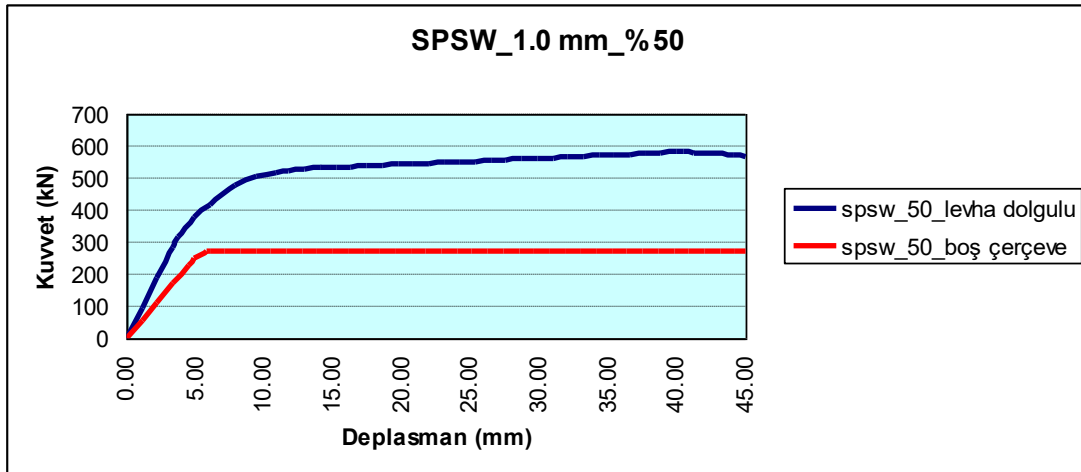
Literatürde, farklı birleşim şekilleri ve tasarımlarla 3 açıklıklı ve 12 katlı bir çerçeve modeli üzerinde en iyi ve en kötü sonucu verecek olan çözümler elde etmek için yapılan bir dizi analitik çalışma sonucu kiriş-kolon bağlantılarının rijit olduğu modelin en yüksek yük ve enerji sönümlenme değerlerini verdiği, bunun yanında çelik levha ilave edildiği durumlarda kiriş-kolon birleşimlerinin, sistemin yatay rijitliğine katkısının az olduğu belirtilmiştir [16]. Farklı rijitliğe sahip olan farklı kolon kiriş birleşimleri seçilerek yapılmış olan bir dizi büyük ölçekli deneysel ve analitik çalışma sonucunda birleşim rijitliği yüksek olan deney numunelerinde daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve süneklik elde edildiği görülmüştür [17]. Yaptığımız çalışmalarda da benzer şekilde birleşim rijitliğinin artmasıyla daha yüksek yük, rijitlik ve sönümlenen enerji değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Mafsallı kolon-kiriş birleşimi için Taban kesme kuvveti-yer değiştirme Eğrisi



Şekil 6. Kolon-kiriş birleşim rijitliği %10\* $M_{pl}$  olan çerçevede taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi



Şekil 7. Kolon-kiriş birleşim rijitliği %50\*  $M_{pl}$  olan çerçevede taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi

## 6. Sonuç

Hazırlanan çelik levhalı perde modellerinde yapılan analitik çalışmalar sonucunda çelik levhanın çerçeveye katkısını en iyi şekilde görmek için daha rijit bir kolon kiriş birleşimi yerine mafsallı birleşime daha yakın davranış gösteren ve uygulamada sıklıkla kullanılan çift tarafından korniyerle kirişe bağlanan yarı rijit bir birleşim kullanılmasının daha uygun olacağı anlaşılmıştır. Bununla birlikte levhasız durumda labil sistem seçilmesi durumunda yükleme öncesi levhanın düzlem dışı düzensizliği elde edilen sonuçların değerlendirmesini zorlaştıracaktır. Bütün durumlarda çerçeveye ilave edilen levhanın sistem davranışına olumlu katkısının olduğu ve sitem başlangıç rijitliğini, yük taşıma kapasitesini, enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini arttırıcı yönde etkide bulunduğu görülmüştür.

## Kaynaklar

- [1] Behbahani, M., 2003, Cyclic Behaviour of Unstiffened Steel Plate Shear Walls, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
- [2] Ericksen, J., Sabelli, R., 2008, A Closer Look at Steel Plate Shear Walls, Modern Steel Construction, January 2008.
- [3] Driver, R.G., 1997, Seismic behavior of steel plate shear walls. Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
- [4] Rezai, M., 1999, Unstiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading. Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada
- [5] Thorburn, L. J. and Kulak, G. L., 1983, Analysis of steel plate shear walls, Structural Engineering Report, 107, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada
- [6] Caccese, V., Elgaaly, M., and Chen, R., 1993, Experimental Study of Thin Steel-Plate Shear Walls Under Cyclic Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 2, February, pp. 573-587
- [7] Elgaaly, M., and Liu, Y., 1997, Analysis of Thin Steel Plate Shear Walls, Journal of Structural Engineering, ASCE Vol. 123 No. 11 pp. 1487-1496, November
- [8] Vatansever, C., Yardımcı, N., 2007. İnce Levhalı Çelik Perdelerin Artan Yatay Yükler Altında Analitik Olarak İncelenmesi, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 October 2007, İstanbul
- [9] Timler, P., 1998, Design procedures development, analytical verification, and cost evaluation of steel plate shear wall structures. Earthquake Engineering Research Facility, Technical report no. 98-01, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada
- [10] Timler, P. A. and Kulak, G. L. (1983). "Experimental study of steel plate shear walls." Structural Engineering Report, 114, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada.
- [11] Vatansever, C., Yardımcı, N., 2005. İnce Levhalı Bir Çelik Perdenin Artan Yatay Yük Altında Analitik Olarak İncelenmesi, Bildiriler Kitabı, Çelik Yapılar Sempozyumu, 21-22 Nisan
- [12] Timler, P.A., and Kulak, G.L., 1983, Experimental study of steel plate shear walls, Structural Engineering Report, 114, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada
- [13] Tromposch, E.W., Kulak, G.L., 1987, Cyclic and Statik Behaviour of Thin Panel Steel Plate Shear Walls, Structural Engineering Report, No.145, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada
- [14] Sabori-Ghomi, S., and Roberts, T.M., 1991, Nonlinear dynamic analysis of thin steel plate shear walls, Computers and Structures, 39 (1/2):121:127
- [15] SAP2000 V14, Computers and Structures, Inc. 1995 University Ave. Berkeley, CA.
- [16] Xue, M. and Lu, L. W. (1994). "Interaction of infilled steel shear wall panels with surrounding frame members." Proc. Struct. Stability Res. Council Annu. Tech. Session, Bethlehem, Pa., 339-354.
- [17] Vatansever, C. (2008). "Cyclic behavior of thin steel plate shear walls with semi-rigid beam-to-column connections." PhD Thesis, Istanbul Technical University, Institute of Science, Istanbul, Türkiye.