

## Perde-Çerçeve Sistemlerde Rijitlik ve Kayma Merkezi

Kanat Burak Bozdoğan<sup>1,\*</sup>, Süleyman Aydın<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 17000, Çanakkale.

<sup>2</sup>Kırklareli Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, 39000, Kırklareli.

### Özet

Binalarda burulma olması durumunda yapıya ilave deprem kuvvetleri etkimekte ve iç kuvvetler ve yer değiştirmeler artmaktadır. Bu nedenle düşey taşıyıcı sistemlerin planda mümkün olduğunca burulma etkisini azaltıcı şekilde yerleştirilmesi önemlidir. Burulma etkilerini en aza indirmek için rijitlik merkezi ile ağırlık merkezinin mümkün olduğunca yakın olması gerekmektedir. Her ne kadar mevcut deprem yönetmeliklerinin birçoğunda analiz aşamasında rijitlik merkezinin belirlenmesine ihtiyaç duyulmasa da özellikle burulma etkilerinin azaltılması açısından rijitlik merkezinin yerinin bilinmesi önemlidir. Uygulamada rijitlik merkezi ve kayma merkezi kavramları zaman zaman karıştırılmakta ve yanlış olarak bulunabilmektedir. Perde-çerçeve sistemlerde perde ve çerçevede hâkim davranışın farklı olması nedeniyle, perde ve çerçevelerin boyutlarının yapı yüksekliği boyunca sabit olması durumunda bile rijitlik merkezi kattan kata değişmektedir. Rijitlik merkezi bu tür yapılarda bazı katlarda plan dışına bile çıkabilmektedir. Bu çalışmada öncelikle rijitlik merkezi ve kayma merkezi kavramları kısaca açıklanmıştır. Daha sonra rijitlik merkezi ve kayma merkezinin bulunması için bir yaklaşım önerilmiştir. Sunulan yaklaşım literatürden alınan iki örnek üzerinde uygulanarak elde edilen sonuçlar literatür ve ETABS yazılımı ile karşılaştırılmış ve sunulan yöntemin uygunluğu gösterilmiştir.

### Anahtar Sözcükler

Rijitlik Merkezi, Burulma, Kayma Merkezi

## Center of Rigidity and Center of Shear in Wall-Frame Systems

### Abstract

In case of torsion in buildings, additional earthquake forces affect the structure and internal forces and displacements increases. For this reason, it is important to place the bearing systems in the plan as much as possible to reduce the torsion effect. To minimize torsion effects, the center of mass and center of rigidity should be as close as possible. Although most of the existing earthquake seismic codes do not require the determination of the center of rigidity in the analysis phase of the structures, it is important to determine the center of rigidity in terms of reducing the torsional effects. In practice, the concepts of center of rigidity and shear center are sometimes confused and found to be incorrect. Particularly in the structural system of wall-frame, due to the different behavior of wall and frame, the center of rigidity varies from the story to story even if the dimensions of the walls and frames are constant throughout the height of the structure. In such buildings, the center of rigidity may even go out of plan on some storey. In this study, firstly the concepts of center of rigidity and shear center in multi-storey buildings are briefly explained. An approach was then proposed to find the center of rigidity and the shear center. The presented approach was applied on two examples taken from the literature and the results were compared with the literature and ETABS software and the suitability of the presented method was demonstrated.

### Keywords

Center of Rigidity, Torsion, Shear Center

### 1. Giriş

Binalar projelendirilirken, taşıyıcı sistemin bina planında mümkün olduğunca burulma etkilerini azaltıcı şekilde yerleştirilmesi yoluna gidilmektedir. Binalarda burulma etkilerini azaltmak için ağırlık merkezi ile rijitlik merkezinin mümkün olduğu kadar birbirine yakın olması gerekmektedir. Bu aşamada yapıların rijitlik merkezlerinin yerinin doğru belirlenmesi önemlidir. Uygulamada zaman zaman rijitlik merkezi ile kayma merkezi kavramı karıştırılmakta ve rijitlik merkezinin yeri yanlış olarak belirlenebilmektedir.

Rijitlik ve Kayma merkezlerinin belirlenmesi ile ilgili olarak literatürde bir dizi çalışma yapılmıştır. Cheung ve Tso (1986), düzensiz çok katlı binaların deprem yükleri altında analizi için gerekli olan eksantrisite kavramını inceledikleri çalışmalarında rijitlik merkezinin belirlenmesi için düzlem çerçeve modelinden yararlanmışlardır. Çalışmada rijitlik merkezinin yerinin rijitlik dağılımı ve uygulanan yükleme şekline bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir.

Bilyap vd. (1987) yazmış oldukları kitapta perde-çerçeve sistemlerin burulma analizi için bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada statik yükler dikkate alınmış olup rijitlik merkezinin belirlenmesi için yaklaşık bir yöntem önerilmiştir. Hejal ve Chopra (1989) çalışmalarında taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluşan asimetrik yapıların deprem davranışını incelemişlerdir. Çalışmada asimetrik yapılarda burulma ve öteleme hareketinin birbiriyle bağlantılı olduğu ifade edilmiş ve bağlantılı periyot ve modların bağlantısız periyotlar ve statik eksantrisiteye bağlı olarak bulunması için bağıntılar önerilmiştir.

Çelebi (1990) perde-çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların burulmalı analizi için iki farklı yöntem önermiştir. Yöntemlerden birisi “Sürekli Burulma Çubuğu Analjisi” olup diğeri ise “Üç diferansiyel Denklem Yöntemi” dir.

Çelebi ve Bilyap (1991) taşıyıcı sistemi perde çerçeve sistemlerden oluşan yapıların yatay yükler altında burulmalı analizi için “Sürekli burulma çubuğu analjisi” yöntemini önermişlerdir. Çalışmada çerçevelerdeki eksenel yer değiştirmeler dikkate alınmıştır.

Goel ve Chopra (1993) çalışmalarında rijitlik merkezinin belirlenmesini gerektiren deprem yönetmeliklerinin kullanılması durumunda, analiz rijitlik merkezini belirlemeden gerçekleştirmek için bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların rijitlik merkezinin bulunması için matris yöntem ve düzlem çerçeve analizi yaklaşımı önerilmiştir.

Ertutar (1997) taşıyıcı sistemi perde-çerçevelerden oluşan yapılarda burulma düzensizliğinin belirlenmesi için Diferansiyel denklem yöntemini esas alan bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada perde ve çerçeveler için yatay rijitlik değerleri tanımlanmış ve yatay rijitlik değerlerine bağlı olarak tüm sistem için burulma rijitliği bağıntısı önerilmiştir. Bulunan burulma rijitliği bağıntısı kullanılarak kat dönmeleri hesaplanmıştır. Çalışmada yaklaşık bir rijitlik merkezi tanımlanmıştır.

Wilkinson ve Thambiratnam (2001) çalışmalarında asimetrik yapıların deprem yükleri altındaki analizi için basit bir yöntem önermişlerdir. Yöntem kayma giriş modelinin değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda çözülen örnekten yöntemin sonlu elemanlar yöntemi ile uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Basu ve Jain (2007) asimetrik yapılarda rijitlik merkezinin yerinin belirlenmesi için bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada literatürde rijitlik merkezi için kullanılan iki tanımlama da dikkate alınmıştır.

Rafezy ve Howson (2009) çalışmalarında planda her iki asal eksen yönünde asimetrik yerleştirilmiş ve taşıyıcı sistem boyutları yapı yüksekliği boyunca orantılı olarak değişmeyen yapılarda rijitlik merkezi ve kayma merkezinin belirlenmesi için yeni ve pratik bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem kuvvet metodunu esas almaktadır. Çalışmanın sonunda yöntemin uygunluğunu araştırmak üzere literatürden alınan bir örnek çözümlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Georgoussis (2010) çalışmasında asimetrik yapıların burulmalı dinamik analizinde modal rijitlik merkezi kavramını önermiş ve bu merkezin nasıl bulunacağını ayrıntılı olarak açıklamıştır.

Özmen vd. (2014) çalışmalarında deprem yönetmeliğinde yer alan burulma düzensizliğini incelemişlerdir. Çalışmada burulma düzensizliği katsayısının kat sayısı azaldıkça arttığı ve en büyük burulma düzensizliği katsayısının tek katlı yapıda ortaya çıktığı gösterilmiştir. Ayrıca burulma düzensizliği katsayısının perdeli asimetrik yapılarda perdelerin kütle merkezine yakın yerleştirilmesi durumunda en büyük değere ulaştığı gösterilmiştir.

Doudoumis ve Doudoumis (2017), çalışmalarında çok katlı ortogonal veya ortogonal olmayan yapılarda her türlü yatay statik yük ve modal yüklemeye altında rijitlik merkezinin bulunması için bir yöntem önermişlerdir. Yöntemin uygulanması iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Birinci yaklaşımda doğrudan matris analiz ile çözüm yapılabilirken diğer yaklaşımda ise SAP2000 gibi yapı analiz programları kullanılarak rijitlik merkezi bulunabilmektedir.

Bakas (2017) çalışmasında binalarda burulmanın kesme kuvveti büyütmesine olan etkisini incelemiştir. Çalışmada Burulma oranı indeksi ile kesme kuvveti büyütmesi arasındaki ilişki teorik olarak gösterilmiştir. Ayrıca kesme kuvvetindeki büyütmenin taşıyıcı sistemlerin bina içindeki dağılımına bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Literatürde yapılan bazı çalışmalar ise doğrudan rijitlik merkezini belirlemek yerine burulmayı minimum yapacak bir eksen belirlenmesini içermektedir.

Makarios ve Anastasiadis (1998a, 1998b), Marino ve Rossi (2004), Makarios (2005) yaptıkları çalışmalarda rijitlik merkezinin tayini yerine yapı düşey ekseninde optimum dönmeyi sağlayacak bir dönme eksenini belirlemişlerdir.

Yiu vd. (2014) asimetrik çok katlı yapıların bağlantılı titreşim analizi için pratik bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada, kütle merkezi, uygulanan bir dönüşüm ile bütün kat döşemelerinin dönmelerinin karelerinin toplamının karekökünü en küçük yapan bir referans noktasına taşınmıştır. Bu dönüşüm yardımıyla sistemin periyot ve modları bağlantısız periyot ve modların yardımıyla kolaylıkla elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda yöntemin uygunluğu gösterilmiştir.

Ülkemizde burulmalı yapıların analizi ile ilgili olarak Günay Özmen ve Adnan Çakıroğlu'nun çalışmaları önemli kaynaklar olarak kullanılmışlardır (Özmen 1972; Çakıroğlu vd. 1978).

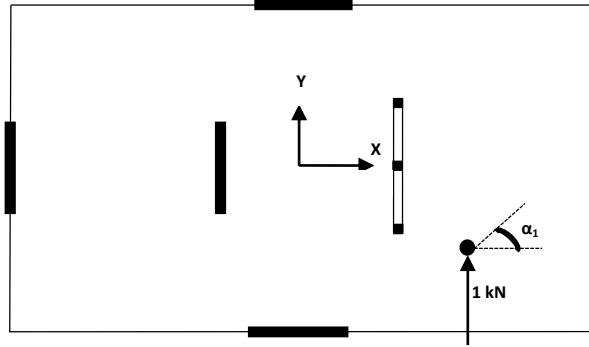
Bu çalışmada ise perde-çerçeve sistemlerde kayma ve rijitlik merkezinin belirlenmesi için indirgenmiş rijitlik matrislerinin kullanıldığı bir yaklaşım önerilmiş ve iki örnek üzerinde uygulaması gösterilmiştir. Sunulan yaklaşımda malzemenin lineer elastik olduğu, geometrik nonlineer etkilerin ihmal edilebilecek mertebede olduğu ve döşemelerin kendi düzlemleri içinde yeteri kadar rijit olduğu düzlemleri dışında ise rijitliklerinin küçük olduğu kabulleri yapılmıştır.

## 2. Rijitlik ve Kayma Merkezi Kavramları

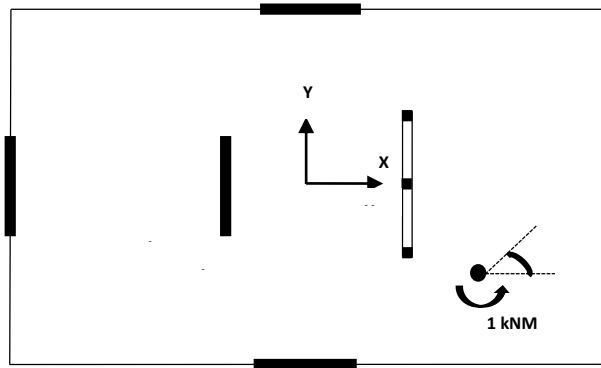
Literatürde kayma merkezi, her katta taşıyıcı sistemlere etkiyen kesme kuvvetlerinin o kat içindeki kesişme noktası olarak tanımlanırken, rijitlik merkezi için literatürde iki farklı tanım bulunmaktadır. Bunlardan daha yaygın olarak kullanılan tanıma göre rijitlik merkezi binada yalnızca öteleme olması için her katta dış yüklerin uygulanması gereken noktalar kümesi olarak tanımlanmaktadır. ETABS gibi yazılımların kullanmış olduğu tanıma göre ise rijitlik merkezi i. kat döşemesi hariç diğer katlardaki döşemelerin bina düşey eksenine etrafında dönme hareketi yapabilmemesine karşın i. kat döşemesinin yalnız öteleme hareketi yapması için o katta dış kuvvetin uygulanması gereken nokta olarak tanımlanmaktadır. Her kat döşemesi için aynı tanımla bulunan noktaların toplamı ise binanın rijitlik merkezi olarak tanımlanmaktadır. ETABS'ta Şekil 1'de gösterildiği üzere i. kat döşemesinin rijitlik merkezinin bulunması için o kat döşemesi üzerindeki herhangi bir noktaya önce bir birimlik yatay kuvvet uygulanmakta ve bu kuvvet altında o noktanın dönmesi ( $\Theta_F$ ) bulunmaktadır. Daha sonra Şekil 2'de gösterildiği üzere aynı noktaya bu sefer yalnızca 1 birimlik burulma momenti uygulanmakta ve aynı noktanın dönmesi ( $\Theta_M$ ) belirlenmektedir. Bu işlemlerden sonra i. katın x eksenine göre rijitlik merkezi koordinatı Denklem 1'deki bağıntı ile y eksenine göre rijitlik merkezi koordinatı ise Denklem 2'deki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$x_{ri} = -\frac{\theta_{XF}}{\theta_{XM}} \quad (1)$$

$$y_{ri} = \frac{\theta_{YF}}{\theta_{YM}} \quad (2)$$



Şekil 1: i. kat döşemesine 1 birimlik yatay kuvvet uygulanması



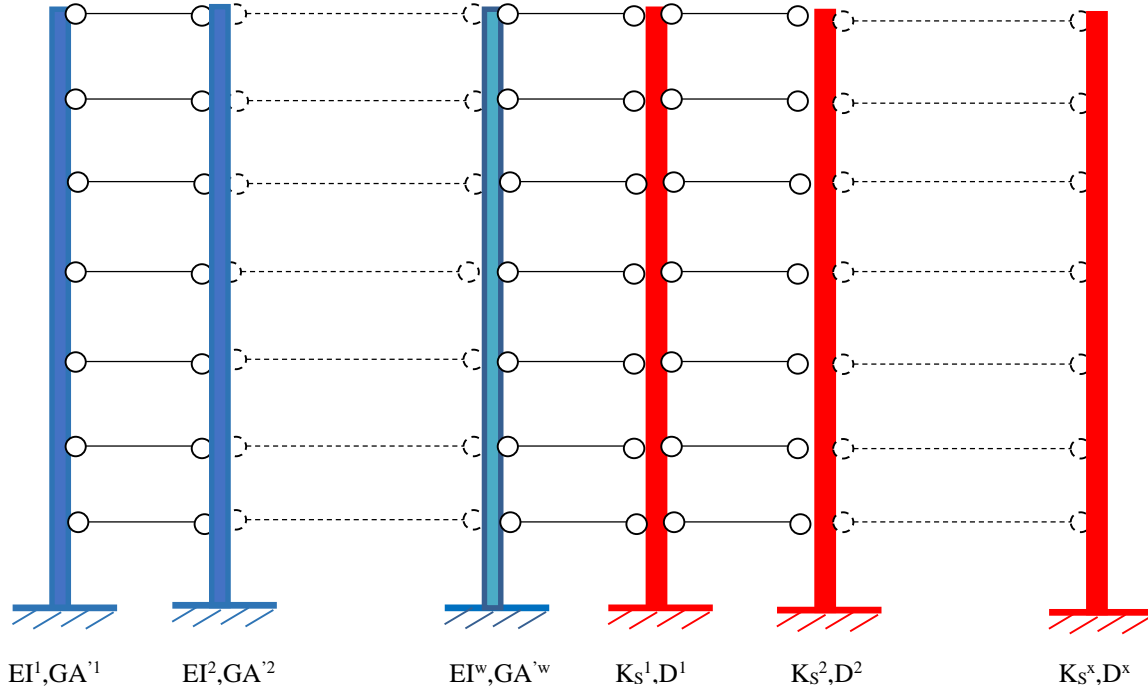
Şekil 2: i. kat döşemesine 1 birimlik burulma momenti uygulanması

## 3. Yöntem

Perdelerin yatay yükler altındaki toplam yer değiştirmeleri eğilme ve kayma yer değiştirmelerinin toplamından oluşmaktadır. Ancak yüksek yapılarda bu yer değiştirmelerden eğilme yer değiştirmesi daha baskın olduğu için genel olarak perdeler eğilme yapısı olarak adlandırılmaktadır. Buna karşın çerçevelerin yatay yükler altındaki yer değiştirmeleri kayma yer değiştirmeleri ile aksenal yer değiştirmelerinin oluşturmuş olduğu eğilme türü yer değiştirmelerin toplamından oluşmaktadır. Çerçeve sistemlerde hâkim yer değiştirme kayma yer değiştirmeleri olduğundan bu tür yapılar "kayma yapısı" olarak adlandırılmaktadır.

Bu iki yapının beraber davranışı eğilme +kayma davranışlarının toplamından oluşmaktadır. Bu tür yapılarda alt katlarda yer değiştirmede eğilme davranışı hâkimken üst katlara doğru çıkıldıkça hâkim davranış kayma davranışı olmaktadır.

Burulmasız perde-çerçeve sistemler yatay yükler altında Şekil 3'te görüldüğü gibi temsil edilebilirler (Potzta ve Kollar 2003; Bozdoğan ve Öztürk 2010). Mavi renk ile gösterilen çubuklar perdeleri temsil ederken kırmızı ile gösterilen çubuklar ise çerçeveleri göstermektedir.



Şekil 3: Perde-çerçeve sistemlerin eşdeğer çubuk modeli

Burada  $EI$  ve  $GA$  sırasıyla perdelerin eğilme ve kayma rijitliğini göstermektedir. Buna karşın  $K_s$  ise çerçeve sistemin kayma rijitliğini göstermektedir.  $K_s$  birinci katta Denklem 3'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir (Haque 2017).

$$K_{s1} = \frac{12E}{\frac{1}{h_1} \left( \frac{4}{3s_1} + \frac{12}{43r_1} \right)} \quad (3)$$

Burada  $h_1$  birinci katın yüksekliğini,  $E$  elastisite modülünü,  $s_1$  ve  $r_1$  ise sırasıyla 1. katta ilgili çerçevede kolon ve kirişlerin redörleri toplamını göstermektedir.

Buna karşın diğer katlarda  $K_s$  ise Denklem 4'de verilen bağıntı ile hesaplanabilir (Murashev vd. 1976; Bilyap 1979; Ertutar 1995).

$$K_{si} = \frac{12E}{\frac{1}{h_i} \left( \frac{4}{3s_i} + \frac{12}{43r_i} \right)} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

Burada  $h_i$  i. kat yüksekliğini,  $s_i$  ve  $r_i$  sırasıyla hesaplanan çerçevede kolonların ve kirişlerin redörleri toplamını göstermekte olup sırasıyla Denklem 5 ve Denklem 6'da verilen bağıntılarla hesaplanır.

$$s_i = \sum_{i=1}^m \frac{I_{ci}}{h_i} \quad (5)$$

$$r_i = \sum_{i=1}^n \frac{I_{bi}}{l_i} \quad (6)$$

Burada  $I_{ci}$  i. kolon atalet momentini,  $I_{bi}$  i. kiriş atalet momentini,  $h_i$  i.kat yüksekliğini,  $l_i$  i. kiriş açıklığını,  $m$  i.kattaki toplam kolon sayısını ve  $n$  i. kattaki kiriş sayısı toplamını göstermektedir.  $D$  ise eksenel yer değiştirmelerin global rijitliğini göstermekte olup Denklem 7’de verilen bağıntı ile hesaplanır (Zalka 2001).

$$D_i = E \sum_{i=1}^m A_{ci} d_i^2 \quad (7)$$

Burada  $A_{ci}$  i. kolonun alanını göstermekte olup  $d_i$  ise i. kolonun kolonların merkezine olan uzaklığını göstermektedir. Buna göre yapı özelliklerinin yapı yüksekliği boyunca değişmediği yapılar için perde ve çerçeve sisteme ait fleksibilite matrislerinin elemanları Denklem 8 ile hesaplanır (Kilar ve Fajfar 1997).

$$f_{ij}^p = \frac{H_i^2}{6EI} (3H_j - H_i) + \frac{H_i}{GA'} \quad (8)$$

Çerçeve elemanlar için ise Denklem 8 benzer şekil de Denklem 9 şeklinde türetilir.

$$f_{ij}^c = \frac{H_i^2}{6D} (3H_j - H_i) + \frac{H_i}{K_s} \quad (9)$$

Burada  $H_i$  ve  $H_j$  sırasıyla i. ve j. katın yapı tabanından yüksekliğini,  $\chi$  indisi çerçeveleri ve p indisi perde elemanları göstermektedir.

Yapı özelliklerinin yapı yüksekliği boyunca değiştiği perde-çerçeve sistemlerde ise fleksibilite matrisi elemanları Denklem 10, Denklem 11, Denklem 12, Denklem 13, Denklem 14 ve Denklem 15’de verilen bağıntılarla hesaplanır (Kilar ve Fajfar 1997).

$$f_{ij}^p = f_{i-1,j}^p + f_{i-1,j}^{p'} h_i + \frac{1}{6EI_i} (3h_i^2 H_j - H_i^3 - 2H_{i-1}^3 + 3H_i H_{i-1}^2) + \frac{h_i}{G} \left( \frac{1}{A_i'} - \frac{1}{A_{i-1}'} \right) \quad (10)$$

$$f_{i,j}^{p'} = f_{i-1,j}^{p'} + \frac{1}{2EI_i} (2h_i H_j - H_i^2 + H_{i-1}^2) + \frac{1}{G} \left( \frac{1}{A_i'} - \frac{1}{A_{i-1}'} \right) \quad (11)$$

$$f_{0,j}^p = f_{0,j}^{p'} = 0 \quad (12)$$

$$f_{ij}^c = f_{i-1,j}^c + f_{i-1,j}^{c'} h_i + \frac{1}{6D_i} (3h_i^2 H_j - H_i^3 - 2H_{i-1}^3 + 3H_i H_{i-1}^2) + h_i \left( \frac{1}{K_{si}} - \frac{1}{K_{si-1}} \right) \quad (13)$$

$$f_{i,j}^{c'} = f_{i-1,j}^{c'} + \frac{1}{2D_i} (2h_i H_j - H_i^2 + H_{i-1}^2) + \left( \frac{1}{K_{si}} - \frac{1}{K_{si-1}} \right) \quad (14)$$

$$f_{0,j}^c = f_{0,j}^{c'} = 0 \quad (15)$$

Verilen bağıntılarda  $H_j > H_i$  dir. Perde ve çerçevelerin rijitlik matrisi ise fleksibilite matrislerinin tersi alınarak sırasıyla Denklem 16 ve Denklem 17’de verilen bağıntılarla hesaplanır.

$$k^p = (f^p)^{-1} \quad (16)$$

$$k^c = (f^c)^{-1} \quad (17)$$

Binada  $w$  adet perde ve  $x$  adet çerçeve olması durumunda binanın toplam rijitlik matrisi elemanlarının indirgenmiş rijitlik matrisleri toplamı olarak 18 nolu denklem kullanılarak elde edilir. Sistem rijitlik matrisinin boyutu kat sayısı\*kat sayısı kadardır.

$$k = \sum_{i=1}^w k_i^p + \sum_{i=1}^x k_i^c \quad (18)$$

F dış yükleri altında kat yer değiştirmeleri Denklem 19'da verilen bağıntıyla hesaplanır.

$$\Delta = k^{-1}F \quad (19)$$

Burada F dış yük vektörü ile  $\Delta$  yatay kat yer değiştirmelerini gösteren deplasman vektörünün boyutu kat sayısı\*1'dir. Kat yer değiştirmeleri hesaplandıktan sonra perde ve çerçeve elemanlarına gelen kuvvetler sırasıyla Denklem 20 ve Denklem 21'de verilen bağıntılarla hesaplanır.

$$F_i^p = k_i^p \Delta \quad (20)$$

$$F_i^p = k_i^p \Delta \quad (21)$$

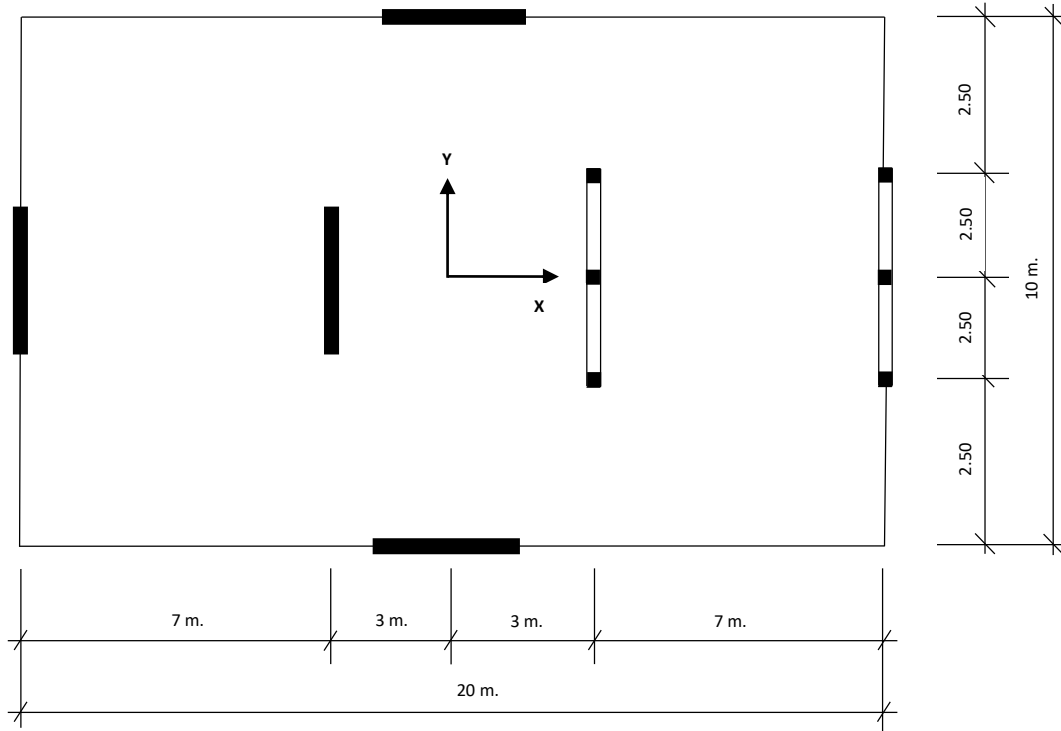
Perde ve çerçevelere gelen kat kuvvetleri bulunduktan sonra perde ve çerçevelere düşen kat kesme kuvvetleri bulunur. i. katta bulunan dış kuvvetlerin o kattaki kesişme noktası rijitlik merkezinin o kattaki yerini verir. Benzer şekilde i. katta kesme kuvvetlerinin o kattaki kesişme noktası ise kayma merkezini verir.

#### 4. Örnekler

Bu bölümde çalışma kapsamında sunulan yöntemin uygunluğunu göstermek üzere iki örnek çözülmüştür. Birinci örnekte taşıyıcı sistemi perde-çerçeve sistemlerden oluşan bir örnek ele alınarak rijitlik ve kayma merkezi hesaplanmış ve sonuçlar literatür ile karşılaştırılmıştır. İkinci örnekte ise taşıyıcı sistemi dolu perdelerden oluşan bir bina ele alınarak rijitlik merkezi bu çalışmada önerilen yöntemle çözümlenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

##### 4.1 Örnek 1

Bu örnekte literatürden (Rafezy ve Howson 2009) alınan ve Şekil 4'de planı verilen kat yükseklikleri 3 'er metre olan 9 katlı perde-çerçeve sistemi ele alınmıştır. Bu çalışmada verilen yaklaşım ile genel kabul gören rijitlik merkezi ve kayma merkezinin x koordinatları üçgen yayılı yük etkisi altında bulunmuş olup sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Sistemde eğilme- kayma davranışını daha iyi göstermesi açısından kirişlerin rijitliği sonsuz olarak dikkate alınmıştır. Perdelerin atalet momenti  $I=0.445 \text{ m}^4$ 'dir. Kolonların atalet momenti ise  $I=2.7375 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$  olarak alınmıştır. Elastisite modülü ise  $E=2 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  'dir. Perdelerin kayma yer değiştirmeleri ile kolonların aksel yer değiştirmeleri örnekte ihmal edilmiştir.



Şekil 4: Birinci örneğe ait plan

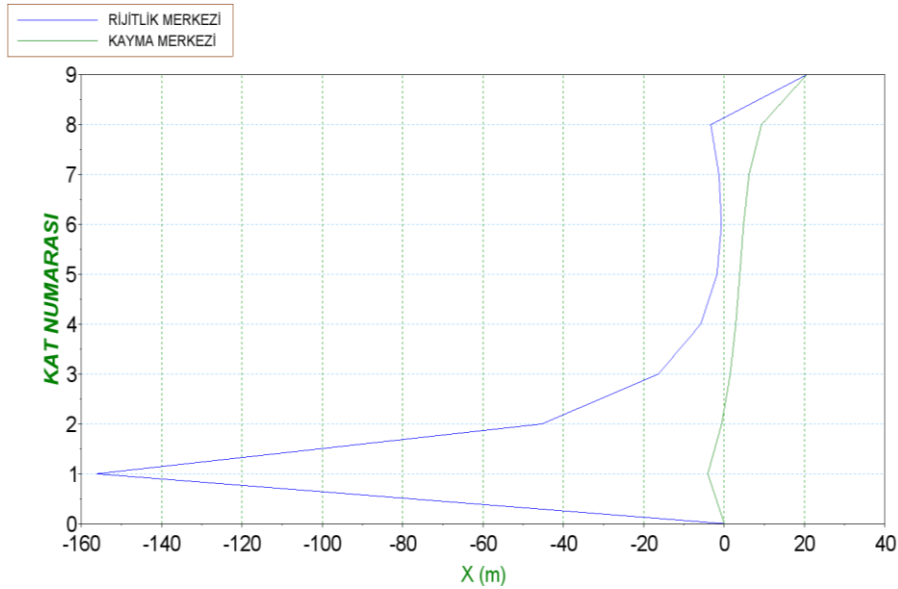
Tablo 1: Uygulama 1 için rijitlik merkezinin x koordinatının yeri (m)

Kat	Rafezy Howson (a)	Sunulan Yaklaşım (İndirgenmiş) (b)	Fark % (b-a)/a
9	20.45	20.47	0.10
8	-3.42	-3.38	-1.17
7	-1.31	-1.34	2.29
6	-0.70	-0.71	1.43
5	-1.82	-1.82	0
4	-5.85	-5.87	0.34
3	-16.39	-16.41	0.12
2	-45.42	-45.41	-0.02
1	-155.94	-156.27	0.21

Tablo 2: Uygulama 1 için koordinatının kayma merkezinin yeri (m)

Kat	Rafezy Howson	Sunulan Yaklaşım (İndirgenmiş)	Fark % (b-a)/a
9	20.42	20.47	0.24
8	9.22	9.24	0.22
7	6.14	6.16	0.33
6	4.77	4.78	0.21
5	3.83	3.84	0.26
4	2.83	2.85	0.71
3	1.46	1.47	0.68
2	-0.66	-0.66	-
1	-4.12	-4.12	-

Tablo 1'den görüldüğü üzere birinci katta rijitlik merkezi perde ve çerçeve sistemdeki davranış farkından dolayı binanın 146.27 m dışına çıkmıştır. Çalışmada sunulan yaklaşım ile bulunan rijitlik merkezi ve kayma merkezinin x koordinatının kattan kata değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: Rijitlik merkezi ve Kayma merkezinin kattan kata değişimi

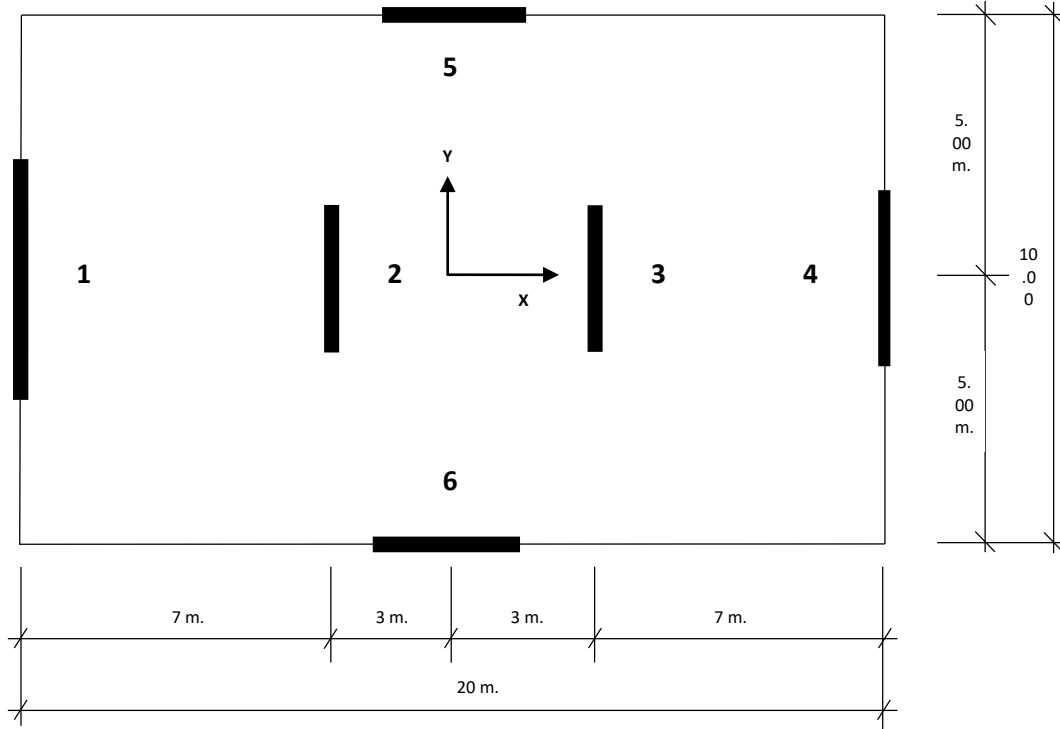
Şekil 5'ten görüldüğü üzere rijitlik merkezi ile kayma merkez çakışmamaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında ETABS hazır paket programı (ETABS 2019) ile sistem çözülerek rijitlik merkezi hesaplanmıştır. Bu çalışmadaki yaklaşım kullanılarak ETABS tarafından kullanılan Rijitlik merkezi tanımına uygun olarak Rijitlik merkezi hesaplanarak sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. ETABS (ETABS 2019) ile çözümde perdeler hem kabuk hem de eşdeğer çubuk elemanlarla modellenmiştir. Kabuk elemanlarla modellemde 8100 eleman kullanılmıştır.

Tablo 3: Uygulama 1 için rijitlik merkezinin x koordinatı (ETABS tanımı) (m)

Kat	ETABS (Shell) (a)	ETABS (Çubuk) (b)	Sunulan Yaklaşım (indirgenmiş) (c)	Fark % (c-a)/a	Fark % (c-b)/b
9	13.02	14.58	14.64	12.44	0.41
8	12.74	14.18	14.23	11.70	0.35
7	12.31	13.57	13.68	11.13	0.81
6	11.76	12.81	12.95	10.12	1.09
5	11.03	11.86	11.93	8.16	0.59
4	10.06	10.68	10.54	4.77	-1.31
3	8.77	9.20	8.69	-0.91	-5.54
2	7.12	7.45	6.46	-9.27	-13.29
1	5.26	5.61	4.39	-16.54	-21.75

#### 4.2 Örnek 2

Şekil 6 'da görülen ve taşıyıcı sistemi dolu perdelerden oluşan 9 katlı binanın x eksenli yönündeki rijitlik merkezi koordinatları bu çalışmada verilen yaklaşımla çözümlenerek literatürde (Doudoumis ve Doudoumis 2017) verilen sonuçlarla Tablo 5 'te karşılaştırılmıştır. Perdelerin eğilme ve kayma rijitlikleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 6: İkinci uygulamaya ait plan



Tablo 4: Perdelerin eğilme ve kayma rijitlikleri

Perde No	Kat	EI	GA'
1	1-6	18EI	2.32EI
	7-9	12EI	1.55EI
2	1-6	3EI	1.28EI
	7-9	2EI	0.85EI
3	1-6	3EI	1.28EI
	7-9	2EI	0.85EI
4	1-6	6EI	1.61EI
	7-9	4EI	1.07EI
5	1-6	7.5EI	1.73EI
	7-9	5EI	1.16EI
6	1-6	7.5EI	1.73EI
	7-9	5EI	1.16EI

\*EI= 6.4\*10<sup>6</sup> kNm<sup>2</sup>'dir.

Tablo 5: Uygulama 2 için Rijitlik merkezinin x koordinatı (m)

Kat	Doudoumis ve Doudoumis (Shell) (a)	Doudoumis ve Doudoumis (Çubuk) (b)	Sunulan Yaklaşım (indirgenmiş) (c)	Fark % (c-a)/a	Fark % (c-b)/b
9	-4.81	-4.81	-4.82	0.21	0.21
8	-2.71	-2.66	-2.67	-1.48	0.38
7	-2.69	-2.64	-2.68	-0.37	1.52
6	-6.90	-6.95	-7.02	1.74	1.01
5	-2.61	-2.56	-2.53	-3.07	-1.17
4	-3.37	-3.34	-3.35	-0.59	0.30
3	-2.75	-2.70	-2.73	-0.73	1.11
2	2.86	3.04	3.11	8.74	2.30
1	52.25	53.38	52.84	1.13	-1.01

Tablo 5'ten görüldüğü üzere sunulan yöntem ile elde edilen sonuçlar yeterli yakınsaklıktadır. Görüldüğü üzere perdelerin eğilme ve kayma rijitliklerinin farklı olması nedeniyle rijitlik merkezi kattan kata değişmektedir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada çok katlı yapılarda rijitlik merkezi ve kayma merkezi kavramları ele alınmış olup öncelikle bu iki kavramın tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra rijitlik merkezi ve kayma merkezinin hesaplanması için pratik bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmanın sonunda ise sunulan yaklaşımın uygunluğu literatürden alınan iki örnek üzerinde gösterilmiştir. Uygulamada zaman zaman aynı kavramlar olduğu kabul edilen rijitlik ve kayma merkezinin farklı olduğu çalışmada gösterilmiştir. Sunulan yöntem taşıyıcı sistem şeklinden (yalnızca perdelerden oluşan sistemler, yalnızca çerçevelerden oluşan sistemler veya perde-çerçeve sistemler) bağımsız olarak uygulanabilir. Sonuç olarak sunulan yaklaşım yeter derecede uygun sonuçlar vermiştir. Sunulan örnekten görüldüğü üzere rijitlik merkezi perde-çerçeve sistemlerde, perde ve çerçevenin davranışının farklı olması nedeniyle kattan kata değişmekte olup bazı katlarda plan dışına dahi çıkmaktadır. Benzer olarak taşıyıcı sistemi salt perdelerden oluşan yapılarda perdelerin eğilme ve kayma rijitliklerinin birbirinden farklı olması durumunda dahi rijitlik merkezi kattan kata değişmektedir. Ayrıca bu tür binalarda kayma merkezi ile rijitlik merkezinin yerlerinin farklı olduğu çözümlen örneklerden görülmektedir.

## Kaynaklar

- Bakas N., (2017), *Shear forces amplification due to torsion, explicit reliance on structural topology, Theoretical and numerical proofs using the Ratio of Torsion (ROT) concept*, Structural Engineering and Mechanics, 61(1), 15-29.
- Basu S., Jain S.K., (2007), *Alternative method to locate centre of rigidity in asymmetric buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36(7), 965-973.
- Bilyap S., (1979), *Betonarme yüksek yapılarda perde çerçeve sistemlerinin yatay kuvvetlere göre hesabı*, Ege Üniversitesi Matbaası, İzmir.

- Bilyap S., Ertutar Y., Alku Ö.Z., (1987), *Perde-çerçeve sistemlerinde burulma etkileri*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları MM/İNŞ-87 EY 131, İzmir.
- Bozdoğan K.B., Öztürk D., (2010), *An approximate method for lateral stability analysis of wall-frame buildings including shear deformations of walls*, Sadhana, 35(3), 241-253.
- Cheung V.W.T., Tso W.K., (1986), *Eccentricity in irregular multistory buildings*, Canadian Journal of Civil Engineering, 13(1), 46-52.
- Çakıroğlu A., Özmen G., Özer E., (1978), *Betonarme sistemlerin yatay yüklere göre projelendirilmesi*, İMO İstanbul Şubesi, Kazmaz Matbaası, İstanbul.
- Çelebi Ü., (1990), *Burulma yapan çok katlı perde-çerçeve sistemlerinin yatay yüklere göre hesabı için iki ayrı yeni yöntem*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Çelebi Ü., Bilyap S., (1991), *Burulmalı Perde-Çerçeve sistemlerinin hesabında sürekli burulma çubuğu analojisi yöntemi*, Türkiye İnşaat Mühendisliği 11. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı Cilt 1, 8-11 Ekim, İstanbul. ss.62-73.
- Doudoumis I.N., Doudoumis N.I., (2017), *Centres of rigidity in multi-storey asymmetric diaphragm systems for general lateral static loading*, Engineering Structures, 150, 39-51.
- Ertutar Y., (1995), *Betonarme yüksek yapılarda yatay yük etkisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- Ertutar Y., (1997), *Yatay kuvvetler etkisindeki perde-çerçeve sistemlerinin burulmalı çözümü*, Yeni Deprem Yönetmeliği ve Uygulama Sorunları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 33-39, İzmir.
- ETABS, (2019), *Structural Software for Building Analysis and Design*, Evaluation Version, <https://www.csiamerica.com/products/etabs>, [Erişim 15 ocak 2019].
- Goel R.K., Chopra A.K., (1993), *Seismic Code Analysis of Buildings without Locating Centers of Rigidity*, Journal of Structural Engineering, 119(10), 3039-3055.
- Georgoussis G.K., (2010), *Modal rigidity center: it's use for assessing elastic torsion in asymmetric buildings*, Earthquakes and Structures, 1(2), 163-175.
- Haque A., (2017), *Approximate Lateral Deflection of Moment-Resisting Frames*, Yayınlanmamış Notlar.
- Hejal R., Chopra A.K., (1989), *Earthquake response of torsionally coupled Frame buildings*, Journal of Structural Engineering, 115(4), 852-867.
- Kılar V., Fajfar P., (1997), *Simple Pushover Analysis of Asymmetric Buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26, 233-249.
- Yiu C.F., Chan C.M., Huang M., Li G., (2014), *Evaluation of lateral-torsional coupling in earthquake response of asymmetric multistory buildings*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23(13), 1007-1026.
- Makarios T., Anastasiadis K., (1998a), *Real and fictitious elastic axes of multi-storey buildings: theory*, The Structural Design of Tall Buildings, 7(1), 33-55.
- Makarios T., Anastasiadis K., (1998b), *Real and fictitious elastic axes of multi-storey buildings: applications*, The Structural Design of Tall Buildings, 7(1), 57-71.
- Marino E. M., Rossi P.P., (2004), *Exact evaluation of the location of the optimum torsion axis*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 13(4), 277-290.
- Makarios T.K., (2005), *Optimum torsion axis to multistorey buildings by using the continuous model of the structure*, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 14(1), 69-90.
- Murashev V., Sigalov E., Baikov V.N., (1976), *Design of reinforced concrete structures*, Mir Publishers, Moscow, 596 ss.
- Özmen G., (1972), *Burulma yapan çok katlı yapıların yatay yüklere göre hesabı*, İTÜ İnşaat Fakültesi, Teknik Rapor No:13, İstanbul.
- Özmen G., Girgin K., Durgun Y., (2014), *Torsional irregularity in multi-story structures*, International Journal of Advanced Structural Engineering, 6(4), 121-131.
- Potzta G., Kollar L.P., (2003), *Analysis of building structures by replacement sandwich beams*, International Journal of Solids and Structures, 40(3), 535-553.
- Rafezy B., Howson W.P., (2009), *A New and Practical Approach for Calculating the Static Eccentricity of Doubly Asymmetric, Non-proportional, Multi-storey Buildings*, Proceedings of the World Congress on Engineering'in İçinde, (Alterman R., Kirsh D., Ed.), London, U.K.
- Wilkinson S., Thambiratnam D., (2001), *Simplified procedure for seismic analysis of asymmetric buildings*, Computers & Structures, 79(32), 2833-2845.
- Zalka K., (2001), *A simplified method for calculation of the natural frequencies of wall-frame buildings*, Engineering Structures, 23(12), 1544-1555.