

# Deprem etkisi altındaki simetrik ve asimetrik yapıların, lineer olmayan tepkilerine dolgu duvarlarının katkısı

**Deniz GÜNEY\***, **M. Hasan BODUROĞLU**

*İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Tasarım aşamasında, dolgu duvarların rijitliklerinin yapı davranışına katkısı dikkate alınmamaktadır. Ancak bu elemanların sahip oldukları rijitliğin, yapıların gerek simetrik gerekse asimetrik plana sahip olması durumunda, deprem etkisi altında, yapı davranışını etkilemesi beklenmelidir. Burulma tepkisi beklenmeyen simetrik planlı yapılarda, duvar etkisi ile burulma tepkisi ortaya çıkabilmektedir. Bu etkileri inceleyebilmek için seçilen simetrik ve asimetrik yapı modelleri hesaplanarak, farklı deprem etkileri altında tepkileri yorumlanmıştır. Taşıyıcı elemanlar ve duvarlar, malzeme bakımından lineer olmayan şekilde modellenmiştir. Yazılan programda "Durum Uzayı" yöntemiyle sayısal integrasyon yapılarak, yapı dinamik tepki karakteristikleri elde edilmiş, bulunan verilerin karşılaştırılmasına dayanarak duvarların, yapıların dinamik ötelenme ve burulma tepkisine yaptığı katkılar gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** *Burulma, deprem, düzensizlik, asimetri, durum uzayı, bilineer, dinamik analiz.*

## Effect of infill walls to the nonlinear torsional behavior of symmetric and asymmetric structures under earthquake effect

### Abstract

*Generally during the design procedure, the stiffness of infill wall is not taken into account. However, these walls have an initial stiffness which causes torsional and translational response even the structure is symmetric under earthquake effect. If the structure is asymmetric, these walls change torsional response of structures. In order to investigate this effect, different structural models are designed with and without infill walls. The nonlinear behavior of both infill walls and structure should be taken into account as nonlinear force-displacement relation. Six different earthquake records which have different characteristics are applied to both asymmetric and symmetric structures as earthquake excitations then the response of structures are calculated in time history domain. In order to prevent stability problems in time history domain, the time interval was changed from 0.02 sec to 0.005 sec by using linear interpolation functions. The basis of program which is used to calculate structural response characteristics is using State Space Method in order to calculate dynamic response characteristics of structures under earthquake motions. According to results, the effects of infill walls to the dynamic response characteristics of symmetric and asymmetric structures are interpreted.*

**Keywords:** *Torsion, earthquake, irregularity, asymmetry, state space, bilinear, dynamic analysis.*

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Deniz GÜNEY. [dguney@itu.edu.tr](mailto:dguney@itu.edu.tr); Tel: (212) 285 65 71.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Taşıyıcı sistemi planda düzensiz yapıların deprem etkisi altında lineer olmayan burulma davranışlarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 27.10.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 16.11.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Düzenli olmayan yapıların deprem etkilerinden daha olumsuz etkilendikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Düzensiz binaların bu özellikleri, yönetmeliklerde kütle merkeziyle rijitlik merkezi arasındaki uzaklığa bağlı olarak ilave eşdeğer statik kuvvetler dikkate alınarak yansıtılmaktadır. Yapıların deprem anında yalnızca depremden oluşacak olan yatay kuvvetlerin etkisi dikkate alınarak hesabı yapıldığında önemli bir etki dikkate alınmamış olur çünkü binanın plandaki durumuna bağlı oluşan düzensizlik mevcut ise binada ek bir burulma etkisi söz konusu olacaktır. Burulma, temel manada yapıdaki kütle merkezi ile rijitlik merkezinin çakışmamasından meydana gelen dış merkezliğin sebep olduğu moment etkisi olarak genel şekilde tanımlanabilir. Söz konusu burulma etkisinin, binada mevcut olan düzensizlik durumuna bağlı olarak dikkate alınması ve boyutlandırmaya esas olan hesap kuvvetlerine ilave edilmesi gerekmektedir.

Genel itibariyle burulma etkisi, yapının temelindeki dönme, yapı elemanlarının hem yatay hem de düşey doğrultularda rijitliklerinde belirsizlik, kütle merkezinin yerindeki belirsizlik, rijitlik ve kütlelerin katlara göre dağılımındaki belirsizlik gibi sebeplerle ortaya çıkmaktadır. Burulmanın en önemli kaynağı olarak, planda yatay doğrultuda yük taşıyıcı elemanların, kütle merkezleri (KM) ve rijitlik merkezleri (RM) arasında dış merkezlik oluşmasına neden olacak şekilde asimetrik rijitlik dağılımıdır. Bu duruma genellikle gerçek, statik, kütle veya rijitlik dış merkezliği adı verilir. Ancak yapı simetrik de olsa yapının temeli boyunca üniform olmayan zemin titreşimleri veya zemin titreşiminin burulma bileşenlerinin varlığından dolayı burulma oluşabilir. Buna ilave olarak inşaat işlerinin doğasında bulunan işçilik eksiklikleri gibi nedenlerle simetrik gibi görünen binalarda bile düzensizlik veya asimetri oluşabilir ve bunun sonucunda burulma etkisi meydana gelebilir. 1985 Şili depremindeki El Faro binası da, binaların deprem etkisiyle göçmesinde, elastik olmayan burulmanın önemini gösteren önemli bir örnektir (Wood vd., 1991). Burulma etkilerinin tasarım aşamasında elastik olarak dikkate alınması, burulma etkilerinin değerlendirilmesinde bir eksiklik olarak ortaya çıkmaktadır. Birçok yönetme-

likte, depreme karşı belli bir güvenlik seviyesinin tutturulması temel yöntem olarak ortaya çıktığından, binada bu aşamada dikkate alınmayan, ciddi ölçüde elastik olmayan bir burulma etkisinin oluşması söz konusu olacaktır. Daha önceden yapılan birçok çalışmada, sadece elastik davrandığı kabul edilen yapının deprem tepkisi dikkate alınmış, bu tip sistemlerde yatay kuvvet-burulma etkilerinin çiftlenmesi konusu yaygın olduğundan, elastik modellenen burulma tepkisi hesap modellerinde çok defa kullanılmıştır. Son yıllarda binaların depreme karşı hesabında elastik olmayan sistemlerin analiz sonuçlarının elde edilmesi daha pratikleşmiş ve sonuçları uygulanabilir hale gelmiştir (Erdik, 1975). Burulmaya karşı güçlü binalarda burulma etkisinin çiftlenmesi genelde lineer elastik sistemlere kıyasla, elastik olmayan sistemlerde daha büyük yerdeğiştirme etkisi ortaya çıkarmaktadır (Kan ve Chopra, 1981). Yapılan araştırmalar elastik olmayan burulma etkilerini kontrol edebilmek için, yapının depreme karşı tepki verdiği sırada burulma mekanizmasının oluşumunun kontrol edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur (Bertero, 1995). 1957 Mexico depreminde, statik yöntemlerin yeterli yaklaşıklıkla burulma etkisini tahmin etmesinin oldukça zor olduğu, statik ve dinamik sonuçlar arasında uyumsuzluklar belirlediği gözlemlenmiştir (Rossenbueth, 1957, 1960). Bu uyumsuzluklar kat kütlelerinin, açılal atalet momentinin, atalet kuvvetlerinin, sistem dış merkezliğini değiştirmesinden ortaya çıkmaktadır (Housner ve Outinen 1958). Statik esaslı yöntemler, tasarım dışmerkezliği yaklaşımına bir giriş olmasından dolayı korunmuştur. Lineer dinamik analizle uyum sağlanması için kat döşemesinin esnek tarafındaki RM'den uzaktaki elemanlar için dışmerkezliğin artmasına, rijit taraftaki elemanlar için dışmerkezliğin küçülmesine yol açmıştır. Aynı zamanda yapılan çalışmalarda, bir dizi düzenli çok katlı yapıda, tek katlı modelin, lineer burulma tepkisini yeterli şekilde temsil edebildiği ortaya konmuştur (Gluck vd., 1979).

Yönetmeliklerde elastik ve lineer dinamik analiz sonuçlarını uyum çabalarında genellikle kat döşemesinin esnek tarafında bulunan elemanların davranışına özen gösterilmiştir ve burulmaya karşı koyan rijit taraftaki elemanların davranışı daha az dikkate alınmıştır.

Zaman alanında lineer dinamik analiz sonuçları, statik yönetmelik kurallarının rijit taraftaki elemanların tepkisini eksik hesapladığını göstermiştir. Bu, büyük depremlerde, söz konusu elemanlarda daha fazla süneklik ihtiyacının ortaya çıkmasına neden olacaktır (Rutenberg ve Pekau, 1983).

Taşıyıcı olmayan dolgu duvarların, yapıların statik veya dinamik davranışına tam katkısı konusunda akademisyenler arasında kesin bir anlaşma yoktur. Bu nedenle bu alanda yeterli yönetmelik ve hesap kuralları da belirlenmemiştir. Ancak duvarların plandaki yerleşimlerine bağlı olarak sahip oldukları rijitlik, yapının deprem davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu deneylerde göstermiştir (Fardis vd., 1999). Deprem etkisi altındaki dinamik tepki karakteristikleri incelendiğinde de bu etkinin var olduğu gözlemlenmektedir (Güney vd., 2004).

### Sistemin dinamik hareket denklemi

Dinamik hareket denklemi (1)'de tanımlanmış ve matris elemanlarının açılımı ise (2) denkleminde gösterilmiştir. Sistem rijitlik matrislerinin, elemanların ötelenme ve burulma rijitliklerine bağlı olarak hesaplanması (3), (4) ve (5) denklemlerinde gösterilmiştir.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F_e(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_x(t) \\ \ddot{x}_y(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{x\theta} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{y\theta} \\ C_{\theta x} & C_{\theta y} & C_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_x(t) \\ \dot{x}_y(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{x\theta} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{y\theta} \\ K_{\theta x} & K_{\theta y} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_x(t) \\ x_y(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M\ddot{x}_{gx}(t) \\ M\ddot{x}_{gy}(t) \\ I_\theta\ddot{x}_{g\theta}(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$K_{xx} = \sum_{i=1}^n k_{ix} \quad K_{yy} = \sum_{i=1}^n k_{iy} \quad (3)$$

$$K_{y\theta} = e_x K_{yy} \quad K_{x\theta} = e_y K_{xx} \quad (4)$$

$$K_{\theta\theta} = \sum_{i=1}^n k_{ix} y_i^2 + \sum_{i=1}^n k_{iy} x_i^2 \quad (5)$$

Burada kullanılan sönüm olarak Rayleigh sönümü yani orantısız sönüm ifadesi kullanılmıştır.  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları kullanıldığı kütle ve rijitlik matrisleriyle orantılı olan Rayleigh sönümü adını almaktadır.  $\alpha$  ve  $\beta$  doğal frekanslara bağlı olarak hesaplanan katsayılardır.  $\xi$  ise sönüm oranıdır. Sistem sönüm matrisinin hesaplanması (6) denkleminde ve hesaplamada kullanılan katsayıların bulunması (7) ve (8) denklemlerinde gösterilmiştir.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

$$\alpha = \xi \frac{\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (7)$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (8)$$

Dinamik hareket denklemi yukarıdaki gibi oluşturulduktan sonra "Durum Uzayı" yöntemi kullanılması ile sayısal olarak zaman alanında çözülmüştür. Bu yöntem sistemin çeşitli etkenlere tepkisini hesaplamak için hem yer değiştirme hem de hızı bağımsız değişkenler olarak kabul etmektedir. Bu bağımsız değişkenler "durum" olarak isimlendirilmektedir. Buradaki bağımsız değişkenler olan yer değiştirme ve türevlerini içeren  $z(t)$  vektörü (9) denkleminde ifade edilmiştir. "Durum" vektörünün hesaplanmasında A matrisinin hesaplanması (10), dış yük matrisi  $F(t)$  (11), türev içeren diferansiyel denklem (12) ve bu ifadenin açılımı (13) denkleminde gösterilmiştir. Denklemin çözümü ise (14) denkleminde verilmiştir.

$$z(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} z(t) + \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_e(t) \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_e(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\dot{z}(t) = Az(t) + F(t) \quad (12)$$

$$\dot{z}(t) = \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\ddot{x}}(t) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

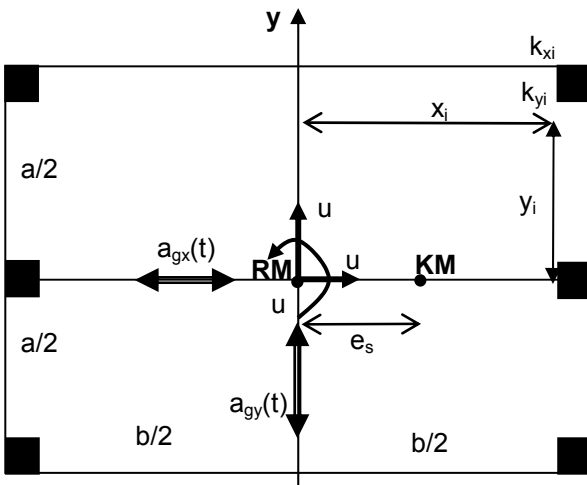
$$= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}F_e(t) \end{Bmatrix}$$

$$z(t) = e^{A(t-t_0)} z(t_0) \\ = e^{A(t-t_0)} + e^{At} \int_{t_0}^t e^{-As} F(s) ds \quad (14)$$

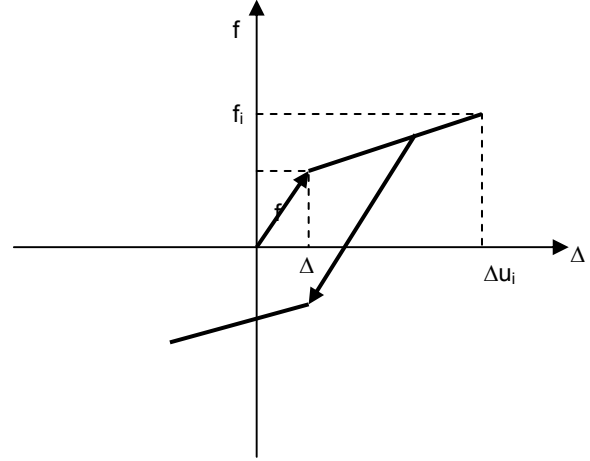
Burada  $z(t_0)$   $t=t_0$  anındaki yer değiştirme ve hız bileşenlerini sembolize etmektedir.  $e^{At}$  ise “durum geçişi” matrisidir ve  $A$  matrisinin özdeğer ve özvektörlerinin hesabını gerektirir. Bu yapıldığında  $T$  geçiş matrisinin tersi alınabilir. Bu yüzden  $e^{At}$  ifadesini kapalı formda yazmak çok zordur ve çoğu zaman sayısal hesaplama tercih edilmektedir. Sayısal integrasyon çözümü için matris denkleminin (15)’de verilmiştir.

$$z_{k+1} = e^{A\Delta t} z_k + A^{-1}(e^{A\Delta t} - I)F_k \quad (15)$$

Genelde zaman aralığı  $\Delta t \leq (T_n/10)$  alınır, böylece yakınsama çok hızlı gerçekleşir. Bu yöntemin burulma davranışının zaman alanındaki incelenmesinde kullanımında idealize edilen kat planı Şekil 1’de verilmiştir. Şekil 2’de ise lineer olmayan taşıyıcı eleman kuvvet şekil değiştirme bağıntısı gösterilmiştir.



Şekil 1. Model kat planı



Şekil 2. Taşıyıcı eleman kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Sistem akma kesme kuvveti  $V_{ey}$ ,  $T_y$  ötelenme periyoduna bağlı olarak tasarım tepki spekturumundan elde edilebilir. Burada süneklik  $R=4$  alınmıştır.  $R$  hesabında sistem süneklik kapasitesinin başlangıç olarak 4 olduğu kabulü yapılmıştır. Bu durumda  $y$  doğrultusundaki akma kesme kuvveti (16) denkleminde hesaplanabilir. Herhangi bir elemanın akma kesme kuvveti ise bu durumda (17) denkleminde elde edilebilir.

$$V_{yo} = V_{ey}/R \quad (16)$$

$$f_{yi} = V_{yo} * k_i/K_y \quad (17)$$

### Deprem ivme kayıtları

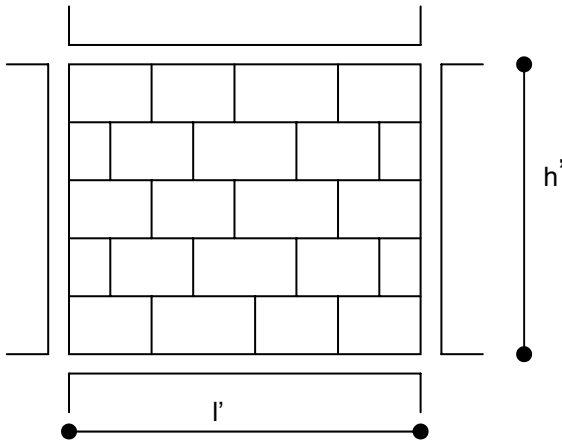
Dış etki olarak aşağıdaki Tablo 1’de detayları verilen altı farklı özelliğe sahip deprem ivme kaydı analizlerde dikkate alınmıştır. Yapı modellerinin tepkisi değerlendirilirken tüm deprem etkilerinden oluşan tepki karakteristiklerinin ortalaması alınmıştır. Bu sayede analiz sonuçlarının genelleştirilmesi sağlanmıştır. Deprem ivme kayıtlarının farklı zaman aralıkları için olan değerleri, yazılan programdaki stabilite bozuklukları ve lineer olmayan davranıştaki dönüş noktalarını daha iyi yansıtabilmesi amacıyla, lineer interpolasyon tekniği kullanılarak yazılan bir başka program yardımı ile 0.005 sn aralıklı hale getirilmiştir.

Tablo 1. Deprem ivme kayıtları

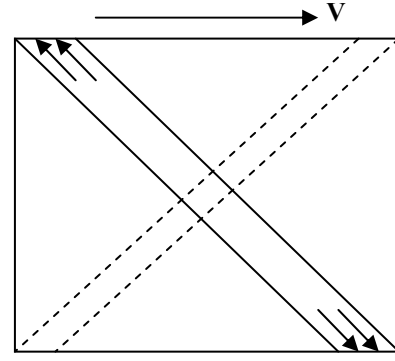
Kayıt	Tarih	Mag	Yer	Der. (km)	Max. İvme. (cm/s <sup>2</sup> )
El Centro	18 Mayıs 1940	7.1	Imp. Valley	70	341
Loma Prieta	18 Ekim 1989	7.1	Los Gatos	62	558.95
Kobe	17 Ocak 1995	7.2	JMA Rec.	20	818
Meloland	15 Ekim 1979	6.5	Meloland	26	229.97
Korfez	17 Ağustos 1999	7.4	Sakarya By. İs. Md.	9	407.01
Düzce	12 Kasım 1999	7.2	Bolu Bay. Müd.	14	739.51

### Dolgu duvarların davranışa katkısı

Son yıllarda yapılan çalışmalarda duvarların sistem rijitliğini etkilediği gerek deneysel gerekse teorik çalışmalarla ortaya konulmuştur (Fardis vd., 1999). Ancak ülkelere göre değişen duvar yapım ve kullanılan malzeme sistematiği değişikliği için detay noktalarda bölgesel farklılıklardan söz edilebilir. Hesap sistematiğinde en basitleştirilmiş hesap olarak duvar diyagonali doğrultusunda eş değer çubuk modeli (equivalent strut model) kullanılmaktadır. Şekil 3’de hesaplamada kullanılan model duvar geometrisi gösterilmiştir. Şekil 4’te ise duvarın kesme kuvveti taşıma ve aktarma mekanizması gösterilmiştir (Madan ve Reinhorn, 1997).

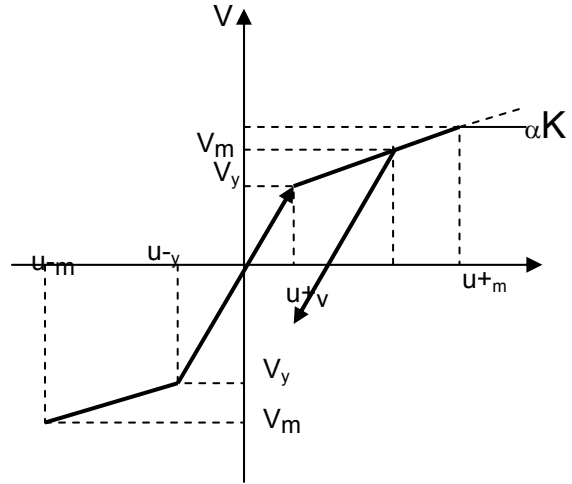


Şekil 3. Duvar model geometrisi



Şekil 4. Eşdeğer duvar yük aktarım modeli

Yatay yük yer değiştirme ilişkisi olarak sistemin lineer davrandığını kabul etmek çok gerçekçi olmaz. Çünkü duvar deprem etkisinde gelen kesme kuvvetinin çok büyük olmayan değerlerinde kısa sürede çatlak ve tersinir deprem yükleri altında rijitliğini giderek kaybeder. Bu nedenle duvarın gerilme şekil değiştirme ilişkisine dayalı olarak, Şekil 5’de gösterildiği gibi bilineer kesme kuvveti yer değiştirme davranışı tanımlanması daha gerçekçi olacaktır. Duvarın başlangıç elastik rijitliği,  $V_y$  akma kuvvetine dek geçerli ve akma sonrası azaltılmış rijitliği için maksimum  $u_m$ ’e kadar geçerli bir model alınabilir.



Şekil 5. Duvar için bilineer davranış modeli

Yukarıda gösterilen bilineer davranış modeli için, 18 No.lu eşitlikte maksimum kesme kuvveti hesaplanması verilmiştir, söz konusu kesme kuvvetine karşı gelen maksimum yer değiştirme ise 19 No.lu eşitlikte gösterilmiştir.

$$\frac{V_m^+(V_m^-) \leq A_d \cdot f_m' \cdot \cos\theta \leq \frac{V \cdot t \cdot l'}{(1-0.45 \tan\theta) \cos\theta} \leq \frac{0.83 \cdot t \cdot l'}{\cos\theta}}{(18)}$$

$$u_m^+(u_m^-) = \frac{\varepsilon_m' \cdot ld}{\cos\theta} \quad (19)$$

Modelde oldukça önemli olan akma kesme kuvveti ve yer değiştirmeleri ise 20 ve 21 No.lu eşitliklerden hesaplanacaktır.

$$V_y^+(V_y^-) = \frac{V_m - \alpha K_o u_m}{(1-\alpha)} \quad (20)$$

$$u_y^+(u_y^-) = \frac{V_m - \alpha K_o u_m}{K_o(1-\alpha)} \quad (21)$$

Başlangıç duvar rijitliği ise 22 eşitliğinde ifade edilmiştir

$$K_o = \frac{Ed \cdot Ad}{l'} \quad (22)$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan t, duvar kalınlığı, l' dolgu duvar yataydaki temiz boyu, f<sub>m</sub>, duvar prizma dayanımı, ε<sub>m</sub>, ilgili şekil değiştirme miktarı, θ, duvar diyagonal bant açısı, V, duvar başlangıç basınç dayanımı, A<sub>d</sub>, eşdeğer bant alanı, ld, eşdeğer bant boyu, α akma sonrası rijitliğin başlangıç rijitliğine oranı, K<sub>d</sub> duvar başlangıç rijitliğidir. Duvar elastisite modülü 500-700 f<sub>ckd</sub> olarak alınabilir. f<sub>ckd</sub> karakteristik duvar dayanımı ise 2000-4000 kN/m<sup>2</sup> alınabilmektedir. Duvarın uçtaki y aksına yerleştirilmesi durumunda ilgili duvar karakteristikleri olan maksimum kesme kuvveti yukarıda verilen denklemler yardımı ile hesaplanmıştır.

### Çözüm algoritması

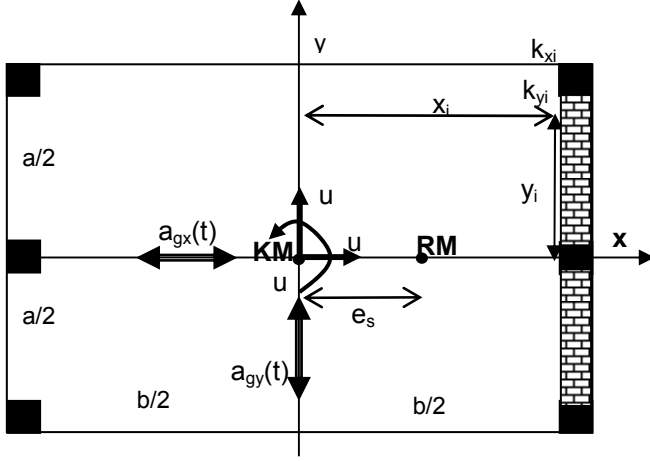
Yukarıda yapılan hesaplamalar için programının yazılım dili kullanılarak yukarıdaki bilgilere dayalı olarak program yazımı gerçekleştirilmiştir. Program algoritması genel itibariyle aşağıdaki ana kavramları içermektedir.

- Yapıya ait genel bilgilerin programa girilmesi (yapı geometrisi, kütlesi gibi)

- Taşıyıcı elemanlara ait bilgilerin girilmesi
- Verilere dayalı olarak eleman ötelenme ve burulma rijitliklerinin hesaplanması
- Sistem kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin oluşturulması
- Sistemin ötelenme ve burulma periyodu, frekansı gibi karakteristik parametrelerin hesaplanması
- Sistemde akma sınırının aşılması durumunda değişen rijitlik değerlerine bağlı olarak sistemin değişen karakteristik parametrelerinin ve matrislerinin yeniden hesaplanması
- Deprem ivme kayıtlarının dış ortamdaki dosyadan okutturularak dış yük matrisinin hesaplanması
- Durum uzayı yönteminde daha önce belirlenen durum matrislerinin hesaplanması
- Dinamik hareket denkleminin durum uzayı formunda nümerik olarak zaman alanında adım adım çözümü için hareket denklemlerinin oluşturulması ve çözüm yapılması
- Sistemin tepki karakteristiklerinin elde edilerek yerdeğiştirme, hız, ivme, taban kesme kuvveti gibi değerlerin hesaplanması
- Yukarıda hesaplanan değerlerin kontrollerinin yapılarak yapının bilineer davranışta hangi aşamada olduğunun belirlenmesi ve davranış eğrisinde bulunan konuma bağlı olarak gerekiyorsa rijitlik, sönüm gibi matrislerin değiştirilmesi ve buna bağlı olarak zamana bağlı tepki karakteristiklerinin elde edilmesi
- Bulunan değerlerin zamana bağlı olarak dosyalara yazdırılması
- Zamana bağlı olarak elde edilen parametrik değerlerin grafik çıktılarının ekrana bastırılması ve gerekli kıyaslama dosyalarının meydana getirilmesi

### Sayısal uygulama

Şekil 1'de sistemin, kenar akslarına duvar eklenerek oluşturulan yapı modeli Şekil 6'da ifade edilmiştir. Burada görülen altı kolon elemanlı sistem ilk etapta köşe kolonların tamamı simetrik 30x30cm boyutundaki kare kolonların düşeyde taşıyıcı eleman olarak alındığı sistem modellemesi yapılmıştır. Yapının a ve b olarak gösterilen plandaki boyutları 20 m olarak alınmış, kat kütlesi ise 400 kNs<sup>2</sup>/m olarak alınmıştır.

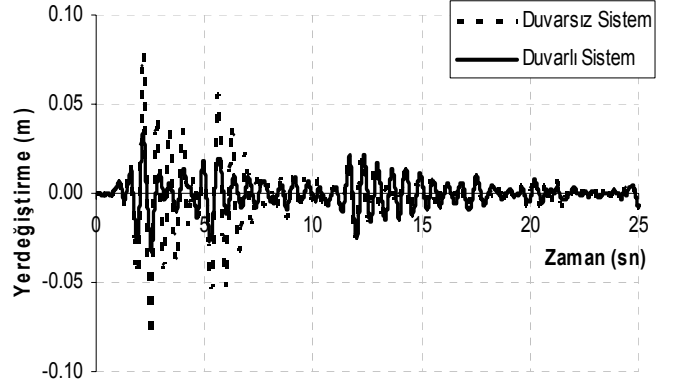


Şekil 6. Duvarlı yapı modeli

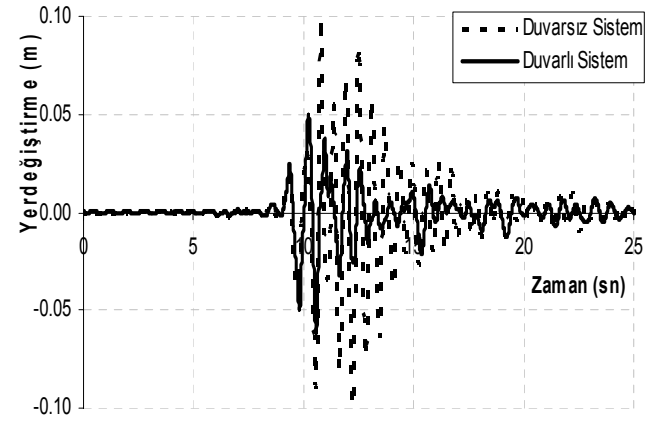
Yapıdaki dışmerkezliğin köşe kolonları y doğrultusundaki boyutlarının kademeli olarak artırılması ile rijitlik merkezinin kütle merkezinden uzaklaşarak köşe kolonlara doğru yönelmesi ile elde edilmiştir. Yapı modeli program algoritması kullanılarak daha önce açıklanan zaman alanında adım adım sayısal integrasyon yöntemiyle, durum uzayı formunda çözülmüştür. Tablo 1’de verilen deprem ivme kayıtları sisteme yüklenerek yapının lineer olmayan tepkisi hesaplanılmış ve sonuçlar grafik olarak ifade edilmiştir. Duvarın davranışının da sistem taşıyıcı elemanları gibi bilineer olarak düşünülerek, kenar aksın tamamına ilave edilirse yer değiştirme tepkilerinin değişimi aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 7’de görülebileceği gibi, duvarların hesaplamada dikkate alınması ile deprem etkisi altında, y doğrultusunda yer değiştirme tepkilerinde bir miktar düşüş ortaya çıkmıştır. Duvarın rijitliği devreye girdiğinde kat planı simetrik olmasına rağmen, sistemin rijitlik merkezi duvar tarafına kayarak, sistemde dışmerkezlik ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ortaya çıkan bu dış merkezlik etkisinin, depreme maruz kalan yapının burulmasını kayda değer ölçüde arttırdığı görülmektedir.

Şekil 8’de görülebileceği gibi daha büyük ivme değerleri içeren Düzce depremi kaydı ile analiz yapıldığında, yapıda kenar kolon ebatları büyütülerek asimetri artışı sağlanarak daha büyük farklılıklar içeren yer değiştirme tepkileri elde edilebilmektedir.



Şekil 7. Duvarsız ve duvarlı sistem için y doğrultusunda yer değiştirme tepkisi değişimi



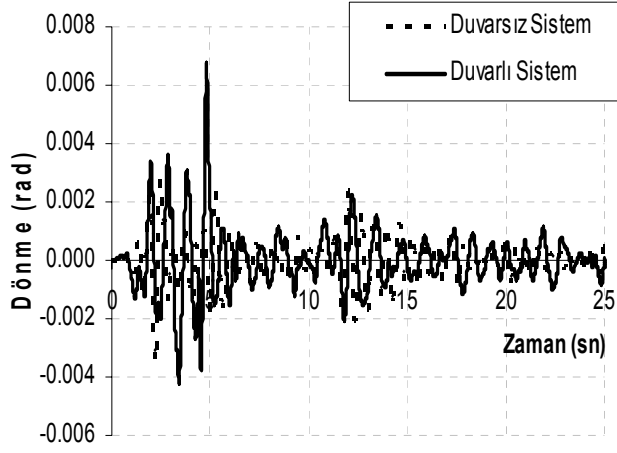
Şekil 8. Duvarsız ve duvarlı sistem için y doğrultusunda yer değiştirme tepkisi değişimi

Deprem ivmesinin daha şiddetli olduğu deprem etkileri için bilineer davranış dolayısıyla sistem tepkisinde daha belirgin farklılıklar ortaya çıkmıştır.

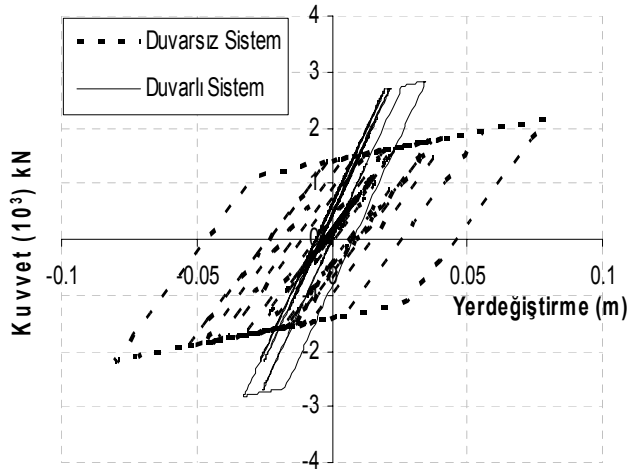
Şekil 9’da görülebileceği gibi tasarımda dikkate alınmamasına rağmen duvarın etkisi ile sistemde burulma dönmelerinde kayda değer farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Duvarlar sistem dış merkezliğini artırarak burulma etkisini büyütmektedir. Duvarların konumunun dış merkezliği artırıcı şekilde yerleştirilmesi de bu sonuca ulaşmada etkindir.

Şekil 10’da görülebileceği gibi simetrik ve simetrik olmayan sistemler için taban kesme kuvveti, yer değiştirme grafikleri çizildiğinde, sisteme duvar rijitliğinin girmesiyle rijitlik değişimlerine bağlı çevrimlerin bir miktar azaldığını

söylemek mümkündür. Yukarıdaki şekillerdeki sonuçlar pratiklik sağlaması için sadece El Centro etkisi altında verilmiştir.



Şekil 9. Duvarlı ve duvarlı sistem için burulma dönmesi tepkisi

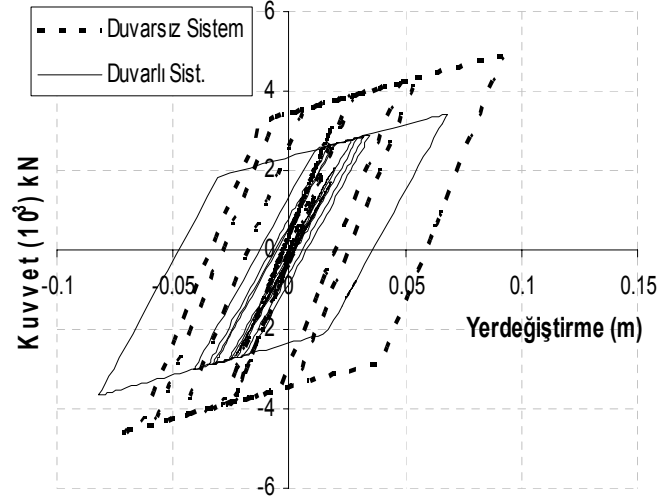


Şekil 10.  $\Omega=1.394$  parametresi için El-Centro kaydı altında oluşan çevrimsel davranış

Şekil 11’de ise değişen frekans oranı parametrelerine bağlı olarak taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme arasında değişen çevrimsel davranışın, El-Centro deprem kaydı sonucu ortaya çıkan değişimi ifade edilmiştir. Duvarların devreye girmesi ile deprem etkisi altındaki yapının yer değiştirmelerinin azalmasına paralel olarak çevrimsel yüklenme boşaltma davranışı da etkisini hafifletmiştir.

$\Omega$  parametresinin azalması teknik olarak burulma etkisinin artması anlamına gelmektedir. Burulma etkisinin artması ile doğal olarak burulma

dönmeleri de artmaktadır. Burada görüldüğü gibi duvarlı sistemde, duvarların başlangıçta verdiği rijitlik sayesinde yer değiştirme değerlerinde bir miktar düşüş elde edilebilmiştir. Ancak buna karşılık burulma dönmelerinde artışlar ortaya çıkmıştır. Tablo 2’de duvarlı sistem tepki değerleri verilmiştir. Tablo 3’te ise duvarlı sistemin tepki parametreleri ifade edilmiştir.



Şekil 11.  $\Omega=1.2760$  parametresi için El-Centro kaydı altında oluşan çevrimsel davranış

Tablo 2. Duvarlı sistem tepki değerleri

e/b	$\Omega y$	$y_{maks}$ (m)	$\theta_{maks}$ (rad)	$\mu$
0.000	1.581	0.232	0.000	0.857
0.114	1.503	0.221	0.004	0.870
0.203	1.394	0.208	0.009	0.762
0.271	1.276	0.154	0.010	0.533
0.322	1.162	0.111	0.011	0.385

Tablo 3. Duvarlı sistem tepki değerleri

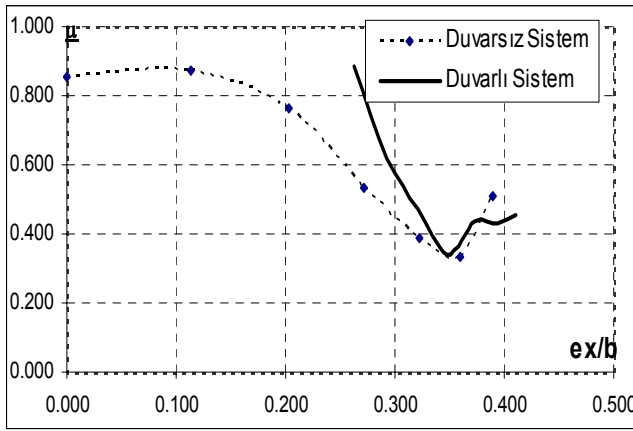
e/b	$\Omega y$	$y_{maks}$ (m)	$\theta_{maks}$ (rad)	$\mu$
0.263	1.248	0.223	0.014	0.885
0.292	1.199	0.212	0.016	0.615
0.321	1.139	0.171	0.013	0.473
0.348	1.073	0.102	0.012	0.339
0.373	1.003	0.089	0.010	0.436

Duvarlı ve duvarlı sistemlerde genel süneklik gereksiniminin birbirine paralel seyrettiği görülmektedir. Ancak duvarlı sistemde yer değiştirmelerin azalması dolayısıyla bu gereksinim

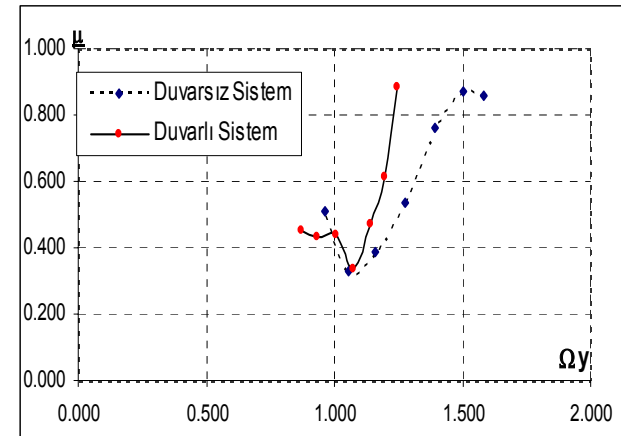


duvarsız sistemden daha alt seviyede ortaya çıkmaktadır. Duvarsız sistemde değişimler daha sert olarak ortaya çıkmakta duvarlı sistemde duvar rijitliklerinin katkısı ile değişimler daha yumuşak olarak şekillenmektedir. Deprem etkisi de dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında, yapının kararlı davranış göstermesi için yumuşak geçişlerin daha yararlı olduğu söylenebilir.

Şekil 12’de normalleştirilmiş süneklik oranı ( $\mu$ ) ve dış merkezlik oranı ( $ex/b$ ) arasındaki değişim, Şekil 13’te ise süneklik oranı ( $\mu$ ) ve burulma frekansı oranı ( $\Omega$ ) parametreleri arasındaki değişim ifade edilmiştir.



Şekil 12. Duvarlı ve duvarsız sistemde süneklik ( $\mu$ ) ve dış merkezlik oranı ( $ex/b$ ) parametreleri arasındaki değişim

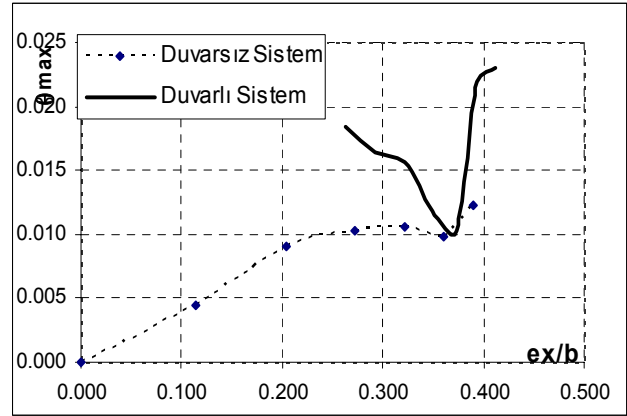


Şekil 13. Duvarlı ve duvarsız sistemde süneklik ( $\mu$ ) ve burulma frekansı oranı ( $\Omega$ ) parametreleri arasındaki değişim

Duvarlı ve duvarsız sistemlerde genel süneklik gereksiniminin birbirine paralel seyrettiği gö-

rülmektedir. Ancak duvarlı sistemde yer değiştirmelerin azalması dolayısıyla bu gereksinim duvarsız sistemden daha alt seviyede ortaya çıkmaktadır.

Şekil 14’de ise duvarlı ve duvarsız sistemde burulma dönmesi ( $\theta$ ) ve dış merkezlik oranı ( $ex/b$ ) parametreleri arasındaki değişim ifade edilmiştir. Burada hem duvarlı hem de duvarsız sistemin beklendiği gibi artan dış merkezlik ( $ex/b$ ) oranlarına bağlı olarak burulma dönmeleri artmaktadır ve her iki sistemde bu değişimler birbirine oldukça yakın seyretmekte ancak paralel noktalarda duvarlı sistem için kısmen daha yüksek değerler aldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 14. Duvarlı ve duvarsız sistemde burulma dönmesi ( $\theta$ ) ve dış merkezlik oranı ( $ex/b$ ) parametreleri arasındaki değişim

## Sonuçlar

Yapılan çalışmada, söz konusu dinamik dış etkiler altında genel olarak bilinen ve bilinmeyen burulma kaynakları ortaya matematik olarak konulmuş, yazılan program algoritması bu etkileri yansıtacak şekilde düzenlenmiştir. Daha sonra çeşitli yapı sistemleri için lineer olan ve olmayan, duvarlı ve duvarsız modeller kurulmuş, bu modellere burulma kaynakları parametrik olarak yansıtılmış, yazılan program sayesinde sistemler çeşitli yapı modelleri için analiz edilerek değişimler parametrik olarak izlenmiştir.

Malzeme bakımından lineer kabul edilen ve edilmeyen sistemler arasında gerek hesaplama gerekse davranış olarak ciddi farklar söz konusudur. Lineer davranış kabulü, küçük ve orta şiddette yapıya etkiyen deprem etkileri için lineer

elastik sınırın çoğu zaman aşılmaması veya aşılma bile ciddi ölçüde fark meydana getirecek seviyelere çıkmadığı görülmüştür. Deprem etkisi büyükse, burulma etkilerinin de tetiklenmesi ile yapıda lineer elastik sınır aşılmaktadır. Bunun sonucu olarak adım adım devre dışı kalan düşey taşıyıcı elemanlar, yapının ötelenme ve burulma davranışını direkt etkileyen rijitlik matrislerinde depremin ilerlemesine paralel olarak özellikleri sürekli değişen bir yapı göstermektedirler.

Duvarlı ve duvarsız sistemlerin sonuçları kıyaslandığında, taşıyıcı eleman sayısı az sistemlerde duvarların katkısı artan dış merkezlik oranı ile orantılı olarak daha belirgin hale gelmekte ve sistemin süneklik gereksinimi parametresi üzerinde ciddi etkiler göstermektedir. Duvar rijitlikleri sisteme ötelenme açısından katkı yapmakla birlikte düzensiz dağılımları burulma davranışında kayda değer farklılaşmalar ortaya çıkarmaktadır.  $\Omega$  yani burulma frekansları oranı için sistemin 1.2-1.4 aralığında burulma etkisi dolayısıyla süneklik gereksiniminde kayda değer artışlar olduğu görülmektedir. Artan  $\Omega$  değerlerinin yansıttığı burulma etkisine paralel olarak sistemin süneklik gereksinimini arttırarak ve 1.13~1.15 değerini kritik eşik yaparak daha aktif bir rol oynamakta olduğu görülmektedir.

Buradaki önemli noktalardan biri duvarların simetrik sistemlerde oluşturduğu burulma davranışı ile ilgilidir. Simetrik sistemlerde teorik olarak binanın dinamik etkiler altında burulma davranışı göstermesi beklenmemektedir. Ancak önceki bölümlerde yapılan analiz sonuçlarında da ifade edildiği gibi, duvarların gerek boylarının uzun olması gerekse bina genelinde önemli bir alan kaplaması nedeni ile sahip oldukları büyük rijitlik, yapının dinamik etkilere karşı ilk anda ortaya çıkan tepkisinde kayda değer bir burulma tepkisine sahip olmasına neden olmaktadır. Duvar rijitliklerinin belli bir oranda taşıyıcı sisteme katkı sağlaması, kat planındaki duvar yerleşimlerine bağlı olarak, tasarım aşamasında binanın burulma potansiyelinde artışlar yapmak isabetli olacaktır. Yapının özellikle tasarım aşamasında duvarların tamamının sadece belli akslara yönelmesi engellenmeli mümkün mertebe her iki yatay aksta da duvar dağılımı dengeli şekilde yapılmalıdır. Özellikle güçlendirme yapılan binalarda şayet düşey taşıyıcı elemanların düzensiz

rijitlik dağılımlarından dolayı burulma etkisi oluşuyorsa, bu istenmeyen etkiyi azaltmak için zayıf akstaki duvar elemanların çeşitli güçlendirme teknikleri kullanılarak rijitliklerinin artırılması böylece her iki yatay aksta da rijitlik dağılımının dengelenmesi bu sayede beklenmeyen burulma etkilerinin azaltılması mümkün olabilecektir.

## Kaynaklar

- Bertero, R. D., (1995). Inelastic torsion for preliminary seismic design, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **121**, 8, 1183-1189.
- Erdik, M. O., (1975). Torsional effects in dynamically excited structures, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, Texas, USA.
- Fardis, M. N., Bousias, G., Franchioni, G., Panagiotakos, B., (1999). Seismic response and design of RC structures with plan-eccentric masonry infills, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, 173-191.
- Gluck, J., Reinhorn, A. M., Rutenberg, A., (1979). Dynamic torsional coupling in tall building structures, *Proc. Institution of Civil Engineers*, **Pt. 2**, 411-424.
- Güney, D., Boduroglu, M. H., Aydın, E., (2004). Dolgu duvarların simetrik ve asimetric yapıların lineer olmayan davranışlarına etkisi, ACE 2004, 6<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering, 6-8 October 2004, Istanbul, Turkey, 374-384.
- Housner, G. W., Outinen, H., (1958). The effect of torsional oscillations on earthquake stress, *Bull. Seismological Society of America*, 221-229.
- Madan, A., Reinhorn, A. M., (1997). Modeling of masonry infill panels for structural analysis, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **123**, 1295-1302.
- Kan, C. L., Chopra, A. K., (1981). Torsional coupling and earthquake response of simple elastic and inelastic systems, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **107**, 1569-1588.
- Rossenbueh, E., (1957). Considerations on torsion, overturning and drift limitations, *Proc. SEAOC Conference*, Cornado, Mexico, 36-38.
- Rossenbueh, E., (1960). Aseismic provisions for the federal district, Mexico. *Proc. 2<sup>nd</sup> World Conference Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, 2009-2026.
- Rutenberg, A., Pekau, O. A., (1983). Earthquake response of asymmetric buildings: a parametric study, *Proc. 4<sup>th</sup> Canadian Conference Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 271-281.
- Wood, S., Stark, R. ve Creer, S., (1991). Collapse of eight-story rc building during 1985 Chile Earthquake, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **117**, 600-619.