#### Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1705-1714



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN: 1304 - 4915 Basılı / Printed ISSN: 1300 - 1884

# Modeling of accidental eccentricity in structural design according to Turkish Building Earthquake Code

# Kaan Kaatsız\*🕩

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Başkent University, Ankara, 06790, Türkiye

### **Highlights:**

# **Graphical/Tabular Abstract**

- Investigation of accidental eccentricity modeling procedure specific to Turkish Building Earthquake Code
- Evaluation of different accidental eccentricity modeling procedures in terms of their effects on structural behavior
- Performance comparison of plan-asymmetric shear frame structures subject to nonlinear dynamic analyses

#### Keywords:

- Earthquake resistant design
- Accidental eccentricity
- Asymmetric structures
- Structural design
- Nonlinear analysis

# Article Info:

Research Article Received: 09.01.2023 Accepted:18.01.2025

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1231421

#### **Correspondence:**

Author: Kaan Kaatsız e-mail: kaankaatsiz@baskent.edu.tr phone: +90 312 246 4192 Turkish Building Earthquake Code (TBEC-2018) presents a new procedure that utilizes increased floor mass moment inertias in modeling of accidental eccentricity. This procedure can be used as an alternative to the conventional method which calls for additional torsional moments acting to floor diaphragms for including accidental eccentricity effects. General schematic of inspected plan asymmetric multistory shear frame structures designed using two different accidental eccentricity approaches and their nonlinear dynamic seismic responses in terms of floor edge displacement ratios are presented in Figure A.



Figure A. Multistory shear frame structures subjected to nonlinear dynamic analyses and computed edge displacement ratios of alternative designs.

**Purpose:** This study is aimed at evaluating the performance of the accidental eccentricity modeling procedure specific to Turkish Building Earthquake Code by performing nonlinear dynamic analyses and comparing the obtained results with those of conventionally designed systems.

**Theory and Methods:** Multistory shear frame structures possessing with varying levels of double way plan asymmetry are designed per Turkish Building Earthquake Code. For each level of plan asymmetry, three structural designs are performed. Reference design does not include the accidental eccentricity effects, while in the case of two other designs accidental eccentricity is considered by using the conventional and TBEC-2018 specific procedures, respectively. Designed structures are modeled with nonlinear properties and dynamic analyses are performed under a strong ground motion set that is compatible with the utilized seismic hazard. Mean displacement and ductility responses of systems are compiled and evaluated.

**Results:** Inclusion of accidental eccentricity effects in seismic design by increased floor mass moments of inertia result in very minor changes except for systems with high plan asymmetry. In the case of conventional approach, displacement distribution worsens slightly compared with the reference design. Ductility demands on all structural members, however, decreases considerably while using conventional procedure. The TBEC-2018 procedure yields virtually no change in ductility demands of inspected systems since increased floor mass moment of inertias yield very small additional demands in seismic analysis.

**Conclusion:** Seismic performance of plan-asymmetric systems in terms of displacement ductility ratios improve considerably due to increasing capacities of all structural members when conventional method for including accidental eccentricity effects is used in the design. TBEC-2018 procedure results in a minor increase in torsional flexibility that manifests itself in changes edge displacement demands compared to reference system. The increased torsional flexibility, however, does not lead to an increase in member capacities so that virtually no change is observed in computed ductility ratios.

# Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1705-1714



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN: 1304 - 4915 Basılı / Printed ISSN: 1300 - 1884

# Ek dışmerkezlik etkisinin yapısal tasarımda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre modellenmesi

# Kaan Kaatsız\*

Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

# ÖNEÇIKANLAR

- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne özgü ek dışmerkezlik modelleme yönteminin incelemesi
- Farklı yöntemlerle tanımlanan ek dışmerkezlik etkisinin yapısal davranışa etkisinin değerlendirilmesi
- Plan asimetrisi olan kayma çerçevesi yapıların doğrusal olmayan dinamik analiz performanslarının karşılaştırması

Makale Bilgileri	ÖZ
Araștırma Makalesi	2018 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, çağdaş deprem mühendisliği ilkelerinin
Geliş: 09.01.2023	Türkiye'ye özgü deprem tehlikesi dikkate alınarak yapısal tasarım ve performans değerlendirmesinde
Kabul: 18.01.2025	kullanılabilmesini mümkün kılmıştır. Bu yönetmelik ile sunulan bir yenilik de depreme dayanıklı tasarımda
DOI:	hesaplanan ek dışmerkezlik etkisinin kat kütle eylemsizlik momentinin arttırılması ile modellenebilme imkânıdır. Söz konusu modelleme seceneği ile mod birlestirme vönteminin uvgulandığı durumlarda görece
10.17341/gazimmfd.1231421	basit bir yaklaşım ile ek dışmerkezlik etkisi dikkate alınabilmektedir. Bu çalışma kapsamında ek
Anahtar Kelimeler:	disherkezik etkisinin i urkiye Bina Deprem Yonetmengi nde tammanan iki farki yonem ne uygutannasi ilo alda adilan yangal taagman dagmada langung dunganga dunganga disherkezik
Depreme dayanıklı tasarım, ek dışmerkezlik, asimetrik yapılar, yapısal tasarım, doğrusal olmayan analiz	katlı kayma çerçevesi yapıların referans tasarımlarına ek dişmerkezlik etkisi, kat burulma momentleri (tork) ve kütle eylemsizlik momentlerinin arttırılması ile ayrı ayrı uygulanmıştır. Tamamlanan tasarımların kullanılan deprem tehlikesi ile uyumlu kuvvetli yer hareketleri kümesi altında doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, ek dişmerkezlik etkisinin klasik yöntem olan tork uygulanması ile dikkate alınarak yapılan tasarımlarda ek dişmerkezliğin hesaba katılmadığı referans duruma göre süneklik taleplerinin önemli ölçüde azaldığı, taşıyıcı eleman deplasman dağılımlarında ise bir miktar değişim olduğu tespit edilmiştir. Kat kütle eylemsizlik momentinin arttırılması ile ek dişmerkezlik etkisinin verildiği tasarımın doğrusal olmayan tepkisinin referans tasarımın tepkisi ile büyük ölçüde benzer olduğu tespit edilmiştir.

# Modeling of accidental eccentricity in structural design according to Turkish Building Earthquake Code

# HIGHLIGHTS

- Investigation of accidental eccentricity modeling procedure specific to Turkish Building Earthquake Code
- Evaluation of different accidental eccentricity modeling procedures in terms of their effects on structural behaviour
- Performance comparison of plan-asymmetric shear frame structures subject to nonlinear dynamic analyses

Article Info	ABSTRACT
Research Article	Turkish Building Earthquake Code, which came into regulation in 2018, made the use of contemporary
Received: 09.01.2023	earthquake engineering practices while considering seismic hazard specific to Turkey possible in structural
Accepted:18.01.2025	design and performance assessment. The code presented a new procedure that utilizes increased floor mass
DOI:	accidental eccentricity effects while using response spectrum analysis in a simple manner. In this study,
10.17341/gazimmfd.1231421	nonlinear behaviour of plan asymmetric structural systems designed with two alternative accidental
Keywords:	analyses are performed to designed structures under a strong ground motion set that is compatible with the
Earthquake resistant design, accidental eccentricity, asymmetric structures,	design seismic hazard. Dynamic responses of these structures are then compared. According to obtained results, ductility demands in designs where accidental eccentricity effects are modeled with conventional story torques decreased considerably compared with reference system where no accidental eccentricity is
structural design, nonlinear analysis	In the case of designs where accidental eccentricity effects are included via increasing floor inertial masses, nonlinear seismic response is observed to be substantially similar to that of reference system.

# \*Sorumlu Yazar/Yazarlar / \*Corresponding Author/Authors: \*kaankaatsiz@baskent.edu.tr / Tel: +90 312 246 4192 1706

#### 1. Giriş (Introduction)

Deprem mühendisliğinde bina tipi yapıların deprem kuvvetlerine karşı koyması için yaygın olarak uygulanan dayanıma göre tasarımın önemli ilkelerinden biri yatay kuvvetlerin uygulanması esnasında ek dışmerkezlik etkilerinin hesaba katılmasıdır. Ek dışmerkezlik etkisi, yapının deprem hareketi esnasında gösterebileceği plan asimetrik ötelenmeler sonucu yapısal elemanlarda oluşabilecek ek kuvvet taleplerinin tasarımda dikkate alınması için deprem yönetmelikleri ve standartları tarafından tanımlanan bir unsurdur [1-3]. Plan asimetrisi, temel olarak kat kütle merkezi ile rijitlik merkezinin kat planında birbirinden farklı noktalarda yer alması olarak tanımlanabilir. Yapısal kütlenin kat boyunca düzgün dağılmaması (kütle asimetrisi) veya taşıyıcı elemanların mimari sebeplerle yapının belli bir bölgesinde daha yoğun halde bulunması (rijitlik asimetrisi) gibi durumlardan kaynaklanabilir. Kütle merkezi ile kat merkezinin çakışık olması gerçek bir yapıda gerçekleşmesi çok olası olmayan bir durumdur. Bu sebeple, bütün yapıların gerek kütle dağılımı gerek rijitlik dağılımı sebebiyle değişen miktarlarda plan asimetrisi göstermesi beklenebilir.

Ek dışmerkezlik etkisinin yapısal tasarımda dikkate alınmasının deprem kuvvetleri altındaki davranışa etkileri geçmişte pek çok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [4-7]. Ek dışmerkezlik etkisinin depreme dayanıklı tasarım standartlarınca uygulanmasının sebeplerinin kütle, rijitlik ve dayanım dağılımlarındaki belirsizliklerin göz önüne alınması [8] ve burulma etkili kuvvetli yer hareketlerinin yapısal davranışa etkisinin tasarıma dahil edilmesi olduğu ifade edilmiştir [9-11]. Belirsizliklerin etkisinin ilave kuvvetler ile tasarıma dahil edilmesinin, ek dışmerkezliğin tüm elemanların tasarım dayanımlarını arttırmasına sebep olduğu ve rijit kenar elemanlarına daha çok dayanım fazlalığı kattığı tespit edilmiştir [12]. Bunun sonucu olarak, kat bazında dayanım dağılımının dengesinin olumsuz yönde etkilendiği de belirtilmiştir [13, 14].

Güncel depreme dayanıklı tasarım standart ve yönetmeliklerinde [1-3] ek dışmerkezlik etkisi, kat deprem kuvvetlerinin uygulama noktasının dikkate alınan yöne dik plan boyutunun  $\pm$  %5'i kadar kaydırılmasıyla gerçekleştirilen yapısal analizlerden iç kuvvet ve deformasyon taleplerinin derlenmesi ile dikkate alınır [15]. Kaydırma işleminin yapısal analiz sırasında yapılabileceği ve sonuçların derlenebileceği gibi, bu kavdırmanın kütle merkezinde varatacağı ek dışmerkezlik kaynaklı burulma momentinin (tork) yapıya etki ettirilmesi ile aynı tepki elde edilebilir. İlave bir kuvvet talebinin dikkate alınması sonucunda, ek dışmerkezlik etkisinin tüm yapısal elemanların tasarımında dikkate alınacak talepleri arttıracağı aşikardır. %5 kaydırma kuralının isabeti ve doğrusal olmayan deprem tepkisine sağladığı iyileştirme ise tartışmaya açıktır. Geçmişteki çalışmalarda bu değerin çok konservatif tarafta olduğu [9], hatta burulmada rijit sistemlerde gerekli olmadığı görüşü benimsenmiştir [4], [16, 17]. Bunun yanı sıra, ek dışmerkezlik kaynaklı burulma momentlerinin burulma düzensizliği bulunan yapılarda deprem etkisi altında davranışı potansiyel olarak daha çok etkileyebileceği de bilinmektedir [18]. Ayrıca, burulma düzensizliği olmayan simetrik sistemlere uygulanan ± %5 ek dışmerkezlik etkisinin burulma kaynaklı tepkileri az olarak tahmin ettiği de raporlanmıştır [19]. Ek dışmerkezlik etkisini dikkate almak için yönetmeliklerce tanımlanan sabit bir faktörün kullanılmasının da uygun olmadığı ve yapısal sistemin parametrelerine göre belirlenmesi gerekliliği de önerilmiştir [20]. Bu bağlamda, farklı ek dışmerkezlik oranlarına ilişkin hassasiyet çalışmaları gerçekleştirilmiş olsa da [21, 22] nihai olarak nitelendirilebilecek sonuçlara ulaşılamamıştır.

Mod birleştirme yöntemi ile deprem kuvvetlerinin uygulanacağı yapılarda ek dışmerkezlik etkisinin tanımlanması ve yapısal tasarımda uygulanması konusunda Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [1] iki alternatif yöntem sunmaktadır. İlki, hesaplanan eş değer deprem yükünün ( $F_{iE}$ ) kat kütle merkezinin ± %5'i kaydırılmasıyla

bulunan noktaya uygulandığında hesaplanan ek burulma momentlerinin (Eş. 1) kat seviyesi diyaframlarına uygulanması yöntemidir (Şekil 1).

**Şekil 1.** Pozitif ve negatif yönlerde hesaplanan ek kat burulma momentlerinin kat diyaframlarına etki ettirilmesi (Application of additional positive and negative direction torsional moments to story diaphragms)

Diğer uluslararası standartlar ve deprem yönetmeliklerden farklı olarak sunulan ikinci yöntem ise kat kütle eylemsizlik momentlerini  $(\Delta m_{i\theta})$  (Eş. 2) kadar arttırılmasına dayanmaktadır.

$$\Delta m_{i\theta} = m_i e^2 \tag{2}$$

Eş. 2'de  $m_i$  kat kütlesini, e ise incelenen deprem doğrultusuna dik doğrultudaki kat boyutunun %5'inin hesaplanması ile elde edilen ek dışmerkezliği göstermektedir. Söz konusu yöntem, temelde kat kütle merkezinin e kadar kaydırılması ile değişen kat kütle eylemsizlik momentinin yapısal analize tanımlanmasını esas almaktadır. Eş. 2, paralel eksen teoreminin uygulaması olarak taşınmış kat kütle eylemsizlik momentinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Ek dışmerkezlik etkisinin dikkate alındığı nihai kat kütle eylemsizlik momenti belirlenebilmektedir (Eş. 3).

$$I_{i\theta,son} = I_{i\theta} + m_i e^2 \tag{3}$$

Herhangi bir kattaki kütle eylemsizlik momentini ifade eden  $I_{i\theta}$ , yapısal döşeme gibi dikdörtgen katı cisim davranışına sahip bir geometri için Eş. 4'te sunulduğu gibi hesaplanabilir.

$$I_{i\Theta} = \frac{mi(L_x^2 + L_y^2)}{12} \tag{4}$$

Eş. 3'te verilen arttırılmış kat kütle eylemsizlik momenti, ± %5 ek dışmerkezlik etkisini içermektedir. Söz konusu yöntem bu açıdan ek kat burulma momentlerinin her iki yön için hesaplanarak uygulandığı ilk alternatife göre hesap kolaylığı vaat etmektedir. Diğer yaygın kullanılan uluslararası standartlarda [2, 3] yer almayan arttırılmış kat kütle eylemsizlik momenti yöntemi TBDY-2018'e [1] özgü olması ile de dikkat çekmektedir. Bu sebeplerden dolayı yöntemin detaylı incelenmesi ve davranışa etkisinin irdelenmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada, ek dışmerkezlik etkisinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde [3] tanımlandığı haliyle yapısal tasarıma uygulandığı takdirde deprem kuvvetleri altındaki doğrusal olmayan davranışa etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, farklı plan asimetrisi oranlarına sahip az katlı kayma çerçevesi yapıların depreme dayanıklı tasarımında yukarıda tartışılan her iki yöntem ile ek dışmerkezlik etkisi dikkate alınmıştır. Elde edilen tasarımlar doğrusal olmayan dinamik analizlere tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar kapsamında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne özgü yöntemin davranışa etkisi tartışılmıştır.

# 2. Teorik Metod (Theoretical Method)

Çalışma kapsamında, değişen plan asimetrisi oranlarına sahip dört katlı kayma çerçevesi yapıları tasarlanmış ve analizlere tabi tutulmuştur. Kayma çerçevesi yapıların tipik kat planı ve boyutları Şekil 2'de sunulmuştur. Yapıların her katta üç serbestlik derecesi vardır ve 300 ton kütleye sahip döşemeler çok yüksek rijitliğe sahiptir. Serbestlik dereceleri, aynı zamanda kütle merkezi olan kat planının orta noktasında tanımlanmıştır. Her katın iki asal yönünde biri diğerinden daha rijit olmak üzere yük taşıyıcı iki ana elemanın bulunduğu yapılar, bu sebeple plan asimetrisi göstermektedir.



Şekil 2. Kayma çerçevesi yapıların tipik kat planı (Typical floor plan of shear frame structures)

Yük taşıyıcı elemanlar, çerçeve ve perde duvarlardan oluşan sistemlerin idealize edilmiş temsilleri olarak rijit döşemeleri birbirine bağlamaktadır. Bu sayede incelenen yapılarda kayma çerçevesi davranışı elde edilmiştir. Taşıyıcı elemanlar, deprem etkisi altında beklenen deformasyon dağılımlarına göre isimlendirilmiştir. Bu bağlamda, bir asal yönde diğerine göre daha az rijitliğe sahip elemanlar daha esnek davranacağı ve fazla deformasyon göstereceği için esnek kenar (EK) elemanı olarak isimlendirilmiştir. Benzer bir şekilde, daha yüksek rijitliği bulunan diğer eleman ise rijit kenar (RK) elemanı olarak betimlenmiştir.

Şekil 2'de verilen tipik kat planına sahip dört katlı kayma çerçevelerinin genel görünümü Şekil 3'te sunulmuştur. Seçilen plan asimetrisinin katlar boyunca aynı şekilde uygulanması ile elde edilen dört katlı kayma çerçevesi sistemler, her katta aynı rijitliğe sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Plan asimetrisi miktarları, kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki mesafenin ilgili yönde kat boyutuna oranı olmak üzere e = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25 olarak seçilmiştir.

#### 2.1. Yapısal Tasarım (Structural Design)

Kayma çerçevesi yapıların dinamik özelliklerinin benzer olması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, tüm yapıların her iki asal yöndeki ayrık

(uncoupled) periyotları aynı seçilmiştir. Yapıların iki asal yöndeki toplam rijitlikleri, X asal yönündeki ayrık periyodu  $T_x = 0.7$ s, Y asal yönündeki ayrık periyodu da  $T_y = 0.5$ s olacak şekilde belirlenmiştir. Bu rijitliklerin her kata eşit olarak dağıtılması ile yapısal sistemler oluşturulmuştur. Elde edilen dört katlı kayma çerçevesi yapıların değişen plan asimetrisi oranları sebebiyle, bağlı (coupled) periyotları hedeflenen ayrık periyot değerlerinden bir miktar farklılık göstermektedir. Hedeflenen periyot değerleri ile Türkiye yapı stoğunda yaygın olarak bulunan az katlı yapıların dinamik davranışının temsil edilmesi amaçlanmıştır.



**Şekil 3.** Dört katlı kayma çerçevesi yapıların genel görünümü (Elevation view of four-story shear frame structures)

Dört katlı kayma çerçevesi yapılara, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) [1] tanımlanan deprem tehlikesi ve tasarım esasları göz önüne alınarak depreme dayanıklı tasarım uygulanmıştır. Deprem tehlikesi seviyesinin belirlenebilmesi için yapıların Düzce merkezinde ve ZC tipi zeminde bulunduğu var sayılmıştır. Belirlenen konum ve zemin sınıfi için, yapının performans seviyesi olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde Türkiye Deprem Tehlike Haritasından [15] derlenen PGA, *S*<sub>DS</sub>, *S*<sub>D1</sub> değerleri ile yatay elastik tasarım spektrumu Şekil 4'te sunulmuştur.



**Şekil 4.** Yatay elastik tasarım spektrumu (Horizontal elastic design spectrum)

Yapıların tasarımında taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve dayanım fazlalığı katsayısı (D) sırasıyla 6 ve 1.5 olarak alınmıştır. İlgili değerler, yapının tamamen boşluksuz perdelerden oluşan taşıyıcı sistemi için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) tanımlandığı şekilde tasarımda kullanılmıştır. Hesaplanan azaltılmış tasarım spektrumu ile yapılan mod birleştirme yöntemi sonucunda yük taşıyıcı elemanlarda tespit edilen kesme kuvveti talepleri belirlenmiştir. Asimetri oranları farklı yapıların tasarımı esnasında ek dışmerkezlik etkisinin dikkate alınmadığı, kat kütle merkezine ek burulma momentleri (tork) (Eş. 1) etki ettirilmesi ve arttırılmış kütle eylemsizlik momentinin (Eş. 4) uygulanması ile hesaba katıldığı üç farklı durum değerlendirilmiştir. Yük taşıyıcı elemanların yatay yük kapasiteleri, mod birleştirme yönteminden elde edilen kuvvet talepleri ile ek dışmerkezlik etkisinin yarattığı taleplerin toplanması ile belirlenmiştir. Bu bağlamda, 5 farklı plan asimetrisine sahip her kayma çerçevesi yapı için 3 farklı yapısal tasarım elde edilmiştir.

#### 2.1.1. Doğrusal olmayan modelleme (Nonlinear modeling)

Kayma çerçevesi yapıların dinamik analizlerini yapmak ve deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemek için doğrusal olmayan özellikler ile modellenmiştir. Bu amaçla OpenSees [16] platformu tercih edilmiştir. Dünya genelinde performans esaslı deprem mühendisliği araştırmalarında ve uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bu platform, hem akademik tabanlı olması, hem de doğrulanmış doğrusal olmayan davranış formülasyonları sunması sebebiyle analizler için seçilmiştir. Sayısal modeller, Şekil 2 ile uyumlu halde her kat diyafram merkezinde iki öteleme (x, y) ve bir dönme ( $\Theta$ ) serbestlik derecesi tanımlanmasıyla üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Kat kütleleri ve kütle eylemsizlik momentleri, aynı zamanda kütle merkezi olan diyafram geometrik merkezlerinde tanımlanmıştır. Taşıyıcı elemanlar, her katta rijit diyafram tanımları ile kütle merkezine bağlanmıştır. Böylece kayma cercevesi geometrisi elde edilmiştir. Tüm yapısal elemanlarda OpenSees platformu kütüphanelerinde mevcut olan iki parçalı doğrusal kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır. Şekil 5'te esnek ve rijit kenar elemanları için şematik olarak sunulan kuvvet-şekil değiştirme ilişkisi, her iki asal yönde yer alan yapısal elemanlara atanmıştır. Taşıyıcı elemanların elastik ötesi davranışında rijitlik verilmemiştir. Kayma çerçevelerindeki değişken plan asimetrisi, kullanılan yapısal elemanlara farklı yanal rijitlik ( $k_{rijit}, k_{esnek}$ ) değerleri tanımlanarak elde edilmiş ve beş farklı asimetri oranına sahip yapının dinamik analizlerinin yapılacağı sayısal modeller elde edilmiştir.



Şekil 5. Her iki asal yöndeki taşıyıcı elemanlara tanımlanan iki parçalı doğrusal kuvvet-şekil değiştirme ilişkileri (Bilinear force-deformation relationships assigned to load resisting members in both directions)

#### 2.2. Kuvvetli Yer Hareketi Kümesi (Strong Ground Motion Set)

Doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılacak kuvvetli yer hareketi kümesi PEER NGA-West 2 [17] kuvvetli yer hareketi veri tabanından derlenmiştir. Ortalama kayma dalgası hızına göre ZC veya ZD tipi zeminde kaydedilmiş, Joyner-Boore mesafeleri 40 kilometreden az, moment büyüklüğü 6.0 ila 7.6 arasında olan 11 yer hareketi çifti bu veri tabanından seçilmiştir. Söz konusu kuvvetli yer hareketlerinin temel sismolojik özellikleri ve her iki asal yönü dikkate alınarak hesaplanan bileşke ivme, hız ve deplasman talepleri Tablo 1'de sunulmuştur. Yer hareketi çiftlerine TBDY-2018 [1] uyarınca basit ölçeklendirme işlemi uygulanmış ve tasarımda kullanılan deprem tehlikesi ile uyumlu hale getirilmiştir. Kuvvetli yer hareketi çiftlerinin ölçeklendirilmiş SRSS ivme tepki spektrumları ile ortalama ivme tepki spektrumu, tasarım spektrumu ile Şekil 6'da verilmiştir.

 
 Tablo 1. Kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarının karakteristik özellikleri (Seismological properties of utilized strong ground motion records)

KYH No	Depremin Merkezi	Yılı	Büyüklüğü (Mw)	Fay Mekanizması	Joyner- Boore Mesafesi (km)	V <sub>S30</sub> 'a göre Zemin Tipi	Bileşke PGA (g)	Bileşke PGV (cm/s)	Bileşke PGD (cm)
KYH1	Manjil, Iran	1990	7.37	Doğrultu Atım	12.56	ZC	0.505	43.78	18.96
KYH2	Morgan Hill	1984	6.19	Doğrultu Atım	3.22	ZC	0.343	28.53	5.39
KYH3	Superstition Hills	1987	6.54	Doğrultu Atım	0.95	ZD	0.451	77.19	37.19
KYH4	Parkfield	1966	6.19	Doğrultu Atım	9.58	ZD	0.377	23.92	3.85
KYH5	Victoria, Meksika	1980	6.33	Doğrultu Atım	13.80	ZC	0.572	27.06	10.85
KYH6	Düzce	1999	7.14	Doğrultu Atım	3.93	ZC	0.737	28.24	6.09
KYH7	Kocaeli	1999	7.51	Doğrultu Atım	13.60	ZD	0.326	55.32	29.58
KYH8	Imperial Valley	1979	6.53	Doğrultu Atım	0.56	ZD	0.420	79.15	40.83
KYH9	Imperial Valley	1979	6.53	Doğrultu Atım	3.86	ZD	0.538	56.80	32.99
KYH10	Hector Mine	1999	7.13	Doğrultu Atım	10.35	ZC	0.306	34.21	17.71
KYH11	Kobe, Japonya	1995	6.90	Doğrultu Atım	22.50	ZD	0.267	21.66	7.60

Kaatsız / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1705-1714



Şekil 6. Kuvvetli yer hareketlerinin ölçeklendirilmiş SRSS ivme tepki spektrumları. Ölçekleme periyod aralığı düşey çizgilerle işaretlenmiştir (Scaled SRSS spectra of strong ground motion records. Period range used in scaling is marked by dashed lines)

#### 2.3. Doğrusal Olmayan Dinamik Analiz (Nonlinear Time History Analysis)

Farklı plan asimetrisi oranlarına sahip kayma çerçevesi yapıların üç farklı ek dışmerkezlik yaklaşımı ile tasarlanmış ve doğrusal olmayan özellikler ile oluşturulmuş sayısal modelleri, kuvvetli yer hareketi kümesini oluşturan kayıtlar kullanılarak dinamik analizlere tabi tutulmuştur. Dinamik analizler, kuvvetli yer hareketi kayıtlarının her iki asal yön bileşeninin yapıya etki ettirilmesi ile çift eksenli olarak yapılmıştır. Iraksama problemi ile karşılaşılmayan dinamik analizlerden, kat deplasmanları, katlar arası ötelemeler ve yapısal elemanların süneklikleri yer hareketi kümesi ortalaması olarak hesaplanmış ve sonuç olarak derlenmiştir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Farklı plan asimetrisi oranlarına sahip yapıların dinamik analizleri sonucunda derlenen her iki asal yönde yer alan taşıyıcı eleman deplasman taleplerinin, Eş. 5 ve Eş. 6'da sunulduğu üzere kütle merkezi deplasmanı ile normalize edilmiş ve kat bazında ortalamaları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla X ve Y asal yönleri için verilmiştir.

$$DO_{rijit} = \left(\sum_{i=1}^{4} \frac{u_{i,rijit}}{u_{i,KM}}\right) / 4 \tag{5}$$

$$DO_{esnek} = \left(\sum_{i=1}^{4} \frac{u_{i,esnek}}{u_{i,KM}}\right) / 4 \tag{6}$$

Şekil 7 ve Şekil 8'de her yapının ek dışmerkezlik etkisi dikkate alınmadan, ek dışmerkezlik etkisi için ek kat burulma momenti etki ettirilerek ve arttırılmış eylemsizlik momenti tanımlanarak gerçekleştirilen tasarımlarının deprem etkisi atlındaki tepkileri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. X asal yönü için hesaplanan normalize uç deplasmanlar talepleri, ek dışmerkezlik etkisi dikkate alınmayan ve ek burulma momenti ile hesaba katılan yaklaşımlarda büyük benzerlik göstermektedir.



Şekil 7. X asal yönü a) Rijit kenar b) Esnek kenar taşıyıcı elemanlarının kütle merkezi ile normalize edilmiş deplasman oranları

(Normalized displacements of X direction a) stiff edge b) flexible edge load resisting members with respect to center of mass)

Arttırılmış kütle eylemsizlik momenti ile yapılan modellemede yüksek plan asimetrisinde esnek kenarda daha büyük taleplere, rijit kenarda ise az taleplerle karşılaşılmaktadır. Bu hesap yaklaşımının, yüksek plan asimetrisine sahip yapılarda derlenen kat bazında deplasman talebi dağılımını bir miktar olumsuz etkilemesi söz konusu olabilmektedir. İlave kütle eylemsizlik momenti uygulanması sebebiyle burulma esnekliğinin bir miktar artması [26] ile uç deplasmanlarının dağılımının bu durumdan etkilendiği görüşü öne çıkmaktadır. Yüksek plan asimetrisi kaynaklı burulma düzensizliği olan yapılarda benzer bir tepki daha önce de gözlenmiştir [18]. Y asal yönünde ise, arttırılmış kütle eylemsizlik momentinin hesaba katıldığı durumda elde edilen ortalama tepkilerde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. İlave tork etkisi ile ek dışmerkezlik modellendiği durumda ise kütle merkezine göre oranlı deplasman dağılımının düşük de olsa bir miktar bozulduğu görülmektedir.



Şekil 8. Y asal yönü a) Rijit kenar b) Esnek kenar taşıyıcı elemanlarının kütle merkezi ile normalize edilmiş deplasman oranları

(Normalized displacements of Y direction a) stiff edge b) flexible edge load resisting members with respect to center of mass)

Yukarıda sunulan sonuçlar ışığında, burulma etkili davranışın önemli bir göstergesi olan deplasman talebi dağılımlarının daha detaylı incelenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, kayma çerçevesi yapıların kuvvetli yer hareketi kümesi ile yapılan dinamik analizleri sonucunda her katta elde edilen en büyük öteleme talebinin ortalama öteleme talebine oranlarının kat bazında ortalamaları Eş. 7 uyarınca hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin değişen plan asimetrisine göre dağılımları Şekil 9'da her iki asal yön için verilmiştir.

$$\eta_{X,Y} = \left(\sum_{i=1}^{4} \frac{\Delta_{i,maks}^{X,Y}}{\Delta_{i,ort}^{X,Y}}\right) / 4 \tag{7}$$

Şekil 9'da sunulduğu üzere, ek dışmerkezlik etkisinin arttırılmış kütle eylemsizlik momenti ile verildiği yapıların taşıyıcı sistemlerindeki kat öteleme dağılımı, etkinin dikkate alınmadığı tasarım ile yüksek derecede benzerlik göstermektedir. Ek dışmerkezlik modellemesinin ek kat burulma momentleri ile yapıldığı durumda, X asal yönünde bir miktar öteleme dağılımını düzeltici yönde sonuç elde edildiği, Y asal yönünde ise tam tersi bir durum oluştuğu gözlemlenmiştir. Önceden de gözlemlendiği üzere, [12] söz konusu modelleme yaklaşımında etki ettirilen ilave kuvvetler sebebiyle dayanımların artması ve buna bağlı olarak burulma bağımlı (torsionally coupled) davranışın daha yüksek olduğu Y asal ekseninde talep dağılımına olumsuz etkisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. a) X asal yönü b) Y asal yönünde her kattaki en yüksek öteleme talebinin ortalama öteleme talebine oranının kat bazında ortalamaları

(Mean ratios of maximum story drift to story average drift for a) X direction b) Y direction)

Ek dışmerkezliğin tasarıma etki ettirilmesindeki farklı yaklaşımların doğrusal olmayan tepkiye etkisini incelemek amacıyla kayma çerçevesi yapıların yük taşıyıcı elemanlarında dinamik analizler sonucunda hesaplanan süneklik oranı ( $\mu$ ) taleplerinin kat bazında ortalama değerleri X asal yönü esnek kenar elemanı için Tablo 2'de, rijit kenar elemanı için Tablo 3'te verilmiştir. Benzer bir şekilde, Y yönü esnek kenar elemanı süneklik oranı Tablo 4'te, rijit kenar elemanı süneklik oranı da Tablo 5'te sunulmuştur. Söz konusu tablolarda, ek dışmerkezlik etkisinin dahil edilmediği yapıların süneklik oranları ile, ek kat burulma momenti ve arttırılmış kütle eylemsizlik momenti uygulanarak ek dışmerkezliğin dahil edildiği yapıların süneklik oranları arasındaki farklar da yüzdelik olarak yer almaktadır.

**Tablo 2.** X asal yönü esnek kenar elemanının ortalama süneklik oranı taleplerinin karşılaştırması (Comparison of mean ductility ratio demands of X direction flexible edge member)

е	Ek Dışmerkezlik Yok	Ek Kat Burulma Momenti	Fark (%)	Arttırılmış Eylemsizlik Momenti	Fark (%)
0.05	4.8	4.0	-18	4.8	-0.19
0.10	4.4	3.6	-21	4.4	-0.01
0.15	3.9	3.3	-20	3.9	-0.21
0.20	3.3	2.9	-17	3.3	-0.17
0.25	3.1	2.7	-18	3.1	-0.10

**Tablo 3.** X asal yönü rijit kenar elemanının ortalama süneklik oranı taleplerinin karşılaştırması (Comparison of mean ductility ratio demands of X direction stiff edge member)

е	Ek Dışmerkezlik Yok	Ek Kat Burulma Momenti	Fark (%)	Arttırılmış Eylemsizlik Momenti	Fark (%)
0.05	5.6	4.8	-15	5.6	-0.13
0.10	6.2	5.3	-17	6.2	-0.07
0.15	6.8	5.9	-17	6.8	-0.08
0.20	7.8	6.7	-18	7.7	-0.15
0.25	8.8	7.6	-15	8.7	-0.11

Tablo 2-Tablo 5'te görüleceği üzere, ek kat burulma momentinin uygulandığı yapılarda süneklik talepleri önemli oranda azalmaktadır. Burulma bağımlı davranışın daha yüksek olduğu ve daha rijit olan Y asal yönü için bu durum daha belirgin olarak öne çıkmaktadır. Geçmiş çalışmalarda burulmada rijit sistemlerde ek dışmerkezlik etkisinin uygulanmasının davranışa etkisinin sınırlı olduğu tartışılmış olsa da [16, 17], bu çalışma kapsamında incelenen yapıların burulma momentlerinin etkisi ile ek dışmerkezliğin uygulanmasının doğrusal olmayan davranışta önemli ölçüde iyileşme sağlayabileceği tespit edilmiştir. Söz konusu yaklaşımın taşıyıcı elemanların dayanımını arttırma temelli olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuc beklentiler dahilindedir. Öte yandan, arttırılmış kütle eylemsizlik momentinin uygulanması halinde yapılarda tespit edilen doğrusal olmayan taleplerin neredeyse hiç değişmediği görülmüştür. İlave kütle eylemsizlik momentinin burulma esnekliğini bir miktar arttırıp yüksek plan asimetrisine sahip yapılardaki uc deplasmanlarının kütle merkezi deplasmanına göre yükselmesine sebep olmuştur (Şekil 7). Fakat, artan burulma esnekliği sonucunda taşıyıcı elemanlarda oluşan taleplerin tasarım dayanımlarını önemli derecede etkileyecek şekilde olmadığı ve bu sebeple doğrusal olmayan dinamik tepkiyi değiştirmediği tespit edilmiştir.

Sunulan sonuçlar ışığında, doğrusal olmayan davranışı iyileştirmesi açısından her iki ek dışmerkezlik etkisini uygulama yaklaşımları arasından ek kat burulma momentlerinin ettirilmesi yöntemi ön plana çıkmaktadır. Öte yandan uygulama kolaylığı sağlayan arttırılmış kütle eylemsizlik momenti yöntemi, kat planı bazında talep dağılımlarının görece daha düzenli elde edilmesine imkân verirken yapısal elemanların dayanımını iyileştirici bir etki ortaya koyamamaktadır.

**Tablo 4.** Y asal yönü esnek kenar elemanının ortalama süneklik oranı taleplerinin karşılaştırması (Comparison of mean ductility ratio demands of Y direction flexible edge member)

е	Ek Dışmerkezlik Yok	Ek Kat Burulma Momenti	Fark (%)	Arttırılmış Eylemsizlik Momenti	Fark (%)
0.05	7.1	5.5	-32	7.2	0.46
0.10	6.3	4.8	-32	6.4	1.08
0.15	5.5	3.9	-47	5.6	1.56
0.20	6.5	4.5	-43	6.5	0.70
0.25	7.3	5.5	-34	7.3	-0.03

**Tablo 5.** Y asal yönü rijit kenar elemanının ortalama süneklik oranı taleplerinin karşılaştırması (Comparison of mean ductility ratio demands of Y direction stiff edge member)

е	Ek Dışmerkezlik Yok	Ek Kat Burulma Momenti	Fark (%)	Arttırılmış Eylemsizlik Momenti	Fark (%)
0.05	9.3	7.0	-41	9.3	0.39
0.10	10.8	7.8	-48	10.9	1.13
0.15	10.7	7.1	-60	10.9	1.40
0.20	12.4	8.1	-59	12.6	1.07
0.25	13.7	9.9	-46	13.7	-0.12

#### 4. Simgeler (Symbols)

D: Dayanım fazlalığı katsayısı. DO: Deplasman oranı (Eş. 5 ve 6). Yapısal planda her iki asal yön için kütle merkezi ile rijitlik е: merkezi arasındaki mesafe. EK: Plan asimetrisi bulunan sistemlerin beklenen deplasman dağılımına göre tanımlanan esnek kenarı. En yüksek kat ötelenmesinin ortalama kat ötelenmesine  $\eta_{X,Y}$ : oranının kat bazında ortalaması.  $\Delta_i^{X,Y}$ : Her iki asal yönden birinde i'nci kat öteleme talebi.  $\Delta m_{i\theta}$ : Ek dışmerkezlik etkisinin modellenebilmesi için kat kütle eylemsizlik momentine uygulanan artım. Dikkate alınan deprem doğrultusunda kat kütle merkezine  $F_{iE}$ : etkiyen eşdeğer deprem yükü. Fy rijit,esnek: Doğrusal olmayan sayısal modelde taşıyıcı elemanlara atanan akma dayanımları. Kat kütle eylemsizlik momenti  $I_{i\theta}$ : Her iki asal yönde taşıyıcı sistemi oluşturan yapısal krijit,esnek: elemanların yanal rijitlikleri. KM: Kütle merkezi. KYH: Kuvvetli yer hareketi.  $M_{ib}$ : Ek dışmerkezlik etkisine karşı gelen ek kat burulma momenti. i'nci kat kütlesi  $m_i$ : Depremin moment büyüklüğü.  $M_w$ : RM: Kat rijitlik merkezi Doğrusal olmayan analiz sonrası yapısal elemanlarda μ: hesaplanan süneklik oranı. PGA: Kuvvetli yer hareketinin en büyük yer ivmesi. PGV: Kuvvetli yer hareketinin en yüksek hız değeri. PGD: Kuvvetli yer hareketinin en büyük yer değiştirme değeri. R: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı. RK: Plan asimetrisi bulunan sistemlerin beklenen deplasman dağılımına göre tanımlanan rijit kenarı. Kısa periyot tasarım ivme katsayısı. SDS: 1.0 saniye periyodu harita spektral ivme katsayısı.  $S_{DI}$ :  $T_{x,y}$ : Yapının sırasıyla X ve Y asal yönlerinde hakim doğal titresim perivotları  $\theta$ : Yapının her katında döndürme (burulma) yönü serbestlik derecesi. Vs30: Zeminin üst 30 metresindeki kayma dalgası hızı. i'nci kat deplasman talebi  $u_i$ : Yapının her katında sırasıyla X ve Y asal yönleri serbestlik  $u_{x,y}$ : dereceleri. uy rijit, esnek: Doğrusal olmayan sayısal modelde taşıyıcı elemanların akma şekil değiştirmeleri.

### 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, değişen oranlarda plan asimetrisi bulunan az katlı kayma çerçevesi yapıların TBDY-2018'e [1] göre tasarımında dikkate

alınan ek dışmerkezlik etkisinin, deprem kuvvetlerinin mod birleştirme yöntemi ile yapılan analizden elde edilmesi durumunda uygulanabilecek iki farklı yöntem ile hesaba katılmasının yapısal davranışa etkisi incelenmiştir. Çok katlı kayma çerçevesi yapılar, ek dışmerkezlik etkisi olmaksızın, ek dışmerkezlik etkisinin burulma momentlerinin kat diyafram merkezlerine etki ettirilerek ve kat kütle eylemsizlik momentinin arttırılarak dikkate alındığı üç farklı yük hali ile tasarlanmış ve doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Doğrusal olmayan davranış, deprem tehlikesi ile uyumlu olacak şekilde basit ölçekleme yapılmış kuvvetli yer hareketi kümesi ile yapılan çift eksenli dinamik analizler sonucunda elde edilmiştir. Farklı plan asimetrilerine sahip ve üç farklı tasarımı olan her yapının deplasman, kat arası öteleme ve taşıyıcı elemanların süneklik oranı gibi sonuç parametreleri derlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar ışığında, ek dışmerkezlik etkisinin arttırılmış kütle eylemsizlik momenti ile hesaba katıldığı tasarımlarda incelenen sonuç parametrelerin az değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Sadece, yüksek plan asimetrisi olan sistemlerde uç deplasmanlarının kütle merkezine göre oranlarının bir miktar olumsuz etkilenebileceği gözlemlenmiştir. Bu durumun arttırılmış kütle eylemsizlik momentinin modele uvgulanması ile burulma esnekliğinin artış göstermesi sebebiyle gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Doğrusal olmayan tepki parametresi süneklik oranına bakıldığında ise, arttırılmış kütle eylemsizlik momenti ile ek dışmerkezlik tanımının yapı genelindeki süneklik talebi dağılımını önemli oranda değiştirmediği tespit edilmiştir. Kayma çerçevesi yapılar için elde edilen sonuçlar ışığında, söz konusu yaklaşımla yapılan ek dışmerkezlik modellemesinin burulma esnekliğini önemli seviyede arttırmadığı ve bu sebeple taşıyıcı elemanlarda önemli ölçüde bir ek kuvvet talebi yaratmadığı sonucuna varılmıştır. Hesaplanan taleplerin çok değişmemesi sebebiyle, taşıyıcı elemanların kapasitelerinin de ek dışmerkezliğin dikkate alınmadığı tasarımlara göre çok fark göstermediği tespit edilmiştir. Bu durumun sonucu olarak doğrusal olmayan davranışta belirgin (süneklik azaltıcı) etki gözlemlenememistir.

Öte yandan, ek dışmerkezliğin kat merkezlerine uygulanan burulma momentleri ile hesaba katıldığı tasarımlarda taşıyıcı eleman deplasman oranı dağılımlarında dikkate alınan tüm plan asimetrisi oranları için değişimler gözlemlenmiştir. Rijit kenar uç deplasmanlarının kütle merkezi deplasmanına oranla azaldığı görülmüş, fakat ortalama deplasman taleplerinin burulma bağımlı davranışın yüksek olduğu asal yönde az da olsa olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir. Süneklik oranlarının incelenmesi sonucunda ise, söz konusu yöntemin deprem hesabında kullanılması durumunda süneklik taleplerinin ek dışmerkezliğin dikkate alınmadığı sistemlerde elde edilen sonuçlara göre önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır. Uygulanan torkların taşıyıcı elemanlarda ilave reaksiyon kuvvetleri doğurması sebebiyle tasarım kuvvetlerinin doğrudan artması sonucunda kapasitelerde daha belirgin değişim meydana gelmiştir. Bu durum da, incelenen kayma çerçevesi yapıların taşıyıcı elemanlarında kapasite artışına neden olmuş ve doğrusal olmayan davranışta tespit edilen süneklik oranlarını azaltıcı sonucu vermiştir.

Tartışılan sonuçlar, kayma çerçevesi şeklinde ve yapı genelinde tek dayanım fazlalığı oranının uygulandığı yapı tiplerinde gözlemlenen davranışla belirlenmiştir. Taşıyıcı elemanların çerçeve sistemi oluşturduğu, mimari ya da işlevsel nedenlerle bazı taşıyıcı elemanlarda kullanılan büyük kesitlerin yol açtığı düzensiz dayanım fazlalığı dağılımının olduğu yapılarda davranış farklılık gösterebilmektedir. Söz konusu sistemlerde ek dışmerkezlik etkisi modelleme yaklaşımının yapısal davranışa etkisini belirlemek için çalışmalar sürdürülmektedir.

#### Kaynaklar (References)

- Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı (AFAD), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Ankara, 2018.
- American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16), 2017.
- **3.** European Committee for Standardization, EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, 2004.
- Chandler A.M., Duan X.N., Performance of asymmetric code-designed buildings for serviceability and ultimate limit states, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 26 (7), 717-735, 1997.
- 5. Humar J.L., Kumar P., A new look at the torsion design provisions in seismic building codes. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, Yeni Zelanda, 2000.
- Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos S.A., Accidental design eccentricity: Is it important for the inelastic response of buildings to strong earthquakes?, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30 (9), 782-797, 2010.
- Lin J.L., Wang W.C., Tsai K.C., Suitability of using the torsional amplification factor to amplify accidental torsion, Engineering Structures, 127, 1-17, 2016
- Anagnostopoulos S.A., Krykos M.T., Stathopoulos K.G., Earthquake induced torsion in buildings: critical review and state of the art, Earthquakes and Structures, 121 (2), 305-377, 2015.
- **9.** De La Llera J.C., Chopra A.K., Evaluation of code accidental-torsion provisions from building records, Journal of Structural Engineering, 120 (2), 597-616, 1994.
- De La Llera J.C., Chopra A.K., Accidental torsion in buildings due to stiffness uncertainty, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23 (2), 117-136, 1994.
- De La Llera J.C., Chopra A.K., Accidental torsion in buildings due to base rotational-excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23 (9), 1003-1021, 1994.
- **12.** Sucuoğlu H., Kaatsız K., Torsional ductility spectrum for predicting ductility distribution in simple asymmetric-plan structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 50 (2), 538-559, 2021.
- Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos S.A., Inelastic torsion of multistorey buildings under earthquake excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34 (12), 1449-1465, 2005
- Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos S.A., Effects of accidental design eccentricity on the inelastic earthquake response of asymmetric buildings, Proceedings of the 4th European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, Selanik, Yunanistan, 2005
- 15. Rutenberg. A., EAEE task group 8: Behavior of irregular and complex structures state of the art report: Seismic nonlinear response of codedesigned asymmetric structures, Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, Fransa, 1998.
- Chandler A.M., Correnza J.C., Hutchinson G.L., Influence of accidental eccentricity on inelastic seismic torsional effects in buildings, Engineering Structures, 17 (3), 167-178, 1995.
- DeBock D.J., Liel A.B., Haselton C.B., Hooper J.D., Henige R.A., Importance of seismic design accidental torsion requirements for building collapse capacity, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 43 (6), 831-850, 2014.
- Newmark N.M., Rosenblueth. E., Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, Englewood Cliff, NJ, A.B.D., 1971.
- Dimova S.L., Alashki I., Seismic design of symmetric structures for accidental torsion, Bulletin of Earthquake Engineering, 1, 303-320. 2003.
- Aviles. J. Suarez M., Natural and accidental torsion in one-storey structures on elastic foundation under non-vertically incident SHwaves, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35 (7), 829-850, 2006.
- Ramadan O.M.O., Mehanny S.S.F., Mostafa A., Revisiting the 5% accidental eccentricity provision in seismic design codes for multi-story buildings, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Pekin, Cin, 2008.
- De La Colina J., Benitez B., Ruiz S.E., Accidental eccentricity of story shear for low-rise office buildings, Journal of Structural Engineering, 137 (4), 513-520, 2008.

Kaatsız / Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 40:3 (2025) 1705-1714

- 23. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH). https://tdth.afad.gov.tr/.
- Yayın tarihi 2019. Erişim tarihi Aralık 11, 2022. The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees). https://opensees.berkeley.edu/. Yayın Tarihi Mayıs 24, 2021. Erişim 24. tarihi Aralık 1, 2022.
- 25. PEER Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı. http://peer.berkeley.edu/ngawest2/. Yayın Tarihi 2014. Erişim Tarihi Aralık 1, 2022.
- 26. Marusic D., Fajfar P., On the inelastic seismic response of asymmetric buildings under bi-axial excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34 (8), 943-963, 2005.