



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



## Tasarım eksantrikliği için alternatif bir öneri

### *An alternative recommendation for design eccentricity*

*Yazar (Author): Osman AKYÜREK<sup>1</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-8161-1775*

**To cite to this article:** Akyürek O., “Tasarım eksantrikliği için alternatif bir öneri”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 609-623, (2023).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Akyürek O., “Tasarım eksantrikliği için alternatif bir öneri”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 609-623, (2023).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.979143

# Tasarım Eksantrikliği İçin Alternatif Bir Öneri

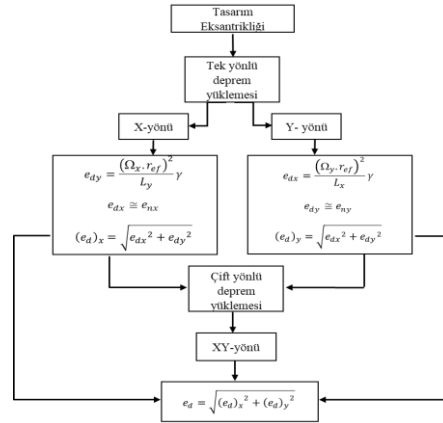
## An Alternative Recommendation for Design Eccentricity

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yeni etkili dönme yarıçapı tanımı / New definition of the radius of gyration
- ❖ Modal ve eşdeğer deprem yükü yöntemi analizleri / Modal and equivalent earthquake force analyses
- ❖ Deprem spektrum analizi / Response spectrum analysis
- ❖ Yeni tasarım eksantriklik kat sayısı tanımı / New desing eccentricity amplification factor definition

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, burulma düzensizliğini yeniden dikkate almak için frekans oranı (her yön için burulma frekansı/öteleme frekansı) ve etkili dönme yarıçapı tanımını içeren alternatif tasarım eksantriklik formülü önerilmiştir.



Şekil. Farklı deprem yükleri altında tasarım eksantrikliğini gösteren tasarım şeması /Figure. Flown chart of design eccentricity under various earthquakes

### Amaç (Aim)

Mevcut yönetmeliklerde burulma düzensizliğinin dikkate alınmasında sunulan varsayım dayalı çözüm yöntemi yerine alternatif analitik bir tasarım eksantrikliği tanımı sunmak. / To propose an alternative analytical definition of design eccentricity instead of using the assumption-based solution method provided in the current codes for considering torsional irregularity.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Model binaların tasarımı ve analizleri Sap 2000 programı yardımıyla yapılmıştır. / Sap 2000 program was employed in the design and analysis of the model buildings.

### Özgünlük (Originality)

Frekans oranı ve etkili dönme yarıçapı tanımını içeren alternatif tasarım eksantriklik formülü sunulmuştur. / An alternative design eccentricity formula is presented, including the definition of frequency ratio and effective radius of gyration.

### Bulgular (Findings)

Önerilen metot ile dış merkezlik etkisi tek katlı bina için spektrum analizine kıyasla neredeyse aynı iken, üç ve beş katlı binalar için yaklaşık olarak %12-%15 arasında daha az bulunmuştur. / By the proposed method, the design eccentricity was almost the same for one-storey building, while it was found to be approximately 12-15% less for three- and five-storey buildings.

### Sonuç (Conclusion)

Önerilen metot ile burulma düzensizliği etkisi yönetmeliğe kıyasla daha yakınsak bir şekilde tahmin edilebilmektedir. / By the proposed method, the effect of torsional irregularity can be estimated more closely compared to the codes.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Tasarım Eksantrikliği İçin Alternatif Bir Öneri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Osman AKYÜREK\***

Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.08.2021 ; Kabul/Accepted : 06.12.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 28.12.2021)

## ÖZ

Bu çalışmada, burulma düzensizliğini yeniden dikkate almak için frekans oranı ve etkili dönme yarıçapı tanımını içeren alternatif tasarım eksantriklik formülü önerilmiştir. Bu amaçla, aynı kat planı ve yapı elemanlarına sahip bir, üç ve beş katlı binaların iki yönlü burulma etkisi altında deprem yer hareketinin çift yönlü spektrum analizleri yapılarak yukarıda adı geçen binalar Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) tasarımına göre incelenmiştir. Bu çerçevede, elde edilen sonuçlar, TBDY-2018 tasarım parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan sonuçlara göre, ek dışmerkezliğin her bir kattaki burulma rijitliği ve dönme ile doğru orantılı olduğu saptanmıştır. Bir başka deyişle, yapının plandaki burulma etkisinin çoğalması depremin yapıya etkidiği yöndeki ek dışmerkezlikte bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, önerilen yöntemle göre ek dışmerkezlik etkisi tek katlı bina için spektrum analiz sonucuyla neredeyse aynıken bu durum üç ve beş katlı binalarda ise yaklaşık olarak %12-%15 arasında daha az bulunmuştur. Sonuç olarak önerilen yöntem ek dışmerkezlik etkisini tahmin etmede mevcut yönetmeliğe göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Burulma düzensizliği, ek dışmerkezlik, kütle merkezi (KM), rijitlik merkezi (RM), deprem yönetmeliği TBDY-2018

# An Alternative Recommendation for Design Eccentricity

## ABSTRACT

In this study, a new recommendation for the design eccentricity is proposed. One-story; three-story; and five-story elastic systems with all the same slab, column, beam sizes, and their orientations in the plane were investigated according to the Turkish Earthquake Building Code (TEBC-2018) by Response Spectrum Analysis (RSA). The obtained results are compared with the TEBC-2018 design parameters. The results showed accidental eccentricity is proportional to torsional stiffness and rotational response. If the rotational response increases, it leads to an increase in accidental eccentricity instead of translational stiffness and response in the direction where the earthquake strikes the structure. In addition, the proposed method was approximately the same as RSA for a single-story building by considering the effect of the accidental eccentricity. At the same time, it was found to be approximately 12-15% less for three- and five-story buildings. However, it was revealed from the results that the proposed method was more successful in estimating the additional (accidental) eccentricity effect than the current earthquake code.

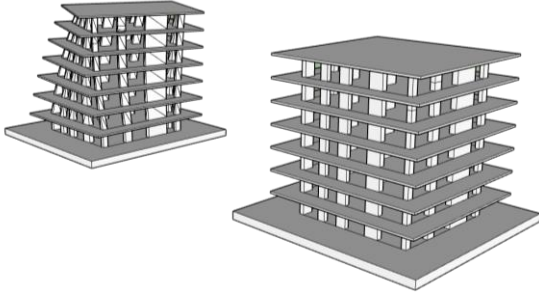
**Keywords:** Torsional irregularity, accidental eccentricity, center of mass (CM), center of rigidity (CR), Turkish Earthquake Building Code (TEBC).

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen yapı teknolojisi ve metotlarıyla, her geçen gün binalar daha yüksek katlı yapılar haline gelmekte ve bu akım da gelişmişliğin bir göstergesi olarak birçok insan tarafından kabul edilmektedir. Modern kontrol sistemler (uyarlı kütle sönümleyiciler, temel sismik izolatörler, vb.) ve daha esnek/dayanımlı malzeme kullanımıyla çok yüksek binaların inşasını mümkün kılmaktadır. Bu binalar ise genellikle sofistike düzensiz mimariye sahip olarak çokça karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, bu tür yüksek katlı binalar için dinamik yüklemeler yani deprem veya rüzgâr yükleri, hayati bir vaziyet almaktadır [1].

Deprem esnasında binada meydana genel dinamik olaylar kısaca şöyle özetlenebilir. Yüksek enerji salınımıyla meydana gelen deprem, binaya kütle merkezinden (KM) etki ederken bina da bu dinamik olaya karşı tepkisini rijitlik merkezinden (RM) vermektedir. Eğer bu iki merkez birbiriyle çakışmayıp ikisi arasında bir mesafe varsa buna eksantriklik veya dışmerkezlik denir. Bu eksantriklik sebebiyle deprem ve tepki kuvvetleri birbirini tam olarak sönümlemediğinden binalarda ekstra bir burulmaya (dönmeye) sebebiyet vermektedir (Şekil (1)'de görüldüğü gibi). Bu duruma inşaat mühendisliği terminolojisinde yatay kuvvetten dolayı oluşan dönme (YK-D) etkisi denir. Bu YK-D'nin etkisiyle düzensiz binalarda yatay yer değiştirmedeki artış aynı özelliklere sahip düzenli binaya kıyasla % 50'yi görebilmektedir [2-4].

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : oakyurek@nevsehir.edu.tr



**Şekil 1.** Üç boyutlu yapı görünümü ve yapıya ait burulma modu (Three-dimensional view of the structure and its torsional mode)

Yapıların deprem etkisi altındaki davranışları burulma düzensizliği sebebiyle önemli derecede değişmektedir. Bu burulma düzensizlikleri binada ciddi yapısal hasarlara sebebiyet vermektedir. Örneğin, 1985 yılında meydana gelen ve dünyada en çok araştırılan depremlerden biri olan Meksika depreminden sonraki saha incelemelerindeki bulgulara göre, toplam 177 bina tamamen çökmüşken 85 bina ise kısmi çöküntüye maruz kalmıştır. Ayrıca bunlardan %15'i ise YK-D'ye yani burulma düzensizliğine sahip binalar olduğu tespit edilmiştir. Bu burulma düzensizliğine sahip binaların %42'sinin köşe binalar olduğu belirtilmektedir [5], [6].

Burulma düzensizliği birçok araştırmacı tarafından çalışılmış, hala çalışılmakta ve gelecekte de çalışılacak olan önemli bir yapı mühendisliği konusudur. Deprem yönetmelikleri de bu çalışmalar sayesinde yeni tavsiye ve önerilerle her geçen gün geliştirilmektedir. Tek katlı çift yönlü eksantrik binaların (yani x- ve y- yönünde eksantrik) tek yönlü deprem yüklemesi altındaki çalışmaların sonuçları özet olarak, yatay kuvvetten dolayı oluşan dönme (YK-D) etkisiyle binada taban kesme kuvveti, devrilme momenti ve tepe yerdeğiştirmesi azalmaktadır. Eğer deprem kuvvetinin etki ettiği yöne dik olan yönde eksantriklik artırılrsa, burulma momenti artmaktayken deprem kuvvetiyle aynı yönde eksantriklik artırılrsa burulma momenti azalmaktadır. Bunlara ek olarak, YK-D etkisi için kritik faktör burulma frekansının öteleme frekansına oranıdır. Eğer bu oran 0.75 ile 1.25 arasında ise burulma düzensizliği etkisi kritik duruma gelmektedir [7], [8]. Çok katlı yapılarda YK-D etkisi araştırıldığında ise tek katlı yapıların çok katlı yapılara göre daha kritik olduğu ortaya çıkmıştır [9–11]. Çift yönlü deprem yüklemesi tek yönlü yüklemeye göre YK-D etkisini arttırmıştır. Bu yüzden sadece tek yönlü yüklemenin bu durum için yeterli olmayacağı birçok araştırmacı tarafından savunulmuştur. Çünkü çift yönlü deprem yüklemesi sebebiyle kattaki dönme artacağından bu da rijitlikte, dönme yarıçapında değişime, rijitlik merkezinin değişimine sebebiyet vereceğinden çift yönlü deprem yüklemesi daha kritik bir yüklenme durumudur [12–17]. Tüm bu özetlenen çalışmalara rağmen literatürde, YK-D etkileri konusunda hala büyük miktarda özellikle deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır, ancak bazı deneysel çalışmalar şöyle verilebilir [18], [19].

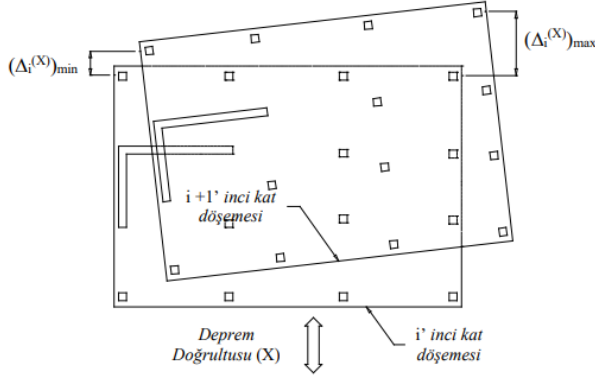
Mevcut yönetmeliklerinin çoğuna göre, yapıda doğal olarak herhangi bir geometrik eksantriklik bulunmasa bile burulma etkilerinin dikkate alınması gerektirir. Geometrik ve fiktif eksantriklikler olan tasarım eksantrikliklerini benimseyerek yapıların güvenliğini artırmak için her yön için bir miktar eksantriklik hesaba katılmıştır. İçsel (geometrik) eksantriklik, basitçe plandaki bir yapının KM ve RM arasındaki mutlak fark olarak tanımlanırken, fiktif eksantriklik genellikle içsel ve hesaplanmış tasarım eksantriklikleri arasındaki fark olarak açıklanır. Birçok sismik tasarım yönetmeliği aynı zamanda binanın deneyimleyebileceği ve artırılmış burulma etkisine dış merkezlik varsayımıyla güvenli bir şekilde maruz kalabileceği tasarım parametreleri sağlar. Ancak bu değerlendirme bile bu tasarım parametrelerini tasarıma dahil etmek için yeterli olmayabilir, çünkü yapısal belirsizlik (kütle / rijitlik dağılımı) ve yer hareketi belirsizliği nedeniyle dış merkezlik değişebilir ve öngörülemezdir. Yer hareketi belirsizliği üzerine bir dizi çalışma birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır ve bunlardan bazıları burada ilgilenen okuyuculara sunulmuştur [20–24].

Sonuç olarak, ek dışmerkezlik, yapısal belirsizlik veya yer hareketi belirsizliği olarak tanımlanan bazı belirsizlikler nedeniyle oluşsa bile deprem yönetmelikleri bu durumu burulma düzensizliği katsayısı ve ek dışmerkezlik katsayısı ile sınırlandırmışlardır. Birçok deprem yönetmeliğine göre, ek dışmerkezlik, deprem yönüne dik bina boyutunun bir yüzdesi (%5 veya %10) olarak dikkate alınmıştır ve bu varsayım dayalı bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu değerlendirme bile, bu eksantriklik parametrelerini dikkate almak için yeterli olmayabilir [25–27]. Bu sebeple bu çalışmada, burulma düzensizliğini yeniden dikkate almak için frekans oranı (her yön için burulma frekansı/öteleme frekansı) ve etkili bir dönme yarıçapı tanımını içeren alternatif tasarım eksantriklik formülü önerilmiştir. Bu amaçla; aynı kat planı ve yapı elemanlarına sahip bir, üç ve beş katlı binalar iki yönlü burulma etkisi altında deprem yer hareketinin tek yönlü spektrum analizleri yapılar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) tasarımına göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, TBDY-2018 tasarım parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, özet olarak ek dışmerkezlik burulma rijitliği ve dönme ile doğru orantılıdır. Yani, yapının plandaki dönmesi artarsa, depremin yapıya etkidiği (x-veya y-) öteleme sertliği ve yanal deplasmanın aksine, ek dışmerkezlikte bir artışa neden olmaktadır.

## 2.TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİNE (TBDY-2018) GÖRE BURULMA DÜZENSİZLİĞİ (TORSIONAL IRREGULARITY ACCORDING TO TURKISH BUILDING EARTHQUAKE CODE)

Burulma düzensizliği TBDY-2018'e göre döşemelerin kendi düzlemleri içinde rijit diyafram olarak çalışmalarını durumunda A1 – burulma düzensizliği şu şekilde tanımlanmıştır: 'Birbirine dik iki deprem doğrultusunun

herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görece kat ötelenmesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görece ötelemeye oranını ifade eden burulma düzensizliği katsayısı  $\eta_{bi}$ 'nin 1,2'den büyük olması durumu Şekil (2)'de gösterilmiştir.  $[\eta_{bi} = (\Delta_i^{(X)})_{max} / (\Delta_i^{(X)})_{ort} > 1,2]$ . Görece kat ötelenmelerinin hesabı,  $\pm$  %5 ek dış merkezlik etkileri de göz önüne alınarak, 4.7'ye göre yapılacaktır. [28].



**Şekil 2.** Burulma düzensizliği tanımı için ortalama ve maksimum görece kat ötelenmelerinin gösterimi (Şekil TBDY-2018 yönetmeliğinden alınmıştır. [28]) (The mean and maximum relative story responses for torsional irregularity definition) (It is taken from TBDY-2018 earthquake code)

$$(\Delta_i^{(X)})_{ort} = \frac{1}{2} \left( (\Delta_i^{(X)})_{max} + (\Delta_i^{(X)})_{min} \right) \quad (1)$$

$$\eta_{bi} = \frac{(\Delta_i^{(X)})_{max}}{(\Delta_i^{(X)})_{ort}} \quad (2)$$

Ortalama görece kat ötelenmesi Denklem (1)'de ve burulma düzensizliği katsayısı ise yukarıda Denklem (2)'de verilmiştir. Eğer  $\eta_{bi} > 1,2$  den büyük ise dış merkezlik eşdeğer deprem yükü yönteminde burulma hesabıyla bölüm 4.7'ye veya modal hesap yöntemiyle yapılacaksa 4.8'e göre yapılması TBDY yönetmeliğinden verilmiştir. Eğer dış merkezlik (fiktif eksantriklik) hesabı bölüm 4.7'ye göre yapılacak olursa  $1,2 < \eta_{bi} \leq 2$  olmak koşuluyla Denklem (3)'te verilen katsayı ile  $\pm$  %5 ek dış merkezlik çarpılarak büyütülecektir.

$$D_{bi} = \left( \frac{\eta_{bi}}{1,2} \right)^2 \quad (3)$$

Ek dış merkezlik burulma momenti eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hesap edilerek Denklem (4)'te görüldüğü gibi hesap edilip, deprem yükünün kaydırılması yerine, kütle merkezine etki ettirilerek ek burulma momenti etkisini dikkate alınmaktadır.

$$M_{ib} = F_{iE}^{(X)} e \quad (4)$$

Burada i'inci kata ait x-yönündeki eşdeğer deprem yükü ( $F_{iE}^{(X)}$ ),  $\pm$  %5 ek dış merkezlik (fiktif eksantriklik) ( $e$ ) ve ek burulma momenti ( $M_{ib}$ ) olarak verilmiştir. Modal hesap yöntemiyle bölüm 4.8'e göre ek burulma momenti

( $\Delta m_{i\theta}$ ) Denklem (5)'e göre hesap edilmektedir. Burada  $m_i$  i'inci kata ait odaklanmış kütlelerdir.

$$\Delta m_{i\theta} = m_i e^2 \quad (5)$$

Burulma momenti düzensizliği genel olarak iki yöntemle dikkate alınmaktadır. İlk olarak eşdeğer deprem yükü yöntemiyle hesap edilen her bir kat için ek burulma momentleri hesap edilerek her bir katın kütle merkezine ilave edilir. İkinci yöntem ise kütle merkezinin konumunu her bir kat için belli bir miktar yer değiştirilerek dikkate alınmaktadır. Kütle merkezinin konumunun değiştirilmesi hem statik hem de dinamik analizde dış merkezlik etkisini hesaba katmak için mühendisler tarafından yaygın olarak kabul etmekle birlikte bu yöntem esasen binanın dinamik özelliklerini değiştirmektedir. Bu sebeple kütle merkezini (KM) kaydırmak yerine, ek dış merkezliği (yani fiktif eksantrikliği) daha yakınsak olarak tahmin edebilmek için binanın dinamik karakterini değiştirmeden burulma etkisine maruz kalmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple bu çalışmada, tasarım eksantrikliğinin varsayımına dayalı bir çözüm yöntemiyle hesaba katmak yerine analitik olarak bu etkiyi hesap etmek için alternatif bir tasarım eksantriklik formülü önerilmiştir.

### 3. YAPI DİNAMİĞİ VE MATEMATİKSEL MODELLEME (STRUCTURAL DYNAMICS AND MATHEMATICAL MODELLING)

#### 3.1. Hareket Denkleminin Elde Edilmesi (Obtaining Equation of Motion)

Yatay yönde tek yönlü veya çift yönlü deprem yüküne maruz kalan iki yönlü burulma düzensizliğine sahip tek katlı binanın hareket denklemleri Denklem (6)'da verilmiştir. Bu bina analizlerinde iki yönde yanal yer değiştirme ( $\delta_x(t)$  ve  $\delta_y(t)$ ) ve dönme ( $\theta(t)$ ) dâhil olmak üzere üç serbestlik derecesine sahiptir. Denklem (6)'da M kütle, C sönüm, K rijitlik matrisini temsil etmektedir. Bunların yanında  $\delta(t)$  yatay yer değiştirme vektörünü bu vektörün zamana göre birinci derece türevi hız vektörünü ikinci derece türevi ise binanın ivme vektörünü, W ise deprem yükü input vektörünü ve  $\ddot{x}_g(t)$  ise depremin zamana bağlı ivmesini sembolize etmektedir.

$$M \ddot{\delta}(t) + C \dot{\delta}(t) + K \delta(t) = -W \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & J_0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & -e_{ny} \cdot k_x \\ 0 & k_y & e_{nx} \cdot k_y \\ -e_{ny} \cdot k_x & e_{nx} \cdot k_y & k_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$W = \begin{bmatrix} m_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \delta(t) = \begin{bmatrix} \delta_x(t) \\ \delta_y(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$r_x = \frac{L_x}{\sqrt{12}}, r_y = \frac{L_y}{\sqrt{12}}, r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad (9)$$

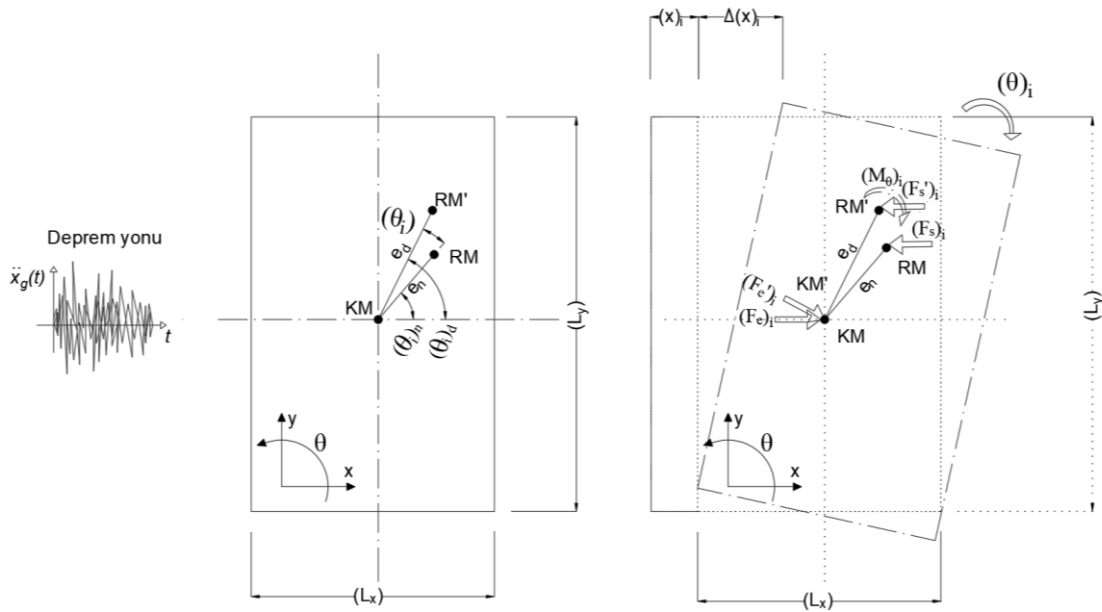
$$J_0 = m \cdot r^2 \quad (10)$$

$$k_{\theta} = k_x \cdot \frac{L_y^2}{4} + k_y \cdot \frac{L_x^2}{4} + k_x e_{ny}^2 + k_y e_{nx}^2 \quad (11)$$

Denklem (6-11) boyunca kullanılan diğer notasyonlar ise  $r_x$  ve  $r_y$  x- ve y-yönündeki dönme yarıçapını temsil ederken,  $r$  binanın toplam dönme yarıçapıdır.  $m_x$  ve  $m_y$  x- ve y-yönündeki binanın kütlelerini temsil ederken,  $J_0$  binanın kutupsal kütle atalet momentini,  $k_x$  ve  $k_y$  x- ve y-yönündeki binanın rijitliğini temsil ederken,  $k_{\theta}$  binanın burulma rijitliğini temsil etmektedir. Bunlara ilaveten  $e_{nx}$  ve  $e_{ny}$  x- ve y-yönündeki binanın geometrik eksantrikliğini,  $e_n$  ise binanın mutlak geometrik eksantrikliğini göstermektedir. Sönümlenme oranı ise TBDY 2018'de de belirtildiği gibi %5 olarak alınmıştır.

### 3.2. Eksantriklik Hesabı (Eccentricity Calculation)

Bilindiği üzere deprem yükü yapıya kütle merkezden (KM) etki etmekteyken yapı bu kuvvete rijitlik merkezinde (RM) karşılık vermektedir. Bu iki merkez arasındaki çakışma eksikliği yapıda burulma düzensizliğine yani eksantrikliğe yol açmaktadır. Şekil (3)'te x-yönündeki uzunluğu  $L_x$ , y-yönündeki uzunluğu  $L_y$  olan iki yönlü burulma düzensizliğine sahip olan binaya kat planları verilmiştir. Deprem yükü yapıya uygulanmadan önce Şekil (3-a)'da görüldüğü gibi statik olarak dengedir. Daha sonra yapı, x-yönünde uygulanan deprem yükünden sonra x-yönünde ötelenme ( $x(t)$ ) ve dönme ( $\theta(t)$ ) tepkisiyle depreme yanıt vermiştir. Bu durum Şekil (3-b)'de şematize edilerek verilmiştir.



Şekil 3. Tasarım ve geometrik eksantriklik gösterimi; a. Deprem yükü yapıya x-yönünden etki etmeden önceki durum b. (•) ise deprem yük etki ettiği andaki durum. (Design and geometric representation of eccentricity; a. the situation before the earthquake load excites the structure in the x-direction b. (•) is the situation when the earthquake load affects.)

İncelenen yapının bu iki durum içinde dengede olduğu ve elastik limit içerisinde depreme cevap verdiği kabul edilmektedir. Buradaki tasarım eksantrikliğini bulmak için dinamiğin temel kanunu olan Newton ikinci yasası kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasında yazılacak olursa:

$$\sum F_i = 0 \quad (12)$$

$$F_e = F_s = k_x \cdot x(t) \quad (13)$$

Eğer yapıda burulma düzensizliği olmadığı durum için yapıya kütle merkezinden etkileyen eşdeğer deprem yükü ( $F_e$ ) toplam o kattaki gerilme kuvvetine ( $F_s$ )'ye eşittir. Burada deprem yükü iki yönlü eksantrik olan binaya etki ettiği durumda ise gerilme kuvveti ( $F_s'$ ) ile burulma momenti ise ( $M_{\theta}$ ) ile gösterilmiştir. Bunlar aşağıda Denklem (14)-(15) ile gösterildiği gibi formüle edilmiştir.

$$F_s' = k_x \cdot (x(t) + \Delta x(t)) \quad (14)$$

$$M_{\theta} = k_{\theta} \cdot \theta(t) = \left[ \left( k_x \cdot \frac{L_y^2}{4} + k_y \cdot \frac{L_x^2}{4} + k_x e_{ny}^2 + k_y e_{nx}^2 \right) \right] \cdot \theta(t) \quad (15)$$

Burulmadan kaynaklanan y-yönünde oluşan gerilme kuvveti ile burulmadan kaynaklanan eşdeğer deprem yükünün y-yönünde oluşacak kuvvetleri birbirine eşittir ve birbirini sönümlendiği kabul edildiği için binanın y-yönündeki hareketi dikkate alınmamıştır. Deprem kuvveti yapıya uygulandıktan sonra yapıdaki denge durumuna aşağıdaki diğer bir denge denklemi kullanılarak tasarım burulma düzensizliği elde edilmiştir.

$$\sum M_i = 0 \quad (16)$$

$$F_s' \cdot e_{dy} - M_{\theta} = 0 \quad (17)$$

$$k_x \cdot (x(t) + L_y \theta(t)) \cdot e_{dy} - k_{\theta} \cdot \theta(t) = 0 \quad (18)$$

Daha sonra, tasarım eksantrikliği y-yönü için ( $e_{dy}$ ), Denklem (19) da görüldüğü gibi elde edilmiştir.

$$e_{dy} = \frac{k_{\theta}}{k_x} \cdot \frac{\theta(t)}{(x(t) + L_y \theta(t))} \quad (19)$$

TBDY-2018'e göre, burulma düzensizliği katsayısı ( $D_{bi}$ )  $1.2 < \eta_{bi} \leq 2$  olmak koşuluyla Denklem (3)'te verilen katsayı ile  $\pm 5\%$  deprem doğrultusuna dik bina boyutu ile büyütülmektedir. En büyük görece kat ötelenmesi ( $\delta_{max}$ ) minimum kat ötelenmesi ise ( $\delta_{min}$ ) ve o katta aynı doğrultudaki ortalama görece ötelenmesi de ( $\delta_{avg}$ ) ile gösterilmiştir.

$$\delta_{max} = x(t)_{max} + L_y \theta(t)_{max} \quad (20)$$

$$\delta_{avg} = x(t)_{max} + \frac{L_y}{2} \theta(t)_{max} \quad (21)$$

$$\delta_{min} = (x)_i = x(t)_{max} \quad (22)$$

$$\delta_{avg} = \frac{(\delta_{max} + \delta_{min})}{2} \quad (23)$$

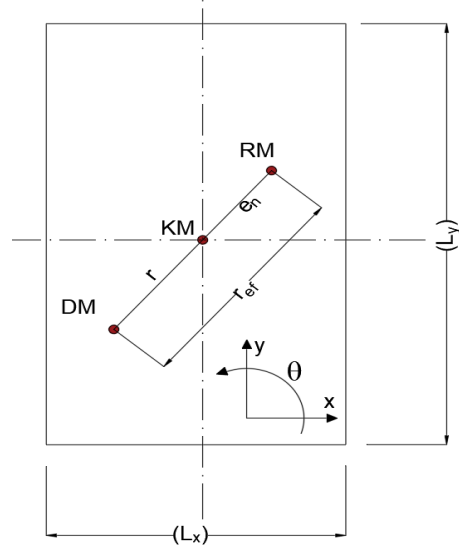
$$D_{bi} = \left( \frac{\delta_{max}}{1.2 \delta_{avg}} \right)^2 \quad (24)$$

Burada,  $x(t)_{max}$  and  $\theta(t)_{max}$  zaman serisi davranış analiz yöntemi (THA)'da sırasıyla x-yönündeki maksimum yatay yer değiştirme ve maksimum dönmedir. Yatay yer değiştirmeyi dönme cinsinden ifade edecek olursak Denklem (25)'i elde ederiz.

$$x(t)_{max} = \left( \frac{1 - 0.6 \sqrt{D_{bi}}}{1.2 \sqrt{D_{bi}} - 1} \right) L_y \theta(t)_{max} \quad (25)$$

### 3.2.1. Efektif (etkili) dönme yarıçapı (Effective radius of gyration)

Dönme yarı çapı ( $r$ ) Denklem (9)'da görüldüğü gibi hesap edilip dinamik hesaplamalarda kullanılmaktadır. Dönme yarı-çapı basitçe dönme merkezi ( $DM$ ) ile kütle merkezi ( $KM$ ) arasında mutlak uzunluk olarak kabul edilmektedir. Ancak bu durum eksantrik binalar için yeterli olmayabilir. Çünkü eksantrik binalar tepkileri rijitlik merkezi ( $RM$ )'den vermektedir. Bu sebeple en kritik durum için dönme yarı-çapı ile geometrik eksantrikliğin aynı doğrultuda olması durumudur Şekil (4)'de görüldüğü gibi. Bu sebeple güvenli tarafta kalabilmek için tasarım eksantrikliğini hesaplanmasında sadece dönme yarı çapı yerine efektif dönme yarı çapı ( $r_{ef}$ ) dikkate alınmıştır.



Şekil 4. Efektif dönme yarıçapı ( $r_{ef}$ ) kat planında gösterimi (Effective radius of gyration ( $r_{ef}$ ) in a floor level)

Rijitlik oranı ( $k_{\theta}/k_x$ ) efektif dönme yarıçapı ( $r_{ef}$ )'i kullanarak aşağıdaki düzenlemeler yapılarak Denklem (25)'deki gibi yazılabilir. Burada  $\Omega_x$  ve  $\Omega_y$  binanın burulma frekansı ( $w_{\theta}$ )'nın sırasıyla yanal frekansları ( $w_x$ ) ve ( $w_y$ )'e oranıdır.

$$\Omega_x = \frac{w_{\theta}}{w_x}, \Omega_y = \frac{w_{\theta}}{w_y} \quad (26)$$

$$r_{ef} = \sqrt{r^2 + e_n^2} \quad (27)$$

$$w_{\theta} = \sqrt{\frac{k_{\theta}}{r_{ef}^2 \cdot M}}, w_x = \sqrt{\frac{k_x}{M}} \quad (28)$$

$$\frac{k_{\theta}}{k_x} = (\Omega_x \cdot r_{ef})^2 \quad (29)$$

y-yönündeki tasarım eksantrikliğini bulmak için Denklem (19)'da elde edilen Denklem (25) ve Denklem (29) yerine konulursa, y-yönündeki tasarım eksantrikliği Denklem (31)'de bağlantıyla tahmin edilebilir.

$$e_{dy} = \frac{k_{\theta}}{k_x} \cdot \frac{\theta(t)}{(x(t) + L_y \theta(t))} = (\Omega_x \cdot r_{ef})^2 \frac{\theta(t)}{\left[ \frac{1 - 0.6 \sqrt{D_{bi}}}{1.2 \sqrt{D_{bi}} - 1} + 1 \right] L_y \theta(t)} \quad (30)$$

$$e_{dy} = \frac{(\Omega_x \cdot r_{ef})^2}{L_y} \left( \frac{1.2 \sqrt{D_{bi}} - 1}{0.6 \sqrt{D_{bi}}} \right) \quad (31)$$

Denklem (31)'te verilen parantez içindeki terimi  $\gamma = \left( \frac{1.2 \sqrt{D_{bi}} - 1}{0.6 \sqrt{D_{bi}}} \right)$  lamda ile sembolize edersek yeni basitleştirilmiş bağlantı Denklem (32)'de olduğu gibi verilebilir. Burada bulunacak tasarım eksantrikliği y-yönündeki geometrik eksantrik ile y-yönündeki fiktif eksantriklik olarak tanımlanmıştır. Yani Denklem (32) bulunan tasarım eksantrikliği aynı zamanda  $e_{dy} = e_{ny} + e_{acy}$  'ye eşittir. Tek yönlü deprem yüklemesi için

x-yönündeki eksantriklik geometrik eksantrikliğe eşit varsayılmıştır Denklem (34)'te görüldüğü gibi.

$$e_{dy} = \frac{(\Omega_x \cdot r_{ef})^2}{L_y} \gamma \quad (32)$$

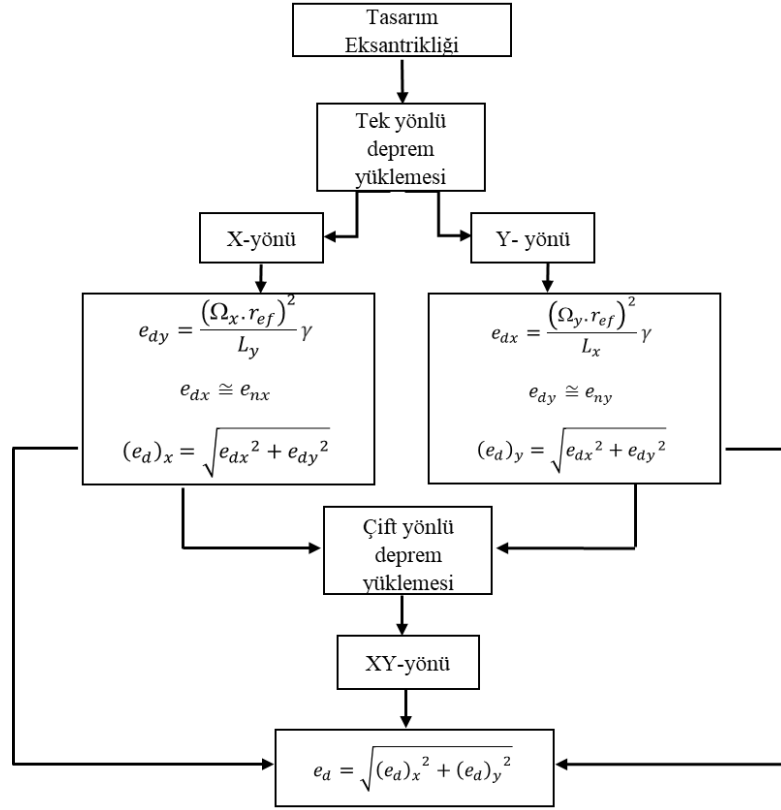
$$e_{dx} \cong e_{nx} \quad (33)$$

Deprem yükünün sadece y-yönünden etkilediği durumda ise tasarım eksantrikliği x- ve y-yönü için aşağıdaki Denklem (34) ve Denklem (35)'deki gibi ifade edilmiştir.

$$e_{dx} = \frac{(\Omega_y \cdot r_{ef})^2}{L_x} \gamma \quad (34)$$

$$e_{dy} \cong e_{ny} \quad (35)$$

Tek yönlü ve çift yönlü deprem yüklemeleri altında tasarım eksantrikliğinin bulunması için aşağıdaki akış seması Şekil (5)'te verilmiştir.



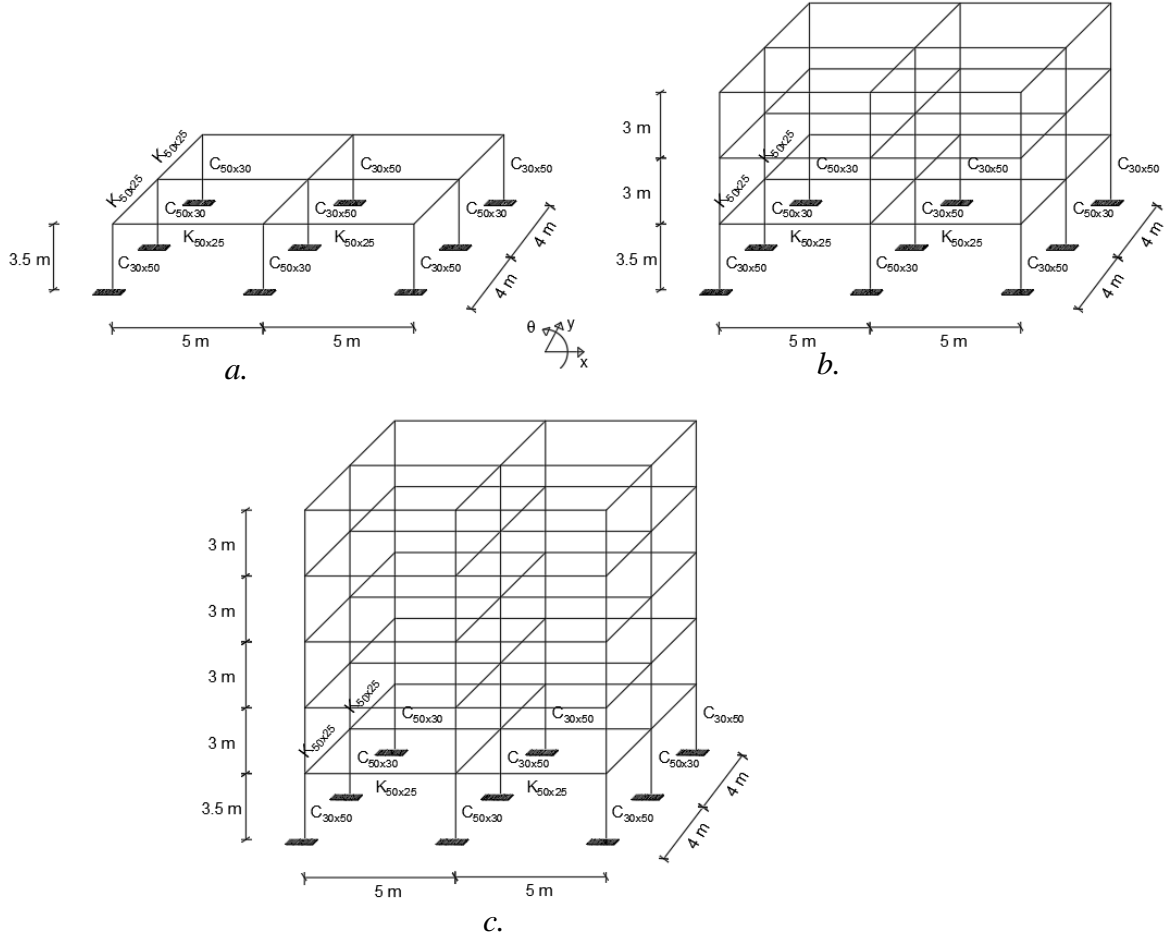
Şekil 5. Farklı deprem yükleri altında tasarım eksantrikliğini gösteren tasarım şeması (Flow chart of design eccentricity under various loading cases)

#### 4. MODEL BİNALARIN TANITILMASI (OVERVIEW OF MODEL BUILDINGS)

Bu çalışma kapsamında yapılacak olan eşdeğer deprem yükü yöntemi ve spektrum analizlerinde kullanacak aynı kalıp planına sahip konut türünde tek katlı, üç katlı ve beş katlı yapılar aşağıda Şekil (6-a, 6-b, 6-c) sırasıyla görüldüğü gibi SAP 2000'de modellenmiştir [29]. Bu

model binalar için x-yönündeki açıklıklar 5 m iken y-yönündeki açıklıklar 4 m olarak belirlenmiştir. Ayrıca birinci kat yüksekliği 3,5 m iken eğer bina birden fazla kata sahipse diğer katların yüksekliği 3 m olarak belirlenmiştir.





**Şekil 6.** Model binaların üç boyutlu görünümü; **a.** Tek katlı, **b.** Üç katlı ve **c.** Beş katlı (Three-dimensional model buildings; **a.** one-story, **b.** three-story and **c.** five-story)

Model binaların beton sınıfı C-20, donatı sınıfı S-420 ve sargı donatısı  $\Phi 10/150$  mm olarak dikkate alınmıştır. Plandaki kolanların boyutu (500x300 ya da 300x500 mm) olarak belirlenmiş ve kolon oryantasyonları farklı kullanılarak binada çift yönlü geometrik eksantriklik oluşturulmuştur. Bu yapılarıdaki bütün kirişler aynı kesite (250x500 mm) sahiptirler ve döşeme kalınlıkları 150 mm olarak belirlenmiştir. Kolon ve kiriş elemanlarda donatı oranı ( $\rho$ ) %1-1,5 arasında seçilmiştir. Çözümlemelerde kolon elemanlarda  $PM_2M_3$ , kiriş elemanlarda  $M_3$  tasarım durumu dikkate alınmıştır. Bunun yanında TBDY-2018'e göre çatlamış kesit reşitlikleri kolonlar için 0,7; kirişler için 0,35 ve döşemeler için 0,25 ile çarpılarak azaltılmıştır.

#### 4.1. Rijitlik Merkezinin Bulunması (Determination of Stiffness Center)

Yönetmelikte de belirtildiği gibi burulma düzensizliği hesabı yapılırken her bir kat için rijit diyafram ataması yapılmıştır. Bunun yanında kütle merkezi taşıyıcı elemanların ağırlıkları ihmal edilerek geometrik merkez olarak belirlenmiştir. Döşemelere atanmış ölü yük katsayısı  $G=4,5$  kN/m<sup>2</sup> ve hareketli yük katsayısı ise  $Q=2$  kN/m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Ayrıca hareketli yük kütle

katılım katsayısı da 0,3 olarak alınmıştır. SAP 2000 bilgisayar programı kullanılarak aşağıdaki denklemler yardımıyla x- ve y-yönündeki geometrik eksantriklik her bir  $i$ 'inci kat için elde edilmiştir [30].

$$\begin{aligned} (e_{nx})_i &= \frac{(R_z)_i((F_x)_i = 1)}{(R_z)_i((M)_i = 1)}; \\ (e_{ny})_i &= \frac{(R_z)_i((F_y)_i = 1)}{(R_z)_i((M)_i = 1)} \end{aligned} \quad (36)$$

Burada  $(R_z)_i((F_x)_i = 1)$  ve  $(R_z)_i((F_y)_i = 1)$  sırasıyla x- ve y-yönünde kütle merkezine (CM) etkiyen birim yüklemeye dolaylı düzlemde oluşan dönmeyi temsil etmektedir.  $(R_z)_i((M)_i = 1)$  ise CM'ye birim dönme momentinden kaynaklanan düzlemde oluşan dönmeyi ifade eder.  $(e_{nx})_i$  ve  $(e_{ny})_i$  de  $i$ 'inci katın sırasıyla x- ve y-yönündeki hesaplanan geometrik eksantrikliği göstermektedir. Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucu model binalara ait elde edilen geometrik özellikler Çizelge (1)'de verilmiştir.

Çizelge 1. Model binalara ait hesaplanan geometrik değerler (Geometric properties of model buildings)

Model bina	Kat no	Geometrik eksantriklik			Modal frekans (Hz)			Frekans oranı		Etkin dönme yarıçapı			
		$e_{nx}$ (cm)	$e_{ny}$ (cm)	$e_n$ (cm)	x-yönü	y-yönü	Ø-yönü	$\Omega_x$	$\Omega_y$	$r_x$	$r_y$	$r$	$r_{ef}$
1- Katlı	1. kat	13.70	31.80	34.63	3.21	3.42	4.29	1.34	1.25				4.04
	1. kat	6.06	36.90	37.39									4.07
3- Katlı	2. kat	11.14	24.55	26.96	1.21	1.31	1.66	1.36	1.27				3.97
	3. kat	14.54	17.83	23.01									3.93
	1. kat	6.03	37.00	37.49						2.9	2.3	3.7	4.07
5- Katlı	2. kat	11.06	24.70	27.06									3.97
	3. kat	12.60	19.30	23.05	0.73	0.79	1.01	1.38	1.28				3.93
	4. kat	13.50	16.47	21.30									3.91
	5. kat	15.06	13.89	20.49									3.90
	1. kat	6.03	37.00	37.49									3.97

#### 4.2. Spektrum Analizi (Response Spectrum Analysis)

Model binaların TBDY-2018'e göre eşdeğer deprem yükü yöntemi (statik-lineer) ve spektrum (dinamik-lineer) analizleri yapılmıştır. Spektrum analiz bir dinamik analiz olup zaman serisi davranış analiz yöntemi (THA)'nın maksimum değerini referans olarak mühendislere hızlı bir işlem yeteneği sunmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada THA yerine spektrum analizi (SA) seçilmiştir. Bu analizde kullanılacak parametreler; harita spektral ivme katsayıları  $S_s=0,75g$  ve  $S_I=0,33g$  olarak belirlenmiştir. Zemin sınıfı B olarak seçilmiştir. Geçiş periyodu  $T_L=6$  sn., taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $R=8$ , bina önem katsayısı  $I=1$  ve dayanım fazlalığı katsayısı  $D=3$  olarak belirlenmiştir. İhtiyaç duyulması halinde diğer parametreler bu bilgiler ışığında TBDY-2018'dan türetilmiştir.

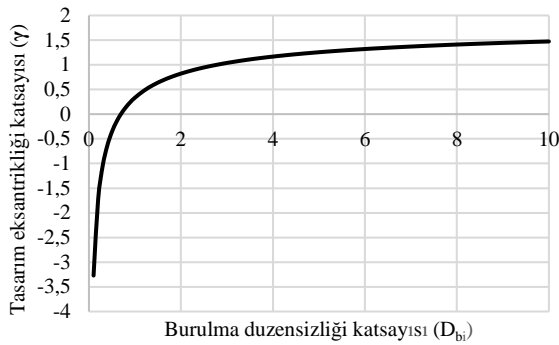
Bina her iki yatay yönü için periyodu aşağıdaki Denklem (37) ile tahmin edilmiştir. Burada  $H_n$  binanın toplam yüksekliği,  $T_a$  ise binanın tahmini periyodu simgelemektedir. Belirlenen bu yaklaşık periyoda göre model binaların spektrum analizleri yapılmıştır [31].

$$T_a = 0,0488(H_n)^{0,75} \quad (37)$$

#### 5. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Çalışma kapsamında seçilen model binaların ilk olarak Eşdeğer Statik Analiz (ESA) yöntemiyle hem x- yönü hem de y-yönü için çözümlenmeler SAP 2000 yardımıyla yapılmıştır. Burada elde edilen taban kesme kuvvetleri spektrum analizlerinde elde edilen taban kesme kuvvetlerine referans olarak alınmıştır. Böylelikle taban kesme kuvvetleri statik ve dinamik yüklemeler için

eşitlenmiş olmaktadır. Bu nedenle spektrum yöntemiyle elde edilen düzlemdeki dönme dizayn eksantriklikten kaynaklanan dönme olarak referans olarak kabul edilmiştir. Önerilen (Ön-ESA) ve eşdeğer deprem yüküne (Es-ESA) TBDY-2018 bölüm 4.7'e göre elde edilen dış merkezlik etkilerini statik yüklemeye kütle merkezine ekstra bir doneme momenti etki ettirilerek bunların performanslarını spektrum analizden (RSA) elde edilen dönemeye kıyasları yapılmıştır Çizelge (2) ve Çizelge (3)' te görüldüğü gibi. Eğer dış merkezlik TBDY-2018 bölüm 4.8'e göre kütle merkezini  $\pm\%5$  kaydırarak yapılan yüklemeye durumuna da M-ESA diye adlandırılmıştır.



**Şekil 7.** Tasarım eksantrikliği katsayısının ( $\gamma$ ) burulma düzensizliği katsayısına ( $D_{bi}$ ) karşı değişimi (Design eccentricity coefficient ( $\gamma$ ) vs. torsional irregularity coefficient ( $D_{bi}$ ))

Yukarıdaki Şekil (7)'de görüldüğü gibi burulma düzensizliğinin tasarım eksantrik katsayısına göre değişimi şekilde gösterilmiştir. Burulma düzensizliğin var olması için bir kattaki maksimum görel kat ötelenmesinin ortalama kat ötelenmesinin en az 1,2 katı

**Çizelge 2.** Tek katlı ve üç-katlı yapılara ait yapısal tepkilerin önerilen ve mevcut burulma eksantrikliklerinin karşılaştırılması (Proposed method and current methods comparison for obtaining design eccentricity for the one and three-story buildings)

Model bina	Kat no	Tasarım Yon.	Tab. Kes. Kuv. (kN)		Yanal ve Burulma Ötelenmeleri			Fark (%)
			$T_x$	$T_x$	$U_x$ (m)	$U_y$ (m)	$R_z$ (rad.)	
1- Katlı	1.Kat	Es-ESA	-214.94	-214.94	3.53E-03	3.13E-03	-1.63E-04	5.8
		M-ESA	-214.94	-214.94	3.52E-03	3.09E-03	-4.30E-05	-72.1
		On-ESA	-214.94	-214.94	3.53E-03	3.13E-03	-1.53E-04	-0.6
		RSA	-214.34	-214.16	3.53E-03	3.11E-03	-1.54E-04	Ref.
3-Katlı	1.Kat	Es-ESA	-560.01	-560.01	1.10E-02	9.64E-03	-4.66E-04	27.0
		M-ESA	-560.01	-560.01	1.09E-02	9.53E-03	-1.03E-04	-71.9
		On-ESA	-560.01	-560.01	1.10E-02	9.60E-03	-3.28E-04	-10.6
		RSA	-559.87	-560.83	1.08E-02	9.51E-03	-3.67E-04	Ref.
	2.Kat	Es-ESA			2.24E-02	1.93E-02	-8.93E-04	28.5
		M-ESA	X	X	2.23E-02	1.91E-02	-1.76E-04	-74.7
		On-ESA	X	X	2.23E-02	1.92E-02	-6.13E-04	-11.8
		RSA			2.19E-02	1.89E-02	-6.95E-04	Ref.
	3.Kat	Es-ESA			3.00E-02	2.57E-02	-1.16E-03	29.9
		M-ESA	X	X	2.99E-02	2.55E-02	-2.15E-04	-76.0
		On-ESA	X	X	2.99E-02	2.56E-02	-7.85E-04	-12.4
		RSA			2.91E-02	2.50E-02	-8.96E-04	Ref.

kadar büyüklükte olması gerekmektedir. Bu sebeple ( $\gamma$ ) lamdanın eksi değerleri için seçilen kattaki maksimum görel kat ötelenmesi ortalama kat ötelenmesinden küçük olması gerekmektedir. Bu durum fiziksel olarak mümkün olmadığı gibi burulma düzensizliği tanımına da uymamaktadır. Bunun için önerilen yeni tasarım

eksantrikliği hesap ederken  $D_{bi} > 0.7$  olması gerekmektedir. Ayrıca yönetmenlikte  $\eta_{bi} < 1,2$  küçük olması durumu için  $D_{bi} = 1$  alınırken önerilen durumda burulma düzensizliği oranına bakılmaksızın mutlak  $D_{bi}$  değeri alınmalıdır. Bu değerde Şekil (7)'de de görüldüğü gibi  $D_{bi} > 0.7$  durum için  $1,5 \geq \gamma > 0$  arasında değerler aldığı gözlenmiştir.

Çizelge (2) ve Çizelge (3)'de de görüldüğü gibi tek-katlı, üç-katlı ve beş-katlı binalara ait taban kesme kuvvetleri, her bir kat için dönme ve yanal ötelenmeler verilmiş olup dış merkezlik etkisi farklı metotlar kullanılarak elde edilmiş ve bu sonuçlar da çizelgeler halinde verilmiştir. Tek katlı bina için dış merkezlik etkisi M-ESA yöntemiyle dikkate alınırsa tasarım eksantrikliği RSA'ya göre yaklaşık olarak %72 oranında azımsanmaktadır. Es-ESA metodu ise yaklaşık olarak %6 oranında fazla değer vermektedir. Önerilen yöntemde ise (On-ESA) yaklaşık olarak istenilen RSA değeri ile birbirine çok yakınsaktır. Üç katlı bina için M-ESA metodu yine yaklaşık %72 ile %76 arasında tasarım eksantrikliğini küçümsemektedir. Es-ESA yönteminde ise dış merkezlik etkisi %27 ile %30 arasında fazla olmasına rağmen M-ESA yöntemine göre güvenli bölgede kalmaktadır. Önerilen metot (On-ESA) ise dönme etkisini tahmin etmede en iyi performansa sahip olmakla birlikte tasarım eksantrikliğini tahmin etmede yaklaşık olarak %10 ile %12 arasında RSA yöntemine kıyasla azımsanmaktadır.

Beş katlı bina için yine M-ESA metodu dönme etkisini RSA metoduna kıyasla yine yaklaşık %70 ile %75 olması gereken değerden daha düşüktür. Es-ESA yönteminde ise beş-katlı bina için yine fazla tahmin söz konusu iken bu kez bir ve üç-katlı binalara kıyasla artış miktarı önemli miktarda artmaktadır. Es-ESA yöntemindeki fazla tahmin %41 ile %51 arasındadır. Bu yöntem yine güvenli bölgede kalsa bile bu fazla tahmin yüzünden hem gerçeklikten uzaklaşmakta hem de ekonomik olarak bir dezavantaja sebep olmaktadır. Önerilen metod (On-ESA) ise dönme etkisini tahmin etmede yine en iyi performansa sahip olmakla birlikte yaklaşık olarak yine %12 ile %13 arasındadır. Bu değerler bir, üç ve beş-katlı binalar için

yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Bu sebeple bu çalışmada önerilen metod farklı katlı binaların dış merkezlik etkisini hesaba katmada daha iyi performansa sahip olmakla birlikte yönetmelikte belirtilen iki yöntemle yani (M-

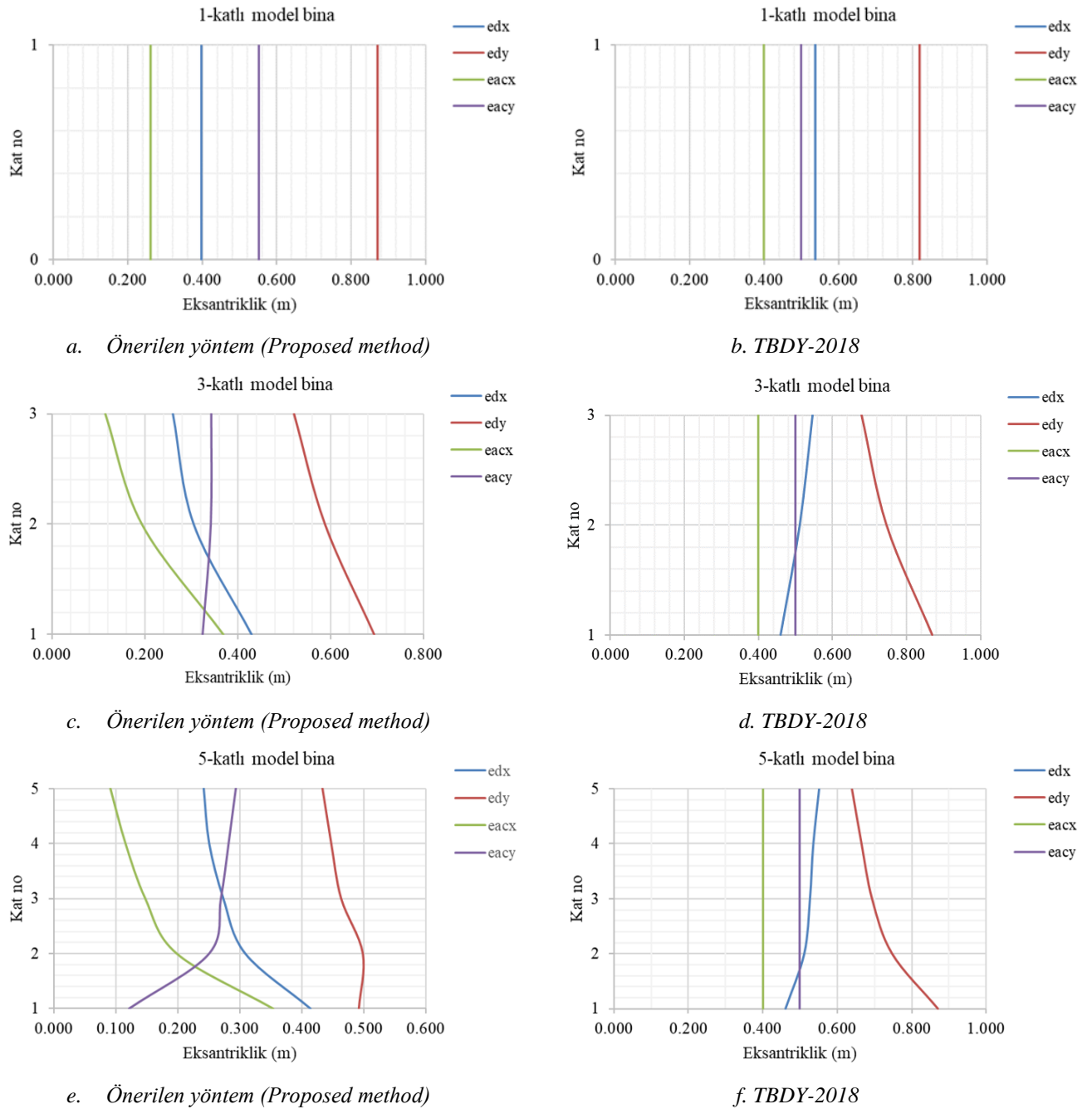
ESA ve Es-ESA) yöntemleriyle kıyasları yapılmıştır. Bu çalışmada görüldüğü gibi M-ESA yöntemi dış merkezlik etkisini önemli derece azımsamakta Es-ESA ise özellikle yüksek katlı binalar için dış merkezlik etkisini önemli derecede abartmaktadır. Bu sebeple önerilen metodun (On-ESA) %20 artırılarak tasarım eksantrikliğinin dikkate alınması daha güvenli bir yöntem olacağı görülmüştür.

**Çizelge 3.** Beş-katlı yapıya ait yapısal tepkilerin önerilen ve mevcut burulma eksantrikliklerinin karşılaştırılması (Proposed method and current methods comparison for obtaining design eccentricity for the five-story building)

Model bina	Kat no	Tasarım Yon.	Tab. Kes. Kuv. (kN)		Yanal ve Burulma Ötelenmeleri			Fark (%)
			T <sub>x</sub>	T <sub>y</sub>	U <sub>x</sub> (m)	U <sub>y</sub> (m)	R <sub>z</sub> (rad.)	
5-Katlı	1.Kat	Es-ESA	-657.62	-657.62	1.36E-02	1.19E-02	-5.62E-04	41.2
		M-ESA	-657.62	-657.62	1.35E-02	1.17E-02	-1.21E-04	-69.6
		On-ESA	-657.62	-657.62	1.35E-02	1.18E-02	-3.46E-04	-13.1
		RSA	-657.61	-658.39	1.32E-02	1.16E-02	-3.98E-04	Ref.
	2.Kat	Es-ESA			5.46E-02	4.65E-02	-2.01E-03	48.7
		M-ESA	X	X	5.43E-02	4.63E-02	-3.38E-04	-75.0
		On-ESA			5.45E-02	4.64E-02	-1.18E-03	-12.8
		RSA			5.09E-02	4.38E-02	-1.35E-03	0.0
	3.Kat	Es-ESA			6.13E-02	5.22E-02	-2.25E-03	50.7
		M-ESA	X	X	6.10E-02	5.19E-02	-3.68E-04	-75.3
		On-ESA			6.12E-02	5.21E-02	-1.31E-03	-12.1
		RSA			5.68E-02	4.87E-02	-1.49E-03	Ref.
	4.Kat	Es-ESA			2.95E-02	2.54E-02	-1.14E-03	43.7
		M-ESA	X	X	2.94E-02	2.52E-02	-2.16E-04	-72.8
		On-ESA			2.94E-02	2.53E-02	-6.85E-04	-13.7
		RSA			2.83E-02	2.45E-02	-7.94E-04	Ref.
	5.kat	Es-ESA			4.37E-02	3.74E-02	-1.63E-03	46.3
		M-ESA	X	X	4.35E-02	3.71E-02	-2.87E-04	-74.3
		On-ESA			4.36E-02	3.72E-02	-9.67E-04	-13.4
		RSA			4.13E-02	3.55E-02	-1.12E-03	Ref.

Aşağıda Şekil (8)'de de görüldüğü üzere edx deprem kuvvetinin x-yönünde etkimesi durumunda oluşan toplam tasarım eksantrikliği eacx ise bu doğrultudaki fiktif eksantrikliği temsil etmektedir. edy ve eacy ise y-yönündeki tasarım eksantrikliği ve bu yöndeki fiktif eksantrikliği temsil etmektedir. Önerilen yöntem (On-ESA) ile tek katlı bina için eksantriklik özellikleri Şekil (8-a)'da, üç katlı bina için Şekil (8-c)'de ve beş katlı bina için Şekil (8-e)'de verilmiştir. Aynı şekilde TDBY-2018 bölüm 4.7 (Es-ESA)'ya göre tasarım eksantrikliğinin hesap edilmesi durumunda, elde edilen eksantriklik özellikleri bir, üç ve beş katlı bina için sırasıyla Şekil (8-b), Şekil (8-d), ve Şekil (8-f)'de verilmiştir. Model

binalar için Es-ESA yöntemine göre x- ve y-yönü için fiktif eksantriklik 0,4 ve 0,5'dir, fakat On-ESA'ya göre her bina için farklı değerlere sahiptir. Çünkü yönetmelikte fiktif eksantriklik varsayımak bir çözüm yöntemiyle deprem yönüne dik olan yapının boyutunun %5 olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem sonucunda genel olarak tasarım eksantrikliğinin önemli derecede fazla alınması meydana gelmektedir özellikle katsayı artan yapılar için bu durum daha dikkat edilmesi gereken bir husustur. Her iki yöntem içinde maksimum dizayn eksantriklik tek katlı yapıda meydana gelmiştir. Bu bulgu daha önceki birçok araştırmacı tarafında da teyit edilmiştir [27], [32], [33].



**Şekil 8.** Bir, üç ve beş katlı binalar için tasarım eksantrikliğini önerilen ve TBDY-2018 göre hesabı (The design eccentricity calculations by the proposed method and TBDY-2018 for the one-, three- and five-story buildings)

Çizelge (4)'te önerilen metot ile eşdeğer deprem yönetmeliğine göre elde edilen ek dış merkezlik burulma momenti hesabı verilmiştir. Burada  $F_x$  ve  $F_y$  x- ve y-yönündeki kata etkileyen eşdeğer deprem kuvveti.  $M_x$  ve  $M_y$  sırasıyla x- ve y-yönündeki hesaplanan dönme momenti,  $M_t$  ise kata etkileyen toplam dönme momentidir. Tek katlı bina için önerilen metotta  $M_t$  175.15 kN.m bulunurken Es-ESA metoduyla aynı değer 193.68 kN.m bulunmuştur. RSA yöntemine kıyasla Çizelge (3) ve Çizelge (4)'de görüleceği üzere On-ESA kattaki dönme etkisini tahmin etmede diğer yöntemlere göre daha başarılı bulunmuştur özellikle tek-katlı binada dinamik

yükleme durumuna neredeyse eşittir. Üç ve beş-katlı binalara bakılınca TBDY-2018'e göre hesaplanan her bir etkileyen toplam dönme momenti On-ESA metoduna kıyasla yaklaşık olarak 2-3 kat artmıştır.

**Çizelge 4.** Model binalara ait ek dış merkezlik burulma momentlerinin önerilen ve TBDY-2018'e göre hesabı (Additional accidental torsional moments for the model buildings according to the proposed method and TBDY-2018)

Model bina	Kat no	Eşdeğer deprem yükü		Önerilen yöntem			TBDY-2018		
				Ek dış merkezlik burulma momenti			Ek dış merkezlik burulma momenti		
		F <sub>x</sub> (kN)	F <sub>y</sub> (kN)	M <sub>x</sub> (kNm)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>t</sub> (kNm)	M <sub>x</sub> (kNm)	M <sub>y</sub> (kNm)	M <sub>t</sub> (kNm)
1- Kath	1. kat	214.95	215.51	56.35	118.81	175.15	86.21	107.48	193.68
3- Kath	1. kat	107.54	108.29	39.98	34.88	74.86	43.32	53.77	97.09
	2. kat	183.56	188.01	36.45	62.84	99.28	75.20	91.78	166.98
	3. kat	269.18	265.19	30.56	92.41	122.97	106.08	134.59	240.67
5-Kath	1. kat	68.21	65.80	23.26	8.28	31.55	26.32	34.11	60.42
	2. kat	90.71	92.31	18.28	22.76	41.04	36.92	45.36	82.28
	3. kat	107.47	112.84	16.63	29.01	45.64	45.14	53.74	98.87
	4. kat	153.81	157.58	18.21	43.43	61.64	63.03	76.91	139.94
	5. kat	237.66	230.22	20.99	69.89	90.89	92.09	118.83	210.92

Her ne kadar bu yöntem (TBDY-2018'e göre hesap) dönme momentini tahmin ederken abartarak güvenli bölgede kalmış olsa da bu yapının taşıyıcı elemanlarında basınç dağılımının doğru bir şekilde yapılamamasında dolayısıyla gereksiz yere aşırı boyutlandırmaya mühendisleri sevk edeceği için TBDY-2018 belirtilen yöntemin (Es-ESA) tekrardan değerlendirilip gözden geçirilmesine ihtiyaç vardır. TBDY-2018 ek dış merkezliği dikkate alınırken kullanılması tavsiye edilen modal yöntem (M-ESA) yapının dönme etkisini hafife almakta ve yetersiz kalmaktadır. Böylelikle yönetmelikteki M-ESA yapının dönme etkisini hesap ederken yetersiz Es-ESA ise azımsanmayacak derecede abartmaktadır, özellikle de kat sayısı fazla olan binalar için. Bu sebeple her iki yönteme alternatif olarak On-ESA yöntemi %20 artırılarak tasarım eksantrikliğini

dikkate alınmasında daha güvenli bir yöntem olacağı görülmüştür.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Yapılarda tasarımdan kaynaklı geometrik bir eksantriklik olmasa bile, malzeme ve deprem yer hareketi kaynaklı belirsizliklerinden dolayı binalar önemli derecede yanal-burulma etkilerine maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle, birçok bina yönetmeliklerinde bu durum dış merkezliği dikkate almak için varsayıma dayalı bir çözüm sunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki, kütle merkezini kaydırarak dış merkezliği dikkate almaktadır; TBDY-2018 bölüm 4.8 (M-ESA)'deki modal metod gibi. İkinci yöntem ise eşdeğer burulma momentini yapıya ekstra

etki ettirmektedir; TBDY-2018 bölüm 4.7 (Es-ESA)'deki eşdeğer burulma momentini türetme metodu gibi. Es-ESA yönteminde dış merkezlik etkisi deprem yönüne dik olan bina boyutunun bir yüzdesi (%5 veya %10) ile burulma düzensizliği katsayısının çarpılmasıyla elde edilmektedir. Ancak bu durum her kat için eşdeğer burulma momentini hesap ederken var olandan çok daha az veya çok daha fazla alınmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, varsayıma dayalı çözüm yöntemi eksantriklik parametrelerini tasarıma dâhil etmek için yeterli olmayabilir. Bu çalışmada, burulma düzensizliğini yeniden dikkate almak için frekans oranı (her yön için burulma frekansı/öteleme frekansı) ve etkili dönme yarıçapı tanımını içeren alternatif tasarım eksantriklik formülü önerilmiştir. Bu önerilen metod (On-ESA)'nın performans analizi aynı kat planına sahip bir, üç ve beş katlı çift yön geometrik eksantrikliğe sahip binalara uygulanmıştır. Bu çözümlerden elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- TBDY-2018'de dış merkezlik etkisini hesaba katmak için önerilen metotlardan M-ESA metodu ile katlardaki burulma etkisi RSA'ya kıyasla olması gerekenden daha az bulunmuştur. Bu sebeple yönetmelikteki bu yöntem dış merkezlik etkisi tam olarak temsil etmekte analizlerde kullanılan model binalar için eksik kalmaktadır.
- Es-ESA metodu kullanıldığında ise burulma etkisi olması gerekenden çok daha fazla bulunmuştur, özellikle kat sayısı fazla olan binalar için bu durum dikkat edilmesi gereken bir husustur. Çünkü aradaki fark olması gerekenden 2 ve 3 kata kadar daha fazla çıkabilmektedir. Bu durum her ne kadar güvenli olsa da burulma etkisini tahminde performans açısından düşük seviyededir.
- Önerilen metodun kullanılması durumunda (On-ESA) dış merkezlik etkisi tek katlı bina için RSA ile hemen hemen aynı iken, üç ve beş katlı binalar için yaklaşık olarak %12-%15 arasında daha az bulunmuştur. Ancak kat sayısının artması durumunda dahi bu aralık hemen hemen sabit kaldığı görülmüştür. Bunun için tasarım eksantrikliğini %20 artırılarak bu yöntem revize edilip daha sağlam bir metod haline getirilirken, aynı zamanda performans açısından da yönetmelikte belirtilen yöntemlere kıyasla daha iyi performans göstermesi beklenmektedir.
- Ayrıca On-ESA metoduyla yapının düzensizlik tanımı sadece görel kat ötelenmelerine göre değil ( $\eta_{bi}$ ) aynı zamanda burulmaya karşı esnek ( $\Omega \leq 1$ ), normal ( $1 < \Omega \leq 2,5$ ) ve rijit ( $\Omega > 2,5$ ) olması gibi frekans oranına bakılarak yapının burulmaya karşı tepkisine vakif olunabilmektedir. Önerilen bu yöntemle artık tasarım eksantrikliğinin tanımında sadece ( $\eta_{bi}$ ) katsayısı değil aynı zamanda ( $\Omega$ ) katsayısı da

dikkate alınması gerekmektedir. Eğer bu oran ( $0,75 < \Omega \leq 1,25$ ) arasında ise burulma düzensizliği etkisi binalar için kritik duruma geldiği [7], [8] literatürde verilmişti. Yeni yöntem sayesinde binaların bu hassasiyeti tasarım eksantrik formülü kullanılarak pratik bir şekilde kolayca bulunabilmektedir.

- Bunlara ilaveten yapının tasarım eksantrikliği bulunurken yeni bir tasarım eksantrikliği katsayısı ( $\gamma$ )'da bu çalışmada tanımlanmıştır. Bu katsayı sadece görel kat ötelenmesine bağlı olmayıp aynı zamanda o kattaki dönme etkisine de bağlıdır. Ayrıca bu katsayının  $1,5 \geq \gamma > 0$  arasında değerler aldığı görülmüştür.

#### YAZARLARIN KATKISI (AUTHOR'S CONTRIBUTIONS)

**Osman AKYÜREK:** bu araştırmanın tüm aşamalarını gerçekleştirmiş ve yürütmüştür; araştırma fikrinin yeniliği, teorisi ve uygulaması, simülasyonu ve sonuçları, yazma aşaması.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal özel bir izin gerektirmediğini beyan eder.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICTS OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

$D_{bi}$	:	Ek dış merkezlik katsayısı
$F_e$	:	Yapının herhangi bir katına kütle merkezinden etkiyen eşdeğer deprem yükü
$F_{iE}^{(X)}$	:	$i$ 'inci kata ait x-yönündeki eşdeğer deprem yükü
$F_s$	:	Yapının herhangi bir katına rijitlik merkezinden etkiyen gerilme kuvveti
$F_s'$	:	Deprem etkidikten hemen sonra rijitlik merkezinden etkiyen gerilme kuvveti
$H_n, T_a$	:	Binanın toplam yüksekliği, tahmini periyodu
$J_0$	:	Binaya ait kutupsal kütle atalet momentini
$M_{ib}$	:	$i$ 'inci kattaki ek burulma momenti TBDY-2018 bölüm 4.7'ye göre
$M_\theta$	:	Kattaki burulma momenti

$e$	: Ek dış merkezlik (fiktif eksantriklik) Denklem (4) ve Denklem (5)'te	$(\Delta_i^{(X)})_{max}$	: x-yönündeki deprem etkisi altında $i$ 'inci kattaki en büyük görelî kat ötelemesi
$e_{acx}, e_{acy}$	: x- ve y-yönündeki fiktif eksantriklikleri	$(\Delta_i^{(X)})_{min}$	: x-yönündeki deprem etkisi altında $i$ 'inci kattaki en küçük görelî kat ötelemesi
$e_{dx}, e_{dy}, e_d$	: x- ve y-yönündeki ve mutlak tasarım eksantriklikleri	$(\Delta_i^{(X)})_{ort}$	: x-yönündeki deprem etkisi altında $i$ 'inci kattaki ortalama görelî kat ötelemesi
$e_{nx}, e_{ny}, e_n$	: x- ve y-yönündeki ve mutlak geometrik eksantriklikleri	$\ddot{x}_g(t)$	: Deprem zamana bağılı ivmesini
$k_x, k_y, k_\theta$	: x-, y- ve $\theta$ -yönündeki binanın rijitlikleri	$\Delta m_{i\theta}$	: $i$ 'inci kattaki ek burulma momenti TBDY-2018 bölüm 4.8'ye göre
$m_i$	: $i$ 'inci kata ait odaklanmış kütle	$\delta_{max}, \delta_{min}, \delta_{avg}$	: İlgili kata ait en büyük, en küçük ve ortalama görelî kat ötelenmeleri
$m_x, m_y$	: x- ve y-yönündeki binanın kütleleri	$\eta_{bi}$	: Burulma düzensizliği katsayısı
$r_{ef}$	: Eefektif dönme yarıçapı	$\gamma$	: Yeni tasarım eksantrikliği katsayısı
$r_x, r_y, r$	: x- ve y-yönündeki ve mutlak dönme yarıçapı		
$w_x, w_y, w_\theta$	: x-, y- ve $\theta$ -yönündeki binaya ait frekanslar		
$\delta_x(t)$	: x-yönündeki yatay yer değiştirme vektörünü		
$\delta_y(t)$	: y-yönündeki yatay yer değiştirme vektörünü		
<b>C</b>	: Sönümleme matrisi nxn		
<b>KM</b>	: Kütle Merkezi		
<b>RM</b>	: Rijitlik Merkezi		
<b>DM</b>	: Dönme merkezi		
<b>Es-ESA</b>	: TBDY-2018 bölüm 4.7'e göre elde edilen dış merkezlik etkileri		
<b>G, Q</b>	: Binanın her bir katına etkiyen ölü ve hareketli yük katsayısı		
<b>K</b>	: Rijitlik matrisi nxn		
$L_x, L_y$	: Binanın x- ve y-yönündeki toplam uzunluğu		
<b>M</b>	: Kütle matrisi nxn		
<b>M-ESA</b>	: TBDY-2018 bölüm 4.8'e göre elde edilen dış merkezlik etkileri		
<b>On-ESA</b>	: Önerilen yöntemle göre elde edilen dış merkezlik etkileri		
<b>R, I, D</b>	: Sırasıyla bina taşıyıcı sistem davranış, bina önem ve dayanım fazlalığı katsayısı		
<b>RSA, ESA</b>	: Spektrum Analizi, Eşdeğer Statik Analiz		
$S_s, S_I$	: Harita spektral ivme katsayıları		
<b>TBDY-2018</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018		
<b>THA</b>	: Zaman serisi davranış analiz yöntemi		
$T_L$	: Geçiş periyodu		
<b>W</b>	: Deprem yükü input vektörünü		
<b>YK-D</b>	: Yatay kuvvetten dolayı oluşan dönme etkisi		
$x(t), y(t), \theta(t)$	: x-, y- ve $\theta$ -yönündeki yer değiştirmeleri		
$\Omega_x, \Omega_y$	: Binanın burulma frekansı ( $w_\theta$ )'nın sırasıyla yanal frekansları ( $w_x$ ) ve ( $w_y$ )'e oranı		

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] O. Akyürek, "Lateral and Torsional Seismic Vibration Control for Torsionally Irregular Buildings," Florida Institute of Technology, (2019).
- [2] A. M. Chandler and G. L. Hutchinson, "Torsional coupling effects in the earthquake response of asymmetric buildings," *Eng. Struct.*, 8(4): 222–236, (1986).
- [3] FEMA 750, "NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-750), 2009 Edition," (2009).
- [4] D. S. Moon, "Integrated Seismic Assessment and Design Of Plan-Irregular Structures," University of Illinois at Urbana-Champaign, (2012).
- [5] A. R. and G. T. Francisco Crisafulli, "Consideration of Torsional Effects in the displacement control of ductile buildings," *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, (2004).
- [6] H. Hao and J. Ip, "Torsional Responses of Building Structures to Earthquake Loadings Defined in AS1170.4-2007," in *Australian Earthquake Engineering Society 2013 Conference, Tasmania*, (2013).
- [7] C. L. Kan and A. K. Chopra, "Elastic earthquake analysis of torsionally coupled multistorey buildings," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 5(4): 395–412, (1977).
- [8] W. K. Tso and K. M. Dempsey, "Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 8(3): 275–289, (1980).
- [9] R. Hejal and A. K. Chopra, "Earthquake Response of Torsionally Coupled, Frame Buildings," (1989).
- [10] R. K. Goel and A. K. Chopra, "Dual-Level Approach for Seismic Design of Asymmetric-Plan Buildings," *J. Struct. Eng.*, 120(1): 161–179, (1994).
- [11] M. De Stefano and B. Pintucchi, "A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002," *Bull. Earthq. Eng.*, 6(2): 285–308,



- (2008).
- [12] J. Hernández and O. López, "Influence of Bidirectional Seismic Motion On the Response of Asymmetric Buildings," (2000).
- [13] A. Ghersi and P. P. Rossi, "Influence of bi-directional ground motions on the inelastic response of one-storey in-plan irregular systems," *Eng. Struct.*, 23(6): 579–591, (2001).
- [14] E. Heredia-Zavoni and R. Machicao-Barrionuevo, "Response to orthogonal components of ground motion and assessment of percentage combination rules," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 33(2): 271–284, (2004).
- [15] P. Fajfar, D. Marušić, and I. Peruš, "Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings," *J. Earthq. Eng.*, 9(6): 831–854, (2005).
- [16] G. Magliulo and R. Ramasco, "Seismic response of three-dimensional r/c multi-storey frame building under uni- and bi-directional input ground motion," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 36(12): 1641–1657, (2007).
- [17] G. P. Cimellaro, T. Giovine, and D. Lopez-Garcia, "Bidirectional pushover analysis of irregular structures," *J. Struct. Eng.*, 140 (9), (2014).
- [18] S. H. Jeong and A. S. Elnashai, "Analytical assessment of an irregular RC frame for full-scale 3D pseudo-dynamic testing part I: Analytical model verification," *Journal of Earthquake Engineering*, 9(1): 95–128, (2005).
- [19] J. De-la-Colina, Q. Acuña, A. Hernández, and J. Valdés, "Laboratory tests of steel simple torsionally unbalanced models," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 36(7): 887–907, (2007).
- [20] F. Crisafulli, A. Reboredo, and G. Torrasi, "Consideration of torsional effects in the displacement control of ductile buildings," *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, (2004).
- [21] D. Basu, M. C. Constantinou, and A. S. Whittaker, "An equivalent accidental eccentricity to account for the effects of torsional ground motion on structures," *Eng. Struct.*, 69(1): 1–11, (2014).
- [22] G. Özmen, K. Girgin, and Y. Durgun, "Torsional irregularity in multi-story structures," *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, 6(4): 121–131, (2014).
- [23] D. Basu and S. Giri, "Accidental eccentricity in multistory buildings due to torsional ground motion," *Bull. Earthq. Eng.*, 13(12): 3779–3808, (2015).
- [24] Y. Cao, G. P. Mavroedidis, K. C. Meza-Fajardo, and A. S. Papageorgiou, "Accidental eccentricity in symmetric buildings due to wave passage effects arising from near-fault pulse-like ground motions," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 46(13): 2185–2207, (2017).
- [25] R. Tabatabaei, "Torsional Vibration of Eccentric Building Systems," *Recent Adv. Vib. Anal.*, (2011).
- [26] L. Huo and H. Li, "Torsionally coupled response control of structures using," in *The 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, (2017)
- [27] G. Özmen, K. Girgin, and Y. Durgun, "Torsional irregularity in multi-story structures," *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, 6(4): 121–131, (2014).
- [28] AFAD ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği," (2018).
- [29] Computers and Structures Inc., "SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design." Berkeley, California, USA, (2020).
- [30] J. Raoul, G. Sedlacek, G. Tsionis, J. Raoul, G. Sedlacek, and G. Tsionis, "Eurocode 8: Seismic Design of Buildings Worked examples." (2012).
- [31] American Society of Civil Engineers, "Minimum design loads for buildings and other structures," *ASCE 7-10*, no. 7 98. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, (Oct., 2000).
- [32] N. Özhendekci and Z. Polat, "Torsional irregularity of buildings," *the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, (2008).
- [33] H. Gokdemir, H. Ozbasaran, M. Dogan, E. Unluoglu, and U. Albayrak, "Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes," *Eng. Fail. Anal.*, 35(1): 713–717, (2013).