

## BİNALARIN DEPREM HESABINDA KULLANILAN DOĞRUSAL ELASTİK HESAP YÖNTEMLERİYLE İLGİLİ BİR İRDELEME

**Taner UÇAR<sup>1\*</sup>, Onur MERTER<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Buca, İzmir - TÜRKİYE

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği B., Buca, İzmir - TÜRKİYE

### ÖZET

Binaların deprem hesabı için Deprem Yönetmeliği-2007’de verilen yöntemlerin her birinde binaya etkiyen deprem yüklerinin farklı şekilde hesaplanması, analizde her üç yöntemin de kullanılabilmesi durumlarında hesap yönteminin seçimini gündeme getirmektedir. Yönetmelikte verilen elastik tasarım ivme spektrumları kullanılarak Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’nden ve Mod Birleştirme Yöntemi’nden elde edilecek çeşitli büyüklükler birbiriyle karşılaştırılabilir. Ancak yönetmelikte yer alan tasarım spektrumlarının oluşturulmasında esas alınan deprem kayıtları bilinemediğinden, Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde edilecek büyüklükler aynı depremlere ait olmaz. Bu çalışmada, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi’nde kullanılan spektrumlar Türkiye’de meydana gelmiş önemli depremlerin kayıtları esas alınarak Newmark-Hall’a ait yaklaşımla üretilmiş ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nde de aynı depremlere ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Beş, sekiz ve on katlı betonarme düzlem çerçeveler için Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde edilen kat kesme kuvvetleri, taban kesme kuvvetleri ve görelî kat öteleme oranları birbiriyle kıyaslanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal elastik hesap yöntemleri, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi, Zaman Tanım Alanında Doğrusal Hesap Yöntemi, tasarım spektrumu.

### A STUDY ON LINEER ELASTIC METHODS USED FOR SEISMIC ANALYSIS OF BUILDINGS

#### ABSTRACT

There exist some differences in calculation of seismic design loads acting on a building in analysis methods of the Turkish Seismic Design Code-2007. This has lead to investigation of selection of analysis method in case where it is possible to

\*Sorumlu Yazar: taner.ucar@deu.edu.tr

use all methods in analysis. Various quantities, which can be obtained from the Equivalent Seismic Load Method and the Mode Superposition Method by using the elastic design acceleration spectra of the code, can be compared with each other. Because strong ground motion records, which are used in the construction of the design spectra of the code, are not specified, quantities obtained from the Time History Analysis will not be related to the same earthquakes. In this study, design spectra used in the Equivalent Seismic Load Method and the Mode Superposition Method are created by approximation of Newmark-Hall, in which several important strong ground motions that were recorded in Turkey are used. Acceleration time histories of the same earthquakes are used in the Time History Analysis. Story shear forces, base shears and relative story drift ratios, which are obtained from the application of the Equivalent Seismic Load Method, the Mode Superposition Method and the Time History Analysis on five, eight and ten-story RC frame structures are compared with each other.

**Keywords:** Linear elastic analysis methods, Equivalent Seismic Load Method, Mode Superposition Method, Linear Time History Analysis, design spectrum.

## 1. GİRİŞ

Deprem Yönetmeliği-2007’de yeni yapılacak binaların deprem hesabında kullanılmak üzere üç adet elastik hesap yöntemi bulunmaktadır. Bunlar Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’dir. Yönetmelikte belli koşullar altında her üç yöntemin de kullanılabilmesi belirtilmektedir. Bu gibi durumlarda, her yöntemde binaların tasarımında esas alınacak yatay yüklerin farklı şekilde elde edilmesi deprem hesap yönteminin seçimini gündeme getirmektedir. Bu aşamada genellikle uygulaması daha kolay olan, daha az işlem hacmi ve zaman gerektiren yöntem seçilmektedir. Bu yöntem de genellikle birçok mühendis tarafından daha iyi bilinen Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve kimi zaman da Mod Birleştirme Yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, yüksek mod etkilerinin önemli olmadığı düzenli ve yüksek olmayan binalar için uygundur [1]. Matematiksel bakış açısından, Mod Birleştirme Yöntemi, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’ne göre daha kesin bir yöntem olarak görülür. Ancak taşıyıcı sistemin elemanlarının atalet momentlerinde, davranışlarındaki belirsizlikler yanında hesapta depremi temsil eden spektrum eğrisindeki kabuller bu yöntemin de önemli bir yaklaşıklık içerdiğini gösterir. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’nin kabullerinin daha az sayıda olması pek çok durumda yönteme olan güveni artırır [2,3]. Bununla birlikte Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nin tüm bina ve bina türü yapının hesabında herhangi bir koşula bağlı kalınmaksızın kullanılması bu iki yöntemi daha çok ön plana çıkarmaktadır. Deprem yüklerinin binaya doğrudan etkilerek hesap yapılması nedeniyle Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemleri yapı davranışının en doğru şekilde modellendiği yöntemler olarak karşımıza çıkmakta [1,4] ve diğer iki hesap yöntemine göre kesin kabul edilmektedir [5].

Deprem Yönetmeliği-2007’de verilen elastik tasarım ivme spektrumları kullanılarak Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi’nden ve Mod Birleştirme Yöntemi’nden elde edilecek deprem yükleri, iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri birbiriyle karşılaştırılabilir. Ancak yönetmelikte yer alan tasarım ivme spektrumlarının oluşturulmasında esas alınan yapay veya gerçek deprem kayıtları bilinemediğinden, Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde edilecek büyüklükler belirlenemez veya aynı depremlere ait olmaz.

Bu çalışmada, Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi’nde kullanılan spektrumlar gerçek deprem kayıtlarından üretilmiş ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nde de aynı depremlere ait ivme kayıtları kullanılmıştır. Çalışmanın önemli ve ayırt edici özelliği, her üç yöntemde de aynı depremlere ait girdilerin veya o depremlere ait kayıtlardan üretilen verilerin kullanılmış olmasıdır. Analizlerde TS 500 ve Deprem Yönetmeliği-2007 koşulları çerçevesinde boyutlandırılan beş, sekiz ve on katlı üç adet betonarme çerçeve kullanılmıştır. Toplam deprem yükünün (taban kesme kuvvetinin) belirlenmesinde kullanılan tasarım spektrumu, Türkiye’de kaydedilmiş önemli depremlere ait veriler kullanılarak Newmark-Hall yaklaşımı ile elde edilmiştir. Newmark-Hall tasarım spektrumu kullanılarak Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi’nden elde edilen çeşitli büyüklükler (kat kesme kuvvetleri, taban kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemesi oranları) hem birbiriyle ve hem de aynı depremlerin ivme kayıtları kullanılarak Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde edilen ortalama sonuçlar ile kıyaslanarak hesap yöntemlerinin etkinliği araştırılmıştır.

## **2. DEPREM HESABINDA KULLANILAN YÖNTEMLER**

Deprem Yönetmeliği-2007’de bina ve bina türü yapıların deprem hesabında kullanılacak hesap yöntemleri Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’dir.

### **2.1. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi**

Bu yöntemde binanın birinci modu esas alınır ve katlara etkileyen deprem kuvvetlerinin kat kütlesi ve katın temelden yüksekliği ile orantılı olduğu kabul edilir. Titreşim periyodunun hesabında ve deprem yükünün dağıtılmasında binanın kütlesi hesaba katıldığı için bu yöntem yapının birinci serbestlik derecesini esas alan dinamik bir yöntem olarak kabul edilebilir [3].

Kiriş, kolon ve perdelerden oluşan betonarme iskeletli yapılara etkileyen deprem yükleri genellikle yapıya döşemeleri seviyesinde etkileyen yatay yükler olarak kabul edilir. Yatay yüklerin binanın asal doğrultularında ayrı ayrı etkidiği kabul edilerek, taşıyıcı sitemlerin elemanlarında kesit etkileri bulunur [3]. Göz önüne alınan deprem doğrultusunda, binanın tümüne etkileyen toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti),  $V_s$ ,

$$V_t = \frac{WA}{R_a} \frac{T_1}{T_1} \geq 0.10A_0IW \quad (1)$$

şeklinde belirlenir [6]. Denklem (1)'de  $W$  bina toplam ağırlığı,  $A(T_1)$  deprem yüklerinin belirlenmesinde esas alınan spektral ivme katsayısı,  $R_a(T_1)$  deprem yükü azaltma katsayısı,  $A_0$  etkin yer ivmesi katsayısı,  $I$  ise bina önem katsayısıdır.

Aynı periyotla çeşitli harmonik titreşimler yapan bir kütlede meydana gelecek atalet kuvveti, hareketin ivmesi ve dolayısıyla genliği ile doğru orantılıdır. Düşey konsol şeklinde kabul edilebilecek yapıda, genliklerin zemin seviyesinde itibaren yukarı doğru arttığı göz önüne alınır, deprem kuvvetlerinin de benzer değişim göstereceği kabul edilir [3]. Bulunan taban kesme kuvveti ( $V_t$ ) binanın yüksekliği boyunca uygun dinamik serbestlik dereceleri doğrultusunda yatay tekil kuvvetler şeklinde dağıtılır. Bu kuvvetin yükseklik boyunca dağılımı lineer ve lineer olmayan fonksiyonlarla yapılabilir. Yönetmeliklerde çoğunlukla lineer dağılım tercih edilir ve buna uygun olarak  $i$ . kata dinamik serbestlik derecesi doğrultusunda etkiyen yatay kuvvet ( $F_i$ ) Denklem (2) kullanılarak hesaplanır [6].

$$F_i = V_t - \Delta F_N \frac{w_i H_i}{\sum_{j=1}^N w_j H_j} \quad (2)$$

Bu denklemde,  $w_i$  binanın  $i$ . katının ağırlığı ve  $H_i$  ise binanın  $i$ . katının temel üstünden itibaren ölçülen yüksekliğidir. Binanın tepe katına etkiyen ek eşdeğer deprem yükü ( $\Delta F_N$ ) değeri ise Denklem (3) kullanılarak belirlenir [6].

$$\Delta F_N = 0.0075NV_t \quad (3)$$

## 2.2. Mod Birleştirme Yöntemi

Yapı klasik sönümlü ise dinamik etkilere tepkisi titreşim mod şekillerinin süperpozisyonu ile incelenebilir. Bu analiz Deprem Yönetmeliği-2007'de Mod Birleştirme Yöntemi olarak isimlendirilmiştir [7]. Mod Birleştirme Yöntemi'nde toplam deprem kuvvetinin hesabında ve katlara dağıtılmasında yapının yeterli sayıdaki titreşim periyoduna ait mod şekilleri dikkate alınır. Bu yöntem çok serbestlik dereceli sistemlerin davranışını veren ifadelerin her mod şekli için ayrı ayrı değerlendirilmesi olarak da görülebilir [2,3].

Bu yöntemde maksimum iç kuvvetler ve yerdeğiştirmeler, binada yeterli sayıda doğal titreşim modunun her biri için hesaplanan maksimum katkıların istatistiksel olarak birleştirilmesi ile elde edilir. İstatistiksel olarak birleştirilme yapılmasının nedeni, bu maksimum katkıların farklı zamanlarda meydana gelmiş olmasıdır. Bu yöntemde iç kuvvet ve yerdeğiştirmelerin zamana bağlı değişimleri değil maksimum değerleri dikkate alınmakta ve çözümleme bu şekilde yapılmaktadır.

Herhangi bir  $n$ 'inci titreşim modunda göz önüne alınacak azaltılmış ivme spektrumu ordinatı aşağıdaki Denklem (4) ile belirlenir [6].

$$S_{aR} T_n = \frac{S_{ae} T_n}{R_a T_n} \quad (4)$$

Bu denklemde  $S_{aR}(T_n)$ ,  $n$ 'inci doğal titreşim modu için azaltılmış spektral ivme,  $S_{ae}(T_n)$  elastik spektral ivme ve  $R_a(T_n)$  ise  $n$ 'inci doğal titreşim modu için hesaplanan deprem yükü azaltma katsayısıdır. Elastik ivme spektrumunun özel olarak belirlenmesi durumunda  $S_{ae}(T_n)$  yerine ilgili özel ivme spektrumu ordinatı göz önüne alınır.

Hesaba katılması gereken yeterli titreşim modu sayısı,  $Y$ , göz önüne alınan birbirine dik  $x$  ve  $y$  yatay deprem doğrultularının her birinde, her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının hiçbir zaman bina toplam kütlelerinin %90'ından daha az olmaması kuralına göre belirlenecektir [6]. Bu koşul Denklem (5a) ve (5b) ile verilmiştir.

$$\sum_{n=1}^Y M_{xn} = \sum_{n=1}^Y \frac{L_{xn}^2}{M_n} \geq 0.90 \sum_{i=1}^N m_i \quad (5a)$$

$$\sum_{n=1}^Y M_{yn} = \sum_{n=1}^Y \frac{L_{yn}^2}{M_n} \geq 0.90 \sum_{i=1}^N m_i \quad (5b)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $M_{xn}$  ve  $M_{yn}$  göz önüne alınan  $x$  ve  $y$  deprem doğrultuları için binanın  $n$ 'inci doğal titreşim modundaki etkin kütle,  $M_n$   $n$ 'inci doğal titreşim moduna ait modal kütle,  $m_i$  ise binanın  $i$ 'inci katının kütleleridir.  $L_{xn}$  ve  $L_{yn}$  ile modal kütle  $M_n$ 'nin ifadeleri ise, kat döşemeleri rijit diyafram olarak modellenen binalar için Denklem (6) ve Denklem (7)'de verilmiştir [6].

$$L_{xn} = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{xin} \quad (6a)$$

$$L_{yn} = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{yin} \quad (6b)$$

$$M_n = \sum_{i=1}^N m_i \Phi_{xin}^2 + m_i \Phi_{yin}^2 + m_{\theta i} \Phi_{\theta in}^2 \quad (7)$$

Burada  $\Phi_{xin}$  ve  $\Phi_{yin}$   $n$ 'inci mod şeklinin  $i$ 'inci katta  $x$  ve  $y$  eksen doğrultusundaki yatay bileşeni,  $\Phi_{\theta in}$   $n$ 'inci mod şeklinin  $i$ 'inci katta dikey eksen etrafındaki dönme bileşenidir.  $m_{\theta i}$  ise binanın  $i$ 'inci katının kaydırılmamış kütle merkezinden geçen dikey eksene göre kütle eylemsizlik momentidir.

### 2.2.1. Mod Katkılarının Birleştirilmesi

Mod Birleştirme Yöntemi'nde, her titreşim modu için hesaplanan ve eşzamanlı olmayan maksimum katkılar binaya etkiyen toplam deprem yükü, kat kesme kuvvetleri, iç kuvvet bileşenleri, yerdeğiştirme ve görelî kat ötelemesi gibi büyüklüklerin her biri için ayrı ayrı olmak üzere, belirli kurallar çerçevesinde istatistiksel olarak birleştirilir.

$T_m < T_n$  olmak üzere, göz önüne alınan herhangi iki titreşim moduna ait doğal periyotların daima  $T_m/T_n < 0.80$  koşuluna sağlaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Karelerin Toplamının Kare Kökü (SRSS) kuralı uygulanabilir [5].  $T_m$  ve  $T_n$  binanın  $m$ 'inci ve  $n$ 'inci doğal titreşim periyotlarıdır. Bu koşulun sağlanmaması durumunda, maksimum mod katkılarının birleştirilmesi için Tam Karesel Birleştirme (CQC) Kuralı uygulanacaktır [6].

Göz önüne alınan deprem doğrultusunda, yukarıda açıklanan kurallara göre elde edilen bina toplam deprem yükünün ( $V_{tB}$ ), Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi'nden hesaplanan bina toplam deprem yüküne ( $V_t$ ) oranının, aşağıda tanımlanan  $\beta$  değerinden küçük olması durumunda ( $V_{tB} < \beta V_t$ ), Mod Birleştirme Yöntemi'ne göre bulunan tüm iç kuvvet ve yerdeğiştirme büyüklükleri Denklem (8) kullanılarak büyütülecektir [6].

$$B_D = \frac{\beta V_t}{V_{tB}} B_B \quad (8)$$

Bu denklemde  $B_D$ ,  $B_B$  büyüklüğüne ait büyütülmüş değer,  $B_B$  ise Mod Birleştirme Yöntemi'nde mod katkılarının birleştirilmesiyle bulunan herhangi bir büyüklüktür. Binada A1, B2 ve B3 türü düzensizliklerin bulunması durumunda  $\beta=1.0$  ve bu düzensizliklerin hiçbirinin bulunmaması durumunda ise  $\beta=0.90$  alınacaktır.

### 2.3. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi

Tek serbestlik dereceli bir sistemin herhangi bir yer hareketi etkisinde sönümlü zorlanmış titreşimine ait hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [8,9,10].

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (9)$$

Denklem (9)'da  $m$  sistemin kütlesi,  $c$  sönüm katsayısı,  $k$  ise yatay rijitliğidir.  $u(t)$ ,  $\dot{u}(t)$  ve  $\ddot{u}(t)$  ise kütlelerin zamana bağlı yatay yerdeğiştirmesi, hızı ve ivmesi;  $\ddot{u}_g(t)$  ise yer ivmesidir. Denklem (9)'un her iki tarafı  $m$ 'ye bölünüp gerekli dönüşümler yapılarak Denklem (10) elde edilebilir [8].

$$\ddot{u}(t) + 2\omega_n \xi \dot{u}(t) + \omega_n^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (10)$$

Denklem (10)'da  $\omega_n$  sistemin doğal açısız frekansı,  $\xi$  ise sönüm oranıdır. Bu son denklem, herhangi bir nümerik çözümleme yöntemiyle çözüldüğünde,  $\ddot{u}_g(t)$  yer ivmesi altında sabit bir sönüm oranı için  $u(t)$  yerdeğiştirme değerleri ve buna bağlı olarak da elemanlardaki iç kuvvetler ve taban kesme kuvveti gibi

boyutlandırmada esas alınacak parametreler zamana bağlı olarak elde edilebilir. Bu tip bir çözümleme Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntem'i olarak bilinir.

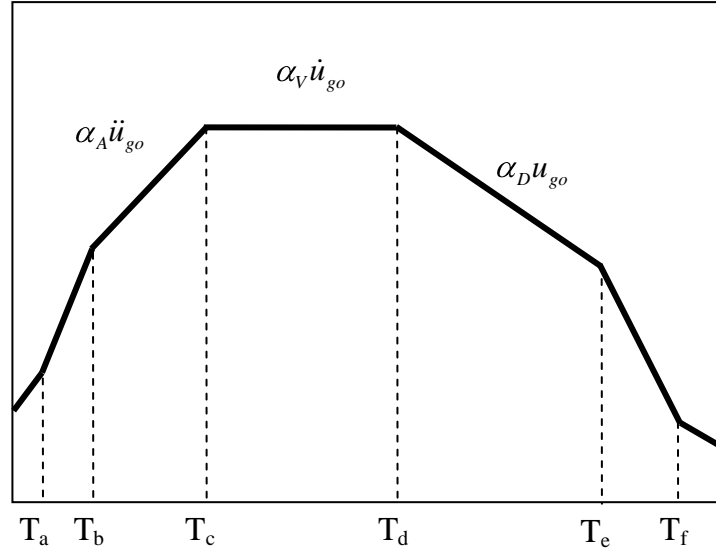
Bu yöntemde yönetmelikteki ana kuralların ötesine geçilerek deprem mühendisliği bilgileri ile gerçek veya üretilmiş bir deprem kaydının kullanılması gerekir. Boyutlama sırasında gerçek deprem kaydının esas alınması, hesaba esas olan deprem büyüklüğü, merkez üssü ve odak uzaklığı, kaynak mekanizması ve zemin koşullarının gerçek durumla en iyi bir şekilde uyuşturulması bakımından tercih edilir. Böylece pek çok belirsizlik önlenmiş olur [2]. Yapısal analiz ve hesaba dayalı olanaklardaki hızlı gelişmeler sonucu zaman tanım alanında hesap yöntemleri, sismik analizlerde ve yapıların tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Bina ve bina türü yapıların, zaman tanım alanında doğrusal elastik hesabı için, yapay yollarla üretilen, daha önce kaydedilmiş veya benzeştirilmiş ve Deprem Yönetmeliği-2007'de açıklanan özellikleri taşıyan en az üç deprem kaydı kullanılacaktır. Üç yer hareketi kullanılması durumunda sonuçların maksimumu, en az yedi yer hareketi kullanılması durumunda ise sonuçların ortalaması tasarım için esas alınacaktır [6].

### **3. NEWMARK-HALL ELASTİK TASARIM SPEKTRUMU**

Spektrumlar, tek serbestlik dereceli sistemlerin sabit bir sönüm oranı için seçilen bir yer hareketine verdiği ivme, hız veya yerdeğiştirme tepkilerinin en büyük değerinin, frekans veya periyoda bağlı olarak değişimini gösteren eğrilerdir. Spektrumlar belirli bir bölgede kaydedilmiş depremler için elde edilmekte ve karakteristik olarak çok kırıklı parçalardan oluşmaktadır. Buna bağlı olarak, tek serbestlik dereceli sistemin periyodundaki ufak bir değişikliğe karşılık birbirinden çok farklı spektral değerler ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı bu tip spektrumlar, tasarım amaçlı kullanılamazlar. Aksi halde tasarım sadece o deprem kaydı için geçerli olurdu. Ayrıca geçmişte meydana gelmiş depremlerin aynı bölge için bile olsa gelecekte meydana gelebilecek depremleri temsil etmesi beklenemez.

Yeni yapılacak yapıların tasarımında kullanılmak ve olası depremleri temsil etmek üzere yapı periyodundaki ufak değişimlerden çok fazla etkilenmeyen, daha yumuşak spektrumlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla geçmiş depremlere ait spektrumlardan faydalanılabilir ve bunlar istatistiksel olarak değerlendirilerek tasarım spektrumları elde edilebilir.



Şekil 1. Newmark-Hall tasarım spektrumu (logaritmik ölçekte)

Tasarım amaçlı spektrumun oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan birisi Newmark-Hall'a aittir [12]. Newmark-Hall tasarım spektrumu, karakteristik periyot aralıkları için sabit ivme, hız ve yerdeğiştirme bölgelerini içeren ve doğru parçalarından meydana gelen bir spektrumdur (Şekil 1).  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_e$  ve  $T_f$  periyotları tüm spektrumlar için sabittir ve  $T_a=1/33$  sn,  $T_b=1/8$  sn,  $T_e=10$  sn ve  $T_f=33$  sn olarak önerilmektedir.  $T_c$  ve  $T_d$  periyotları ise sabit ivme ( $\alpha_A \ddot{u}_{go}$ ), sabit hız ( $\alpha_V \dot{u}_{go}$ ) ve sabit yerdeğiştirme bölgelerine ait doğru parçalarının kesiştirilmesinden veya analitik olarak elde edilmektedir.  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  ve  $\alpha_D$  spektrumun sabit ivme, hız ve yerdeğiştirme bölgelerine ait büyütme katsayıları olup, farklı sönüm oranları dikkate alınarak, ortalama ve ortalama+1 standart sapma değerleri için Newmark-Hall tarafından önerilen değerler olarak alınmaktadır [12].

#### 4. SAYISAL UYGULAMALAR

##### 4.1. Analizlerde Kullanılan Çerçeveler

Bu çalışmada öncelikli olarak analizlerde kullanılmak üzere kat sayıları beş (BA\_5), sekiz (BA\_8) ve on (BA\_10) olarak belirlenen ve üç açıklıktan oluşan düzlem çerçeveler, yüksek süneklikli yapı koşullarını sağlayacak şekilde TS 500 [13] ve Deprem Yönetmeliği-2007 [6] kuralları çerçevesinde geometri ve malzeme bakımından uygun bir şekilde boyutlandırılmıştır.

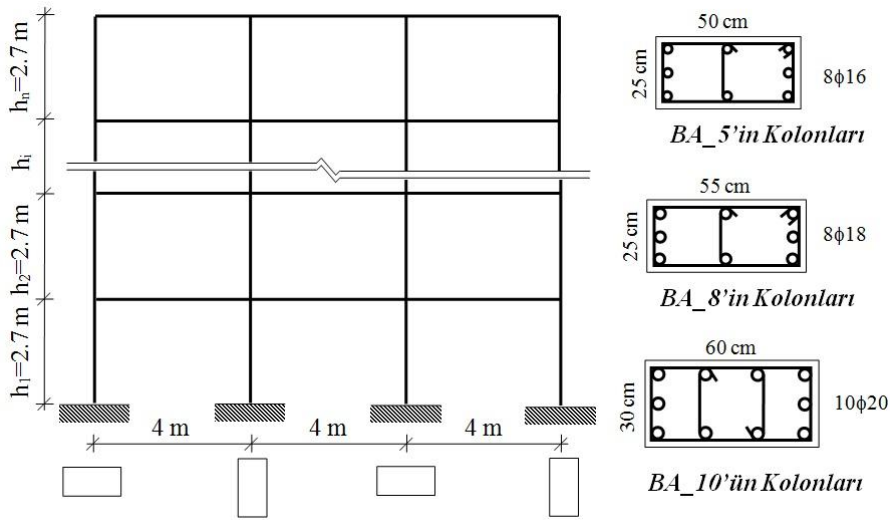
Kullanılan çerçevelerin beton sınıfı C25, beton çeliği sınıfı ise S420 olarak öngörülmüştür. Tüm çerçevelerin birinci derece deprem bölgesinde bulunduğu (etkin yer ivmesi katsayısı  $A_0=0.40$ ) ve zemin sınıfının Z2 (spektrum karakteristik periyotları  $T_A=0.15$  saniye ve  $T_B=0.40$  saniye) olduğu kabul edilmiştir. Yapı önem katsayısı  $I=1.0$  olarak belirlenen bu çerçeveler yüksek süneklik düzeyine sahip



olduğu (taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $R=8$ ) tasarlanmıştır. Tipik kat yüksekliği 2.70 m olarak alınmıştır.

Kirişlerdeki düzgün yayılı ölü ve hareketli yükler sırasıyla 16.75 kN/m ve 5.0 kN/m olarak dikkate alınmıştır. Çerçeveselerin kat kütleleri ölü yükler ile hareketli yüklerin %30'unun (hareketli yük katılım katsayısı,  $n=0.30$ ) toplamından hesaplanmıştır. Çerçeveselerin boyutlandırılması Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yukarıdaki koşullara uygun olarak boyutlandırılan çerçeveseler, kolonların çerçeve akslarında dikkate alınan doğrultuları ve boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Çerçeveselerdeki tüm kirişler 25x50cm dikdörtgen kesitli olarak boyutlandırılmıştır.



Şekil 2. Analizlerde kullanılan çerçeveseler

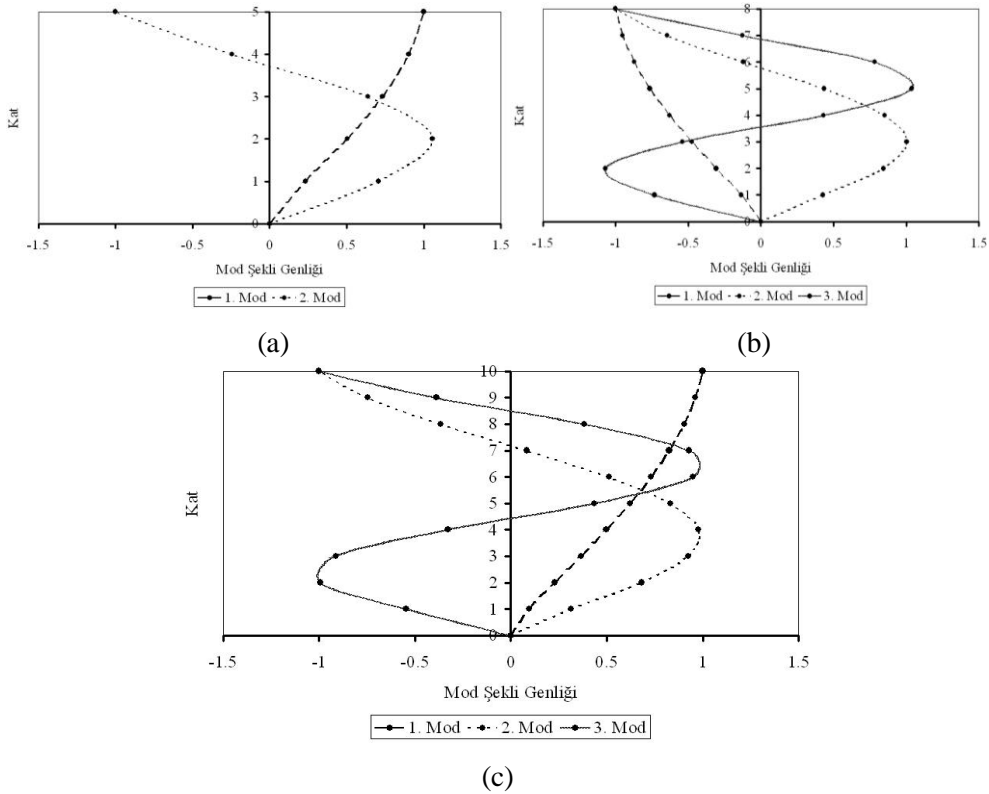
#### 4.2. Çerçeveselerin Dinamik Özellikleri

Analizlerde kullanılan betonarme çerçeveselerin Mod Birleştirme Yöntemi ile analizinde dikkate alınan titreşim modu sayısı ( $n$ ), bu modlara ait doğal titreşim periyotları ( $T_{xn}$ ), her bir mod için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlelerine oranları ( $\sum U_{xn}$ ), modlara ait katkı çarpanları ( $\Gamma_{xn}$ ) ve kat kütleleri ( $m_i$ ) Tablo 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada, çerçeveselerin Mod Birleştirme ile analizinde hesaba katılan yeterli titreşim modu sayısı, göz önüne alınan deprem doğrultusunda her bir titreşim modu için hesaplanan etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütlelerinin en az %95'i olacak şekilde belirlenmiştir. Söz konusu durum BA\_5 için ilk iki, BA\_8 ve BA\_10 için ise ilk üç titreşim modu dikkate alındığında sağlanmaktadır. Hesaba katılan yeterli titreşim modu sayısına ait mod şekli genlikleri BA\_5, BA\_8 ve BA\_10 için Şekil 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Çerçevelerin dinamik özellikleri

Çerçeve	$m_i$ (kNsn <sup>2</sup> /cm)	Mod (n)	$T_{xn}$ (sn)	$U_{xn}$ (%)	$\sum U_{xn}$ (%)	$\Gamma_{xn}$
BA_5	0.296	1	0.449	85.41	85.41	1.2677
		2	0.144	9.85	95.26	0.3752
BA_8	0.299	1	0.691	82.61	82.61	1.2897
		2	0.225	10.35	92.96	0.4225
		3	0.127	3.48	96.43	0.2499
BA_10	0.311	1	0.784	81.06	81.06	1.3020
		2	0.254	10.69	91.75	0.4412
		3	0.143	3.6	95.36	0.2685

Şekil 3.  $\sum U_x > \%95$  koşulu için yeterli modlara ait genlikler

(a) BA\_5, (b) BA\_8, (c) BA\_10

#### 4.3. Newmark-Hall Tasarım Spektrumunun Oluşturulması

Çalışmada Newmark-Hall spektrumunun oluşturulmasında esas alınan ivme kayıtları [14] Türkiye topraklarında kaydedilmiş ve büyüklükleri 6.1 ile 7.6 arasında değişen yedi önemli depremlere aittir.

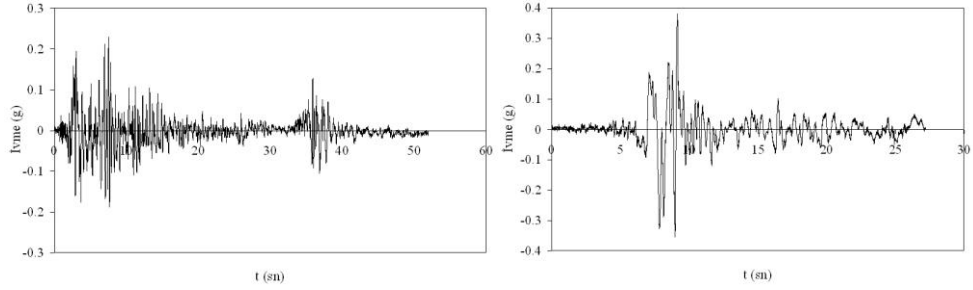
Kullanılan yer hareketi kayıtlarına ait detaylar Tablo 2’de verilmiştir. Newmark-Hall spektrumunun oluşturulmasında esas alınan depremlere ait ivme kayıtları ise Şekil 4’de verilmiştir.

Newmark-Hall tasarım ivme spektrumunun sabit periyot değerleri  $T_a=1/33$  sn,  $T_b=1/8$  sn,  $T_c=10$  sn ve  $T_f=33$  sn olarak alınmıştır.  $T_c$  ve  $T_d$  periyotları ise analitik olarak elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Kullanılan deprem ivme kayıtlarının özellikleri

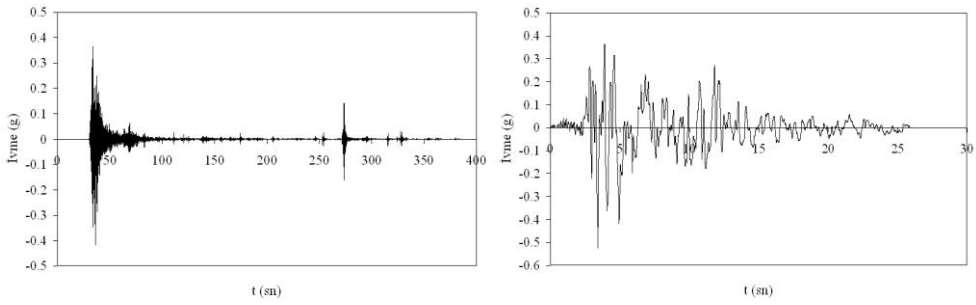
Dep. No	Deprem	Tarih	Moment Büyüklüğü ( $M_w$ )	Kayıt Yeri	Odak Derinliği (km)	PGA ( $\text{cm/s}^2$ )	PGV ( $\text{cm/s}$ )	PGD (cm)
1	Kocaeli	17.08.1999	7.6	Kocaeli Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü	15.9	230.80	38.59	21.89
2	Kocaeli	17.08.1999	7.6	Düzce Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü	15.9	365.60	58.33	25.16
3	Kocaeli	17.08.1999	7.6	Sakarya Merkez Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü	15.9	408.70	70.99	90.70
4	Düzce	12.11.1999	7.1	Düzce Merkez Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü	11.0	406.20	68.57	48.27
5	Bingöl	01.05.2003	6.3	Bingöl Merkez Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü	6.0	296.04	21.87	5.05
6	Erzincan	13.03.1992	6.6	Erzincan Merkez Meteoroloji Müdürlüğü	23.0	478.77	78.22	29.5
7	Denizli	19.08.1976	6.1	Denizli Merkez Meteoroloji Müdürlüğü	20.0	266.84	16.78	1.30

*Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleriyle İlgili Bir İrdeleme*



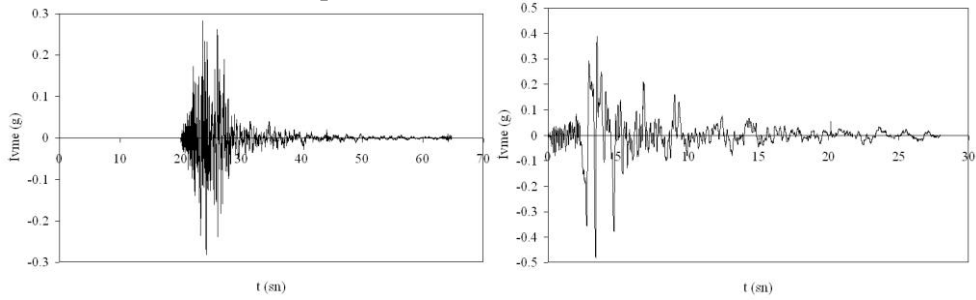
a-Kocaeli-1 Depremi

b- Kocaeli-2 Depremi



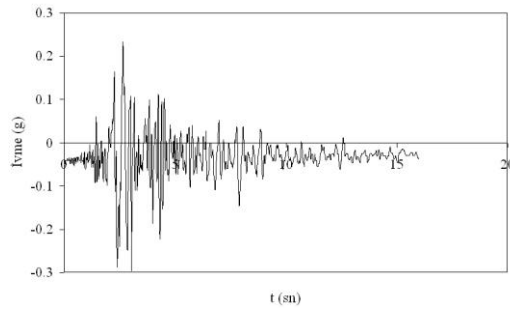
c-Kocaeli-3 Depremi

d-Düzce Depremi



e-Bingöl Depremi

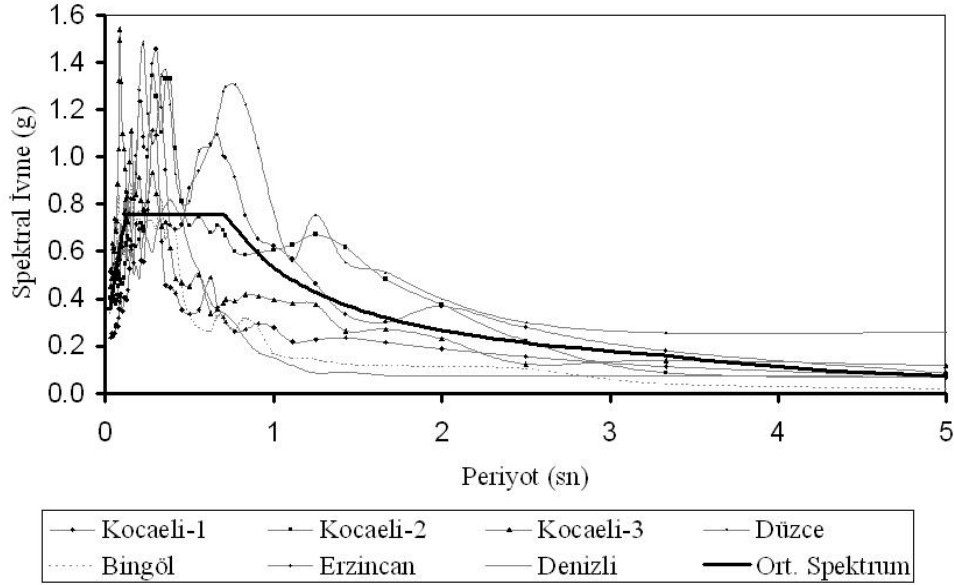
f-Erzincan Depremi



g-Denizli Depremi

**Şekil 4.** Seçilen depremlerin ivme kayıtları

Söz konusu depremlere ait ivme tepki spektrumları ve %5 sönüm oranı için verilen  $\alpha_A$ ,  $\alpha_V$  ve  $\alpha_D$  katsayıları kullanılarak Newmark-Hall yaklaşımı ile elde edilmiş ortalama tasarım spektrumu Şekil 5’de gösterilmiştir. Depremlere ait ivme tepki spektrumları SAP2000 Nonlinear Version 14.2 [15] analiz programı kullanılarak elde edilmiştir.



**Şekil 5.** Seçilen depremlerin ivme tepki spektrumları ve %5 sönüm oranı için ortalama Newmark-Hall tasarım ivme spektrumu

#### 4.4. Analiz Sonuçları

Çalışmada kullanılan farklı kat sayılarına sahip betonarme düzlem çerçevelerin farklı hesap yöntemleri ile deprem hesabı SAP2000 Nonlinear Version 14.2 [15] analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çerçevelerin Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi ile analizinde Newmark-Hall yaklaşımı ile oluşturulan tasarım ivme spektrumu kullanılmıştır. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nde ise tasarım ivme spektrumunun oluşturulmasında esas alınan gerçek depremlere ait ivme kayıtları kullanılmıştır.

Kullanılan üç farklı hesap yöntemi ile elde edilen taban kesme kuvvetleri (toplam deprem yükü) Tablo 3’de; analizlerde kullanılan çerçevelerin farklı katları için hesaplanan kesme kuvvetlerinin Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ve Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile elde edilen sonuçları ise Tablo 4’de verilmiştir. Zaman Tanım Alanı Hesap Yöntemi sonuçları, yedi farklı depremden elde edilen maksimum değerlerin ortalamasıdır.

**Tablo 3.** Farklı hesap yöntemleri ile bulunan taban kesme kuvvetleri (kN)

Çerçeve	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi	Mod Birleştirme Yöntemi	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi
<b>BA_5</b>	137.39	116.86	788.37
<b>BA_8</b>	222.36	184.06	1235.20
<b>BA_10</b>	259.55	215.88	1393.16

**Tablo 4.** Farklı hesap yöntemleri ile bulunan kat kesme kuvvetleri (kN)

Çerçeve	Kat	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi	Mod Birleştirme Yöntemi	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi
<b>BA_5</b>	5	49.18	34.53	233.50
	4	84.49	65.79	434.89
	3	110.94	90.38	590.46
	2	128.53	108.02	717.86
	1	137.39	116.86	787.75
<b>BA_8</b>	8	59.74	36.13	264.91
	7	100.29	70.84	506.69
	6	135.20	101.31	700.56
	5	164.25	127.64	830.87
	4	187.45	149.55	996.90
	3	204.80	166.63	1110.07
	2	216.51	178.46	1183.27
	1	222.36	184.06	1234.12
<b>BA_10</b>	10	63.17	34.89	275.58
	9	102.54	69.37	530.85
	8	137.35	100.24	733.28
	7	167.84	127.59	898.26
	6	194.01	151.68	1033.65
	5	215.86	172.36	1138.15
	4	233.39	189.43	1231.70
	3	246.59	202.74	1304.43
	2	255.23	211.82	1356.20
	1	259.55	215.88	1394.07

Çalışmada farklı doğrusal elastik hesap yöntemleri ile bulunan yerdeğiştirmeleri kıyaslayabilmek amacıyla, analiz edilen çerçevelerin kat ötelemesi oranları elde edilmiş ve bunların her kattaki değeri hesap yöntemine bağılı olarak Tablo 5’de yüzde (%) cinsinden verilmiştir. Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde

edilen görelî kat ötelemesi oranları analizlerde kullanılan depremler için hesaplanan maksimum değerlerin ortalaması şeklinde alınmıştır.

**Tablo 5.** Farklı hesap yöntemleri ile bulunan görelî kat ötelemesi oranları (%)

Çerçeve	Kat	Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi	Mod Birleştirme Yöntemi	Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi
BA_5	5	0.03061	0.02182	0.25778
	4	0.04920	0.03773	0.31148
	3	0.06344	0.05123	0.39217
	2	0.07223	0.06031	0.40037
	1	0.06194	0.05246	0.32264
BA_8	8	0.04151	0.02587	0.18259
	7	0.06152	0.04121	0.28646
	6	0.07926	0.05621	0.38783
	5	0.09361	0.06913	0.47614
	4	0.10454	0.07958	0.54757
	3	0.11156	0.08686	0.59196
	2	0.11396	0.09008	0.60533
	1	0.08867	0.07056	0.46964
BA_10	10	0.03997	0.02516	0.17730
	9	0.05548	0.03724	0.26074
	8	0.06963	0.04959	0.34175
	7	0.08170	0.06072	0.40646
	6	0.09170	0.07034	0.46164
	5	0.09954	0.07833	0.50757
	4	0.10511	0.08441	0.53550
	3	0.10782	0.08796	0.59434
	2	0.10532	0.08687	0.52186
	1	0.07526	0.06239	0.39920

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Deprem Yönetmeliği-2007’de yeni yapılacak binaların deprem hesabında kullanılmak üzere verilen Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi, Mod Birleştirme Yöntemi ile hesaplanan taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemesi oranları hem birbiriyle, hem de Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi’nden elde edilen büyüklüklerle karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen somut sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

*Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleriyle İlgili Bir İrdeleme*

- 1) Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'nden hesaplanan toplam deprem yüğü (taban kesme kuvveti) Mod Birleştirme Yöntemi'nden hesaplanan değerdan daha büyüktür. Söz konusu oran BA\_5 için %17.6, BA\_8 için %20.8 ve BA\_10 için %20.2'dir.
- 2) Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi kullanılarak hesaplanan kat kesme kuvvetleri Mod Birleştirme Yöntemi'nden elde edilen değerdan daha büyüktür.
- 3) Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'nden hesaplanan kat kesme kuvvetlerinin Mod Birleştirme Yöntemi'nden bulunan değerdan oranı ilk kattan üst katlara gidildikçe artmaktadır. En büyük artış oranı, analiz edilen tüm çerçevelerin en son katı için hesaplanmıştır.
- 4) En üst kat için her iki yöntemden hesaplanan kat kesme kuvvetlerindeki artış oranının, bina kat sayısına bağı olarak arttığı görülmektedir.
- 5) Üçüncü maddede açıklanan sonuç gördeli kat ötelemesi oranları için de geçerlidir.
- 6) Yüksek modların üst katlarda hesaplanan kesme kuvvetleri ve gördeli kat ötelemesi oranlarına katkısı, alt kattakilere oranla daha çoktur.
- 7) Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi'nden elde edilen taban kesme kuvveti, kat kesme kuvveti ve gördeli kat ötelemesi oranları diğer iki yöntemden elde edilen değerdan büyüktür. Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi'nde deprem yüğü azaltma katsayısı kullanılarak taşıyıcı sistemin kendine özgü doğrusal olmayan davranışı kısmen dikkate alınarak deprem yükleri azaltılmakta, Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi'nde ise deprem ivmeleri binaya doğrudan etki ettirilmektedir.
- 8) Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile bulunan ortalama taban kesme kuvveti değerdan analiz edilen tüm çerçeveler için Eşdeğer Deprem Yüğü ile hesaplanan taban kesme kuvveti değerdan ortalama 5.5 kat, Mod Birleştirme Yöntemi'nden hesaplanan taban kesme kuvveti değerdan ise ortalama 6.5 kat fazladır.
- 9) Her deprem kaydı kendi özelliğini sonuçlara yansıtmakta ve dolayısıyla seçilen farklı deprem kayıtları için farklı analiz sonuçları elde edilmektedir. Bu nedenle, çalışmada Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi'nden elde edilen sonuçlar yönetmelik koşulları dikkate alınarak farklı depremlerden hesaplanan değerdan ortalaması olarak alınmıştır.

Bu çalışmada aynı deprem kayıtları ve onlara bağı olarak üretilen spektrumun kullanılmasıyla farklı doğrusal elastik hesap yöntemlerinden elde edilen sonuçların yeni binaların tasarımında hesap yöntemlerinin seçimi konusunda tasarımcılara faydalı olması beklenmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1]Fahjan Y., Vatansever S., Özdemir Z., 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, s.1-9.
- [2]Celep Z., Kumbasar N., *Yapı Dinamiği (2001)*, Üçüncü baskı, İstanbul, Rehber Matbaacılık.
- [3]Celep Z., Kumbasar N., (2004), *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı* İstanbul, Beta Dağıtım.
- [4]Li, Y.R. (1996). Non-Linear Time History And Pushover Analyses for Seismic Design and Evaluation, Doktora Tezi, Texas Üniversitesi, Austin, TX, ABD.
- [5]Karaduman A., Döndüren M.S., Türkiye Mühendislik Haberleri, (2004), 432, s.55-62.
- [6]Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007), Ankara.
- [7]Kasımzade A.A., *Yapı Dinamiği Temelleri ve Deprem Mühendisliğinde Uygulamaları (2004)*, İstanbul, Birsen Yayınevi.
- [8]Chopra A.K., (1995), *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering* Prentice-Hall, New Jersey.
- [9]Clough R.W., Penzien J., (1993), *Dynamics of Structures* Second edition, McGraw-Hill, Inc.
- [10]Paz M., (1997), *Structural Dynamics: Theory and Computation* Fourth edition, Chapman&Hall, USA.
- [11]Fahjan Y.M., (2008), *İMO Teknik Dergi*, 19(3), s.4423-4444.
- [12]Newmark N.M., Hall W.J., (1982), *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California.
- [13]Türk Standartları Enstitüsü, (2000), *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları-TS500* Ankara.
- [14]T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Türkiye Ulusal Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanı, 2011. 10.03.2011 tarihinde <http://kyh.deprem.gov.tr/ftpt.htm> adresinden alınmıştır.
- [15]SAP2000 (2010), Nonlinear, Version 14.2, Structural Analysis Program Computers and Structures Inc., Berkeley CA.