GENEL YÜK VEKTÖRLERİ İLE ÇOK MODLU İTME ANALİZİ (GENEL İTME ANALİZİ)

F.S. Alıcı[1], K. Kaatsız[1] ve H. Sucuoğlu[2]

[1] *Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
[2] *Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara*
Email: asoner@metu.edu.tr

ÖZET:

Yapıların deprem yer hareketleri altında doğrusal olmayan davranışını hesaplamak için çok modlu bir itme analizi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde yapı belirli bir katın kat arası hedef ötelenme oranına ulaşıncaya kadar genel bir yük vektörü ile adım adım itilmektedir. Genel yük vektörü, deprem etkisi altında bir katın kat arası ötelenme oranı maksimum değerine ulaştığında yapıya etki eden yatay yük dağılımını ifade etmekte ve tüm etkin modların katkısından oluşmaktadır. Önerilen yöntem doğrusal olmayan modal katkıların SRSS veya CQC ile birleştirilmesinden kaynaklanan hatalardan etkilenmemektedir. Adaptiv olmadığı için özel programlamaya ihtiyacı yoktur. Herhangi bir doğrusal olmayan statik itme analizi programı ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Yüksek modların etkin olduğu çerçevelerde genel yük vektörleri ile yapılan itme analizi (genel itme analizi), zaman boyutunda doğrusal olmayan analiz ile ile elde edilen iç kuvvet ve şekildeğiştirme değerlerine son derece yakın sonuçlar vermektedir.

ANAHTAR KELİMELER : İtme analizi, genel yük vektörleri, hedef ötelenme, yüksek mod etkisi.

1. GİRİŞ

Tek modlu konvansiyonel itme analizinin kavramsal basitliği ve uygulama kolaylığı, uygulaması oldukça zahmetli olan zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz yönteminin yerine geçebilecek çok modlu itme analizi yöntemlerinin geliştirilmesine fırsat sağlamıştır (Sasaki vd. 1998, Chopra ve Goel 2002, Gupta ve Kunnath 2000, Aydınoğlu 2003, Antoniou ve Pinho 2004). Geliştirilen yöntemler, birisi hariç adaptiv özelliktedir. Adaptiv itme analizi yöntemlerinde her itme adımında özdeğer analizi yapılarak yapıda oluşan inelastik özelliklere göre modal değerler tekrar hesaplanmaktadır. Ancak bu yaklaşım statik itme analizinin basitliğini büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca uygulanması için özel yazılım hazırlanmasını veya mevcut yazılımların değiştirilmesini gerektirmektedir. Diğer yandan geliştirilen çok modlu itme analizi yöntemlerinin tümünde her moda ait değerler bağımsız olarak hesaplanmakta, sonra nihai sonuçlar istatistiksel birleştirme yöntemleri kullanarak (SRSS veya CQC) elde edilmektedir. Doğrusal elastik yapıların modal spektrum analizi için geliştirilmiş olan istatistiksel birleştirme yöntemlerinin doğrusal olmayan modal analiz sonuçlarına uygulanması da önemli hatalara neden olmaktadır. Özellikle bu yolla elde edilen iç kuvvetler kapasiteleri aşmakta, her itme adımında iç kuvvetlerin kontrol edilerek düzeltilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, bir yapının deprem davranışına katkısı olan tüm modları tutarlı biçimde hesaba katan çok modlu doğrusal olmayan bir itme analizi yöntemi anlatılmaktadır (Sucuoğlu ve Günay, 2011). Sunulan yöntemde her kat için türetilen farklı bir genel yük vektörü ile itme analizleri yapılmaktadır. Dolayısıyla kat sayısı kadar itme analizi yapılmakta, her kat ile ilgili iç kuvvet ve şekil değiştirme değerleri kendi genel yük vektörü ile yapılan itme analizinden elde edilmektedir. Her kata ait genel yük vektörü her modun farklı katkısından oluşmakta, ilgili katın kat arası ötelenmesi maksimum değere ulaştığında yapıya etki eden yatay yük dağılımını temsil etmektedir. Bir katın itme analizi o katın hedef kat arası ötelenme değerine ulaşıncaya kadar adım-adım devam eder. Kat

arası ötelenme talebi (target drift demand), eşit ötelenme kuralı ile doğrusal elastik spektrum analizindan elde edilebilir. Burada birinci mod katkısı doğrusal olmayan tek dereceli sistem çözümünden de elde edilebilir. Önerilen yöntem deplasman kontrollü itme analizi yapabilen herhangi bir yazılım kullanarak (SAP, OpenSees, Drain, vb.) uygulanabilir. Bu bildiride oniki katlı bir çerçevenin itme analizleri yedi farklı yer hareketi altında önerilen yöntemle yapılmış, sonuçlar zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile ve diğer itme analizi sonuçları ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

2. GENEL YÜK VEKTÖRLERİ

Dinamik deprem davranışı sırasında farklı tepki parametreleri farklı zamanlarda maksimum değerlerine ulaşırlar. Herhangi bir tepki parametresinin maksimum değerine ulaştığı anda yapıya etki eden bir etkin yatay yük vektörü vardır. Etkin yük vektörü esasında tüm modların katkısından oluşur. Eğer bu vektör hesaplanabilirse, doğrusal elastik yapıya uygulanarak ve statik analiz yapılarak ilgili tepki parametresinin maksimum değeri elde edilir. Yapı doğrusal elastik değilse bu durumda adım adım arttırılarak uygulanır, ancak bu durumda tepki parametresinin hedef değeri (talep) önceden hesaplanmalıdır. Bu durum tüm itme analizi yöntemleri için geçerlidir. Bu çalışmada tepki parametresi olarak kat arası ötelenmeler seçilmiştir. Zira yapı deprem performansının (hasar dağılımının) kat arası ötelenme değerleri ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir.

Genel yük vektörlerinin tanımında çok dereceli doğrusal elastik yapı sistemlerinin bir deprem yer hareketi $\ddot{u}_g(t)$ altındaki tepkisinin mod birleştirme analizi ile hesaplanması esas alınmıştır. Bir kat arası ötelenme değerinin maksimum değerine ulaştığı t_{max} anında yapıya etki eden genel yük vektörü $\mathbf{f}(t_{max})$ tüm modların bu andaki katkılarının süperpozisyonu ile ifade edilebilir.

$$\mathbf{f}(t_{max}) = \sum_n \mathbf{f}_n(t_{max}) \tag{1}$$

Denklem (1)'de n'inci mod yük vektörünün t_{max} anındaki ifadesi

$$\mathbf{f}_n(t_{max}) = \Gamma_n \, \mathbf{m}\boldsymbol{\varphi}_n \, A_n(t_{max}) \tag{2}$$

olmaktadır. Burada $\Gamma_n = L_n / M_n$; $L_n = \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}} \mathbf{ml}$; $M_n = \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}} \mathbf{m} \boldsymbol{\varphi}_n$; $\boldsymbol{\varphi}_n$ n'inci mod vektörü, $\mathbf{m}$ kütle matrisi, $\mathbf{l}$ yer hareketi etki vektörü, $A_n(t_{max})$ ise Denklem (3)'ü sağlayan modal ivmedir.

$$A_n(t_{max}) = \omega_n^2 D_n(t_{max}) \tag{3}$$

Denklem (3)'de ω_n^2 n'inci mod frekansı, $D_n(t_{max})$ ise Denklem (4)'ü sağlayan modal yerdeğiştirme değeridir.

$$\ddot{D}_n(t_{max}) + 2\varsigma_n \omega_n \dot{D}_n(t_{max}) + \omega_n^2 D_n(t_{max}) = -\ddot{u}_g(t_{max}) \tag{4}$$

$D_n(t_{max})$, t_{max} değeri bilinmeden Denklem (4)'den elde edilemez. Bu yöntemde t_{max}, j katındaki kat arası ötelenmenin (Δ_j) maksimum olduğu zamanda tanımlanmaktadır.

$$\Delta_{j,max} = \Delta_j(t_{max}) \tag{5}$$

Bu parametrenin modal açılımı

$$\Delta_j(t_{max}) = \sum_n \Gamma_n \, D_n(t_{max}) \, (\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1}) \tag{6}$$

ile ifade edilir. $\varphi_{n,\,j}$, n'inci mod vektörü $\boldsymbol{\varphi}_n$.'in j katındaki elemanıdır. Denklem (6), eşitliğin her iki tarafı $\Delta_j\,(t_{max})$ ile bölünerek normalize edilebilir.

$$1 = \sum_n \Gamma_n \frac{D_n(t_{max})}{\Delta_j(t_{max})}(\varphi_{n,\,j} - \varphi_{n,\,j-1}) \tag{7}$$

Denklem (7)'nin sağ tarafında toplama operatörünün altındaki terim, j katındaki maksimum kat arası ötelenme $\Delta_j\,(t_{max})$ değerine n'inci modun katkısını normalize formda ifade etmektedir.

Denklem (5)'de j katı maksimum kat arası ötelenme değeri, ayni zamanda mod birleştirme yöntemini kullanarak ve modal katkıların karelerin toplamının kare kökü (SRSS) ile birleştirilmesi yoluyla kestirilebilir.

$$(\Delta_{j,\,\mathbf{max}})^2 \approx \sum_n \left[\Gamma_n\, D_n\,(\varphi_{n,\,j} - \varphi_{n,\,j-1})\right]^2 \tag{8}$$

Yukarıdaki denklemde D_n , deprem yer hareketi $\ddot{u}_g(t)$ altında tepki spektrumundan doğrudan elde edilen n'inci moda ait spektral yer değiştirmedir. Denklem (8) de Denklem (6) gibi her iki tarafı $(\Delta_{j,\,max})^2$ ile bölünerek normalize edilebilir.

$$1 = \sum_n \left[\Gamma_n \frac{D_n}{\Delta_{j,max}}(\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1})\right]^2 \tag{9}$$

Bu durumda Denklem (7) ve (9)'un sağ tarafları, j katı maksimum kat arası ötelenmesine n'inci modun katkısını ifade etmektedir. Bu iki terimin eşitlenmesi ve Denklem (5)'den $\Delta_{j,max} = \Delta_j(t_{max})$ kabulu ile

$$D_n(\mathbf{t_{max}}) = \frac{D_n}{\Delta_{j,\mathbf{max}}}\left[\Gamma_n D_n(\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j\ 1})\right] \tag{10}$$

elde edilir. Denklem (10)'da parantez içindeki terim j katı kat arası ötelenmesine n'inci mod katkısıdır ($\Delta_{j,n}$). Bu durumda Denklem (10) daha basite indirgenir.

$$D_n(t_{max}) = \frac{\Delta_{j,n}}{\Delta_{j,max}} D_n \tag{11}$$

Denklem (11)'de $\Delta_{j,n}$ mod birleştirme yönteminde n'inci mod için elde edilen j katı kat arası ötelenmesidir. $\Delta_{j,max}$ ise Denklem (8)'e göre modal katkıların birleştirilmesi ile elde edilen j katı maksimum kat arası ötelenmesidir.

j katına ait genel yük vektörü, önce $D_n(t_{max})$ ifadesinin Denklem (11)'den Denklem (3)'e yerleştirilerek $A_n\,(t_{max})$'in hesaplanması, sonra $A_n\,(t_{max})$'in Denklem (2)'ye yerleştirilerek $\mathbf{f}_n\,(t_{max})$'in bulunması, ve nihayet $\mathbf{f}_n\,(t_{max})$'in Denklem (2)'den Denklem (1)'e yerleştirilmesi ile bulunur.

$$\mathbf{f}_j(t_{max}) = \sum_n(\Gamma_n\, \mathbf{m}\, \boldsymbol{\varphi}_n\, A_n \frac{\Delta_{j,n}}{\Delta_{j,max}}) \tag{12}$$

Denklem (12)'de A_n n'inci moda ait spektral ivme değeridir.

3. KAT ARASI ÖTELENME TALEBİ

Doğrusal elastik sistemlerde j katı kat arası ötelenmesinin maksimum değeri, j katı kat arası modal ötelenmelerinin ($\Delta_{j,n,}$) SRSS ile birleştirilmesi yoluyla hesaplanır.

$$\Delta_{jt}^{\ 2} = \sum_n \left[\Gamma_n \, (\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1}) D_n \right]^2 \tag{13}$$

Denklem (13)'de doğrusal elastik tepki spektrumundan elde edilen modal spektral yerdeğiştirmeler D_n yerine doğrusal olmayan modal spektral yerdeğiştirmeler D_n^* yerleştirilirse yaklaşık olarak maksimum kat arası ötelenmeler elde edilebilir. Mod birleştirme yönteminde genellikle birinci modun katkısı diğer modlara oranla daha baskın olduğu için sadece birinci moda ait doğrusal olmayan modal spektral yerdeğiştirmenin (D_1^*) Denklem (13)'de kullanılması doğrusal olmayan kat arası ötelenme talebinin hesaplanmasında yeterli olabilir.

$$\Delta_{jt} = \left(\left[\Gamma_1 \, (\varphi_{1,j} - \varphi_{1,j-1}) D_1^* \right]^2 + \sum_{n=2}^{N} \left[\Gamma_n \, (\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1}) D_n \right]^2 \right)^{1/2} \tag{14}$$

4. GENEL İTME ANALİZİ ALGORİTMASI

Genel itme analizi algoritması aşağıda özetlenen beş adımdan oluşmaktadır.

1. Özdeğer analizi: Doğal titreşim frekansları ω_n (doğal titreşim peryodları T_n), mod vektörleri $\boldsymbol{\varphi}_n$ ve modal katılım faktörleri Γ_n özdeğer analizinden elde edilir. Betonarme sistemlerde çatlamış kesit özelliklerinin kullanılması ω_n ve T_n için daha gerçekçi sonuçlar verir.

2. Modal spektrum analizi (mod birleştirme yöntemi): Modal spektral genlikler A_n ve D_n ilgili doğrusal elastik tepki spektrumundan elde edilir. j katına ait modal kat arası ötelenmeler $\Delta_{j,n}$ ve maksimum kat arası ötelenmeler $\Delta_{j,max}$ modal spektrum analizi ve mod birleştirme yöntemi ile hesaplanır (Denklem 8).

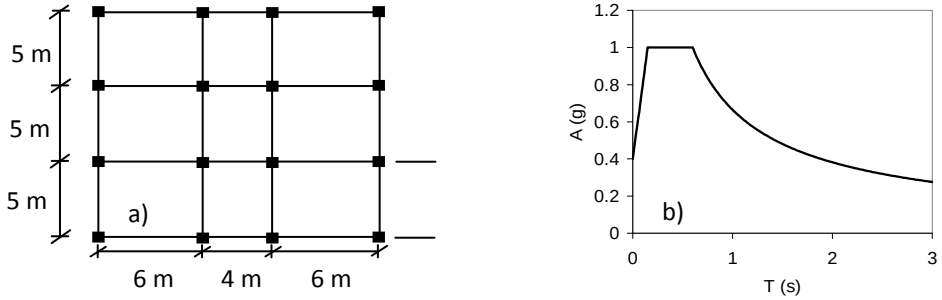
3. Genel yük vektörleri: j katına ait genel yük vektörü $\mathbf{f}_j$ Denklem (12) ile hesaplanır.

4. Kat arası ötelenme talebi: Maksimum kat arası ötelenme talebi Δ_{jt} Denklem (13) veya (14) kullanarak hesaplanır.

5. Genel itme analizi: Toplam olarak N kat için N itme analizi gerçekleştirilir. Tipik bir j katı için (j=*1-N*), yapı yük vektörü $\mathbf{f}_j$ ile adım adım kat arası ötelenme talebi hedefi olan Δ_{jt} değerine ulaşıncaya kadar itilir. İtme analizi yerdeğiştirme kontrolü ile yapılmalıdır. j katına ait tüm eleman şekildeğiştirme ve iç kuvvet değerleri $\mathbf{f}_j$ ile yapılan itme analizi sonucundan alınır.

5. UYGULAMA: 12 KATLI BETONARME SİMETRİK ÇERÇEVE

Genel itme analizi yöntemi 12 katlı ve simetrik plana sahip (Şekil 1) bir betonarme bina üzerinde denenmiştir. Bina 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği koşullarına uygun olarak ve yüksek süneklilik düzeyi kabul edilerek tasarlanmıştır. Tasarım spektrumu Şekil 1'de gösterilmektedir. Beton ve çelik karakteristik dayanımları sırasıyla 25 MPa ve 420 MPa olarak alınmıştır. Tüm katlarda döşeme kalınlığı 140 mm ve hareketli yük 3.5 kN/m^2 dir.İlk dört kat, ikinci dört kat ve üçüncü dört katta kiriş boyutları sırasıyla 300x550, 300x500 ve 300x450 mm^2 olarak seçilmiştir. Ayni katlarda kolon boyutları ise sırasıyla 500x500, 450x450 and 400x400 mm^2'dir. Giriş katı yüksekliği 4 m, diğer katların yüksekliği 3.2 m'dir.



Şekil 1. a) 12 katlı binanın tipik kat planı, b) deprem tasarım spektrumu

Analizler yatay (X) yönünde yapılmış ve analizlerde OpenSees yazılımı kullanılmıştır. Tüm çerçeveler modellenmiştir. Betonarme elemanların doğrusal olmayan modellemesinde ilk rijitlik olarak çatlamış kesit rijitlikleri alınmıştır. İlk üç moda ait titreşim peryodları 2.39, 0.82 ve 0.48 saniye hesaplanmıştır.

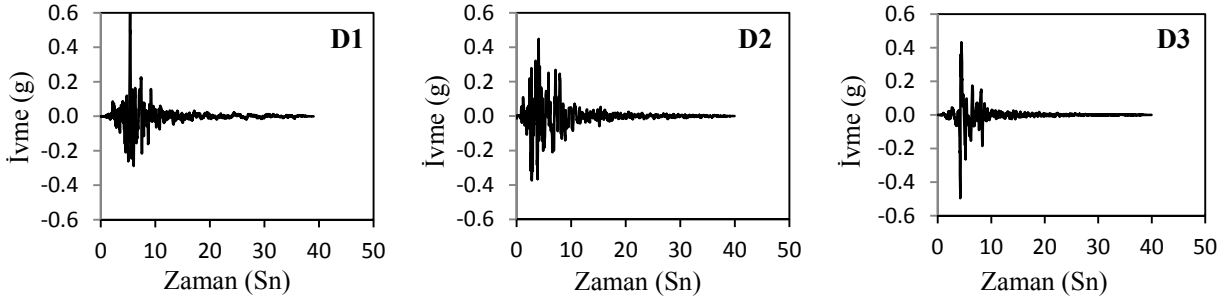
5.1. Kuvvetli Yer Hareketleri

Çerçeve anlizleri yedi farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak yedi yer hareketinin ivme spektrumlarının 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliği'nde tanımlanan tasarım spektrumuna (A_0 = 0.4, I = 1.0, Z3) uyumlu olması için, bu yer hareketlerinin ivme kayıtları RSPMatch2005 yazılımı kullanılarak, daha önceden seçilmiş benzer özelliklere sahip yedi kuvvetli yer hareketi kaydından türetilmiştir (Hancock ve diğ., 2006; Hancock ve Bommer, 2007). Bu yer hareketleri seçilirken sistemde yüksek mod etkileri oluşturabilme özellikleri dikkate alınmıştır. Tüm bu referans yer hareketleri dataları PEER kuvvetli yer hareketi veri tabanından alınmıştır. Referans yer hareketlerinin özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir.

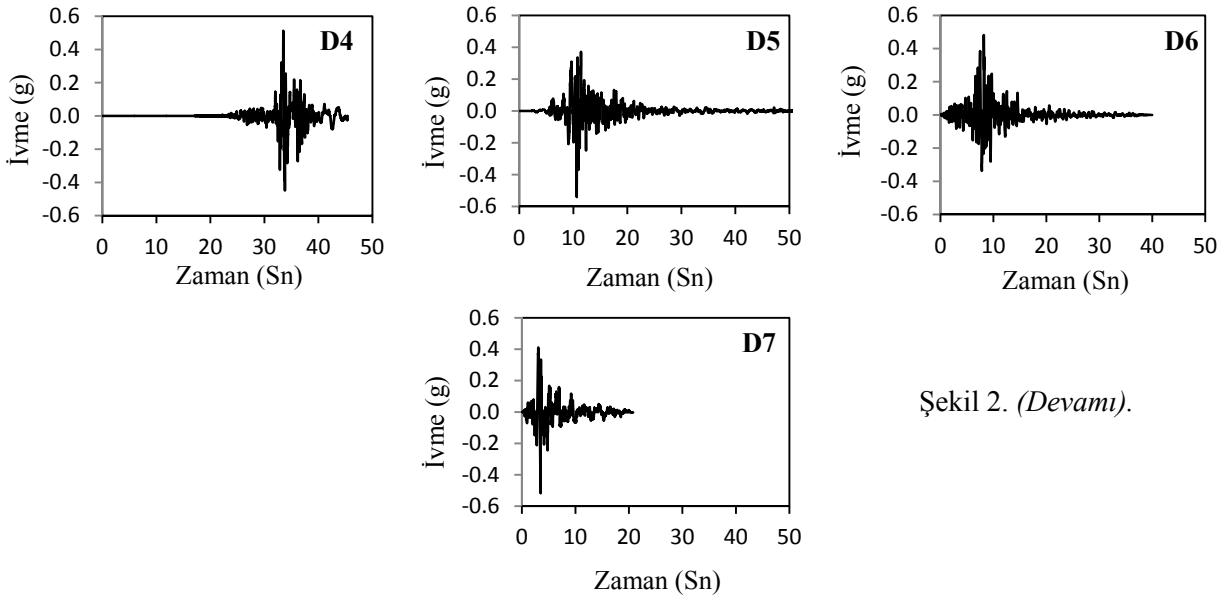
Tablo 1. Yer hareketlerinin özellikleri

#	Deprem Kodu	Deprem (Mw)	İstasyon-Komponent	CD (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
1	H-E04140	Imp. Valley, 10/15/79 (6.5)	El Centro Array #4-140	7,1	0,485	37,4	20,1
2	CLS090	Loma Prieta, 10/18/89 (7)	Corralitos-090	3,9	0,479	45,2	11,3
3	LEX000	Loma Prieta, 10/18/89 (7)	Los Gat. - Lex. Dam-000	5,0	0,420	73,5	20,0
4	CHY006-E	Chi-Chi, 09/20/99 (7.6)	CHY006-E	9,8	0,364	55,4	25,6
5	Bolu000	Duzce, 11/12/99 (7.1)	Bolu-000	12,0	0,728	56,4	23,1
6	ORR090	Northridge,1/17/94 (6.7)	Cast.-Old Rdg Route-090	20.7	0.568	51.8	9.0
7	ERZ-EW	Erzincan,03/13/92 (6.9)	Erzincan-EW	4,4	0,496	64,3	21,9

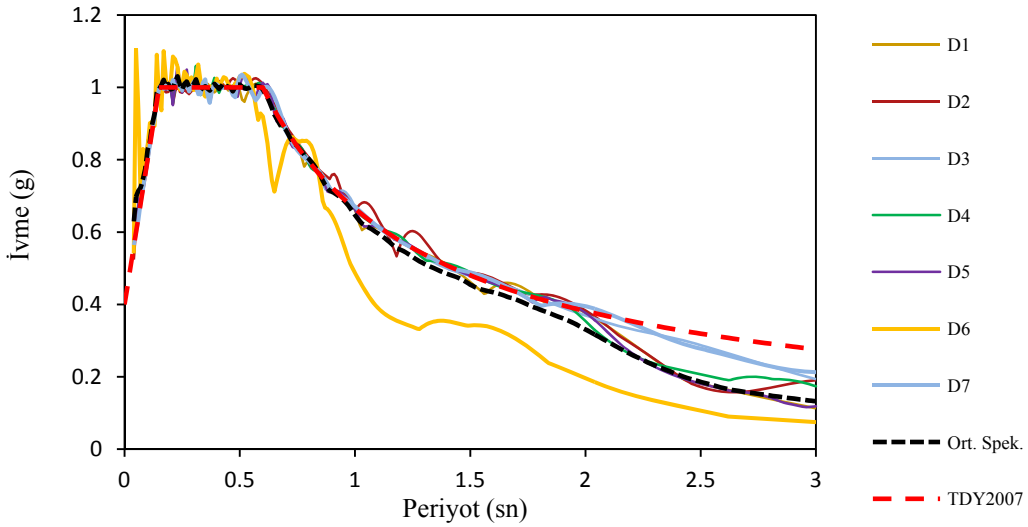
Analizlerde kullanılmış olan, Tablo 1'deki kuvvetli yer hareketlerinden türetilmiş bu yedi yer hareketinin ivme kayıtları Şekil 2'de, ivme spektrumları, ortalama ivme spektrumu ve TDY2007 Z3 tasarım spektrumu toplu olarak Şekil 3'de sunulmaktadır.



Şekil 2. Türetilen yedi yer hareketinin ivme kayıtları.



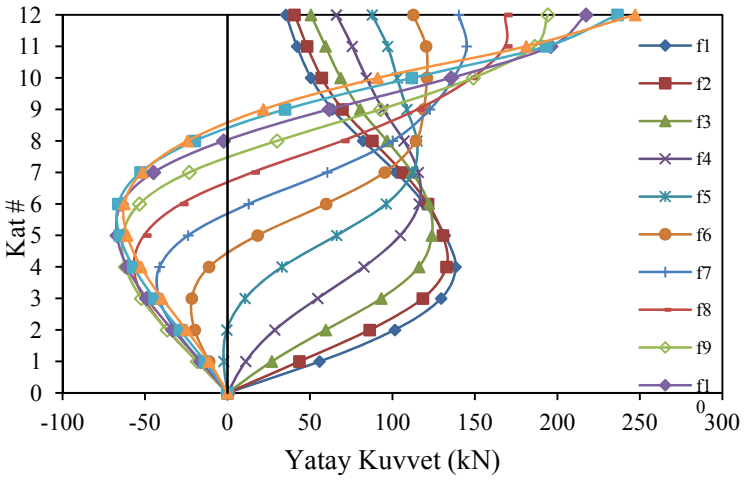
Şekil 2. *(Devamı).*



Şekil 3. Türetilen yedi kuvvetli yer hareketinin ivme spektrumları, ortalama spektrum ve TDY2007 Z3 tasarım spektrumu.

5.2. Genel Yük Vektörleri

Genel İtme Analizi algoritmasında, Denklem (12) kullanılarak üçüncü adımda elde edilen yük vektörlerinin ($\mathbf{f}_j$) katlara göre dağılımı D1 için Şekil 4'te gösterilmektedir. İkinci modun tüm katlarda en yüksek kat ötelenmesine karşılık gelen kuvvet dağılımlarına etkisi Şekil 4'de açık bir şekilde görülmektedir.



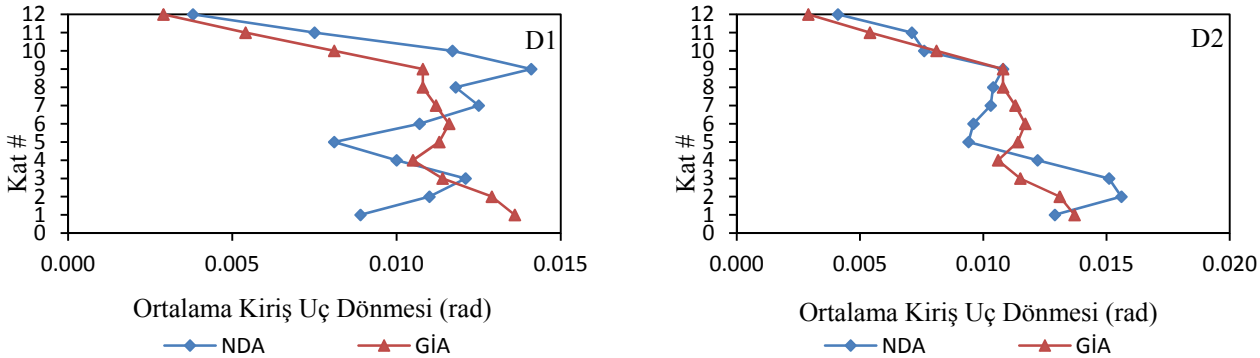
Şekil 4. 12 katlı çerçevenin D1 yer hareketi için genel itme kuvvetleri dağılımı.

6. ANALİZ SONUÇLARI

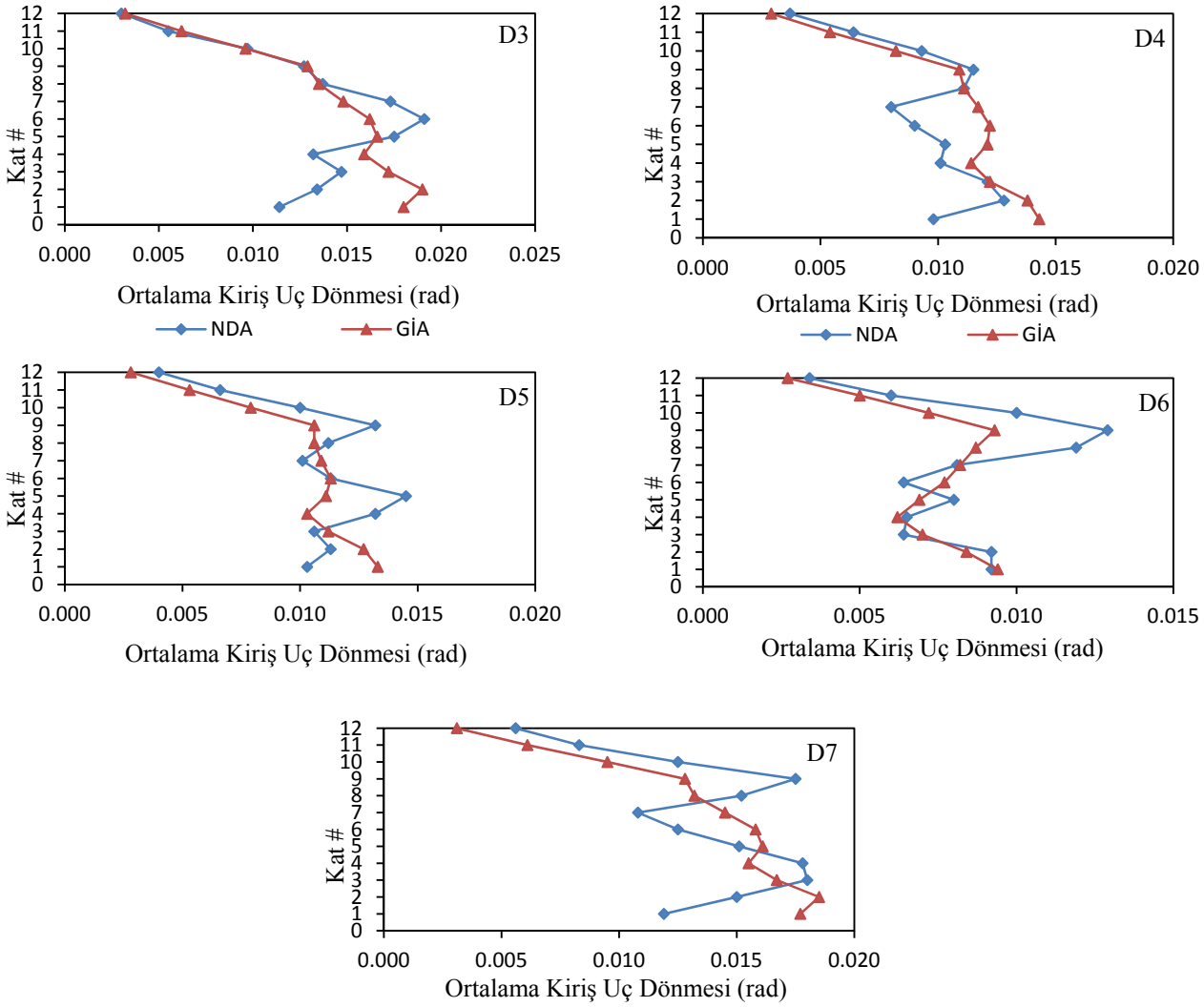
Analiz sonuçları iki ayrı bölümde verilecektir. Önce yedi adet yer hareketi altında elde edilen şekildeğiştirme ve iç kuvvet dağılımları ayrı ayrı sunulacaktır. Sonra tüm yer hareketleri altında elde edilen sonuçların istatistiksel ortalaması, ortalama spektrum altında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

6.1. Kuvvetli Yer Hareketleri Altında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırması

Çerçeve kirişlerinin uç dönmeleri, Nonlineer (Doğrusal Olmayan) Dinamik Analiz (NDA) ve Genel İtme Analizi (GİA) ile hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 5'de gösterilmektedir. Bu uç dönmeleri, her kattaki kirişlerin uçlarındaki en yüksek dönme değerlerinin ortalamaları alınarak elde edilmiştir. GİA, son beş katta NDA ile elde edilen sonuçlara yakın değerler vermektedir. GİA yönteminin yüksek mod etkilerinin etkin olduğu bu katlardaki perfomansı, GİA'nın bu etkileri dikkate aldığının önemli bir kanıtıdır.

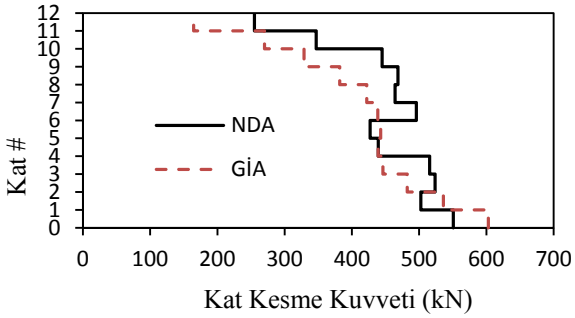


Şekil 5. Maksimum kiriş uç dönmelerinin her kattaki ortalamalarının yedi yer hareketi altındaki dağılımları



Şekil 5. (*Devamı*).

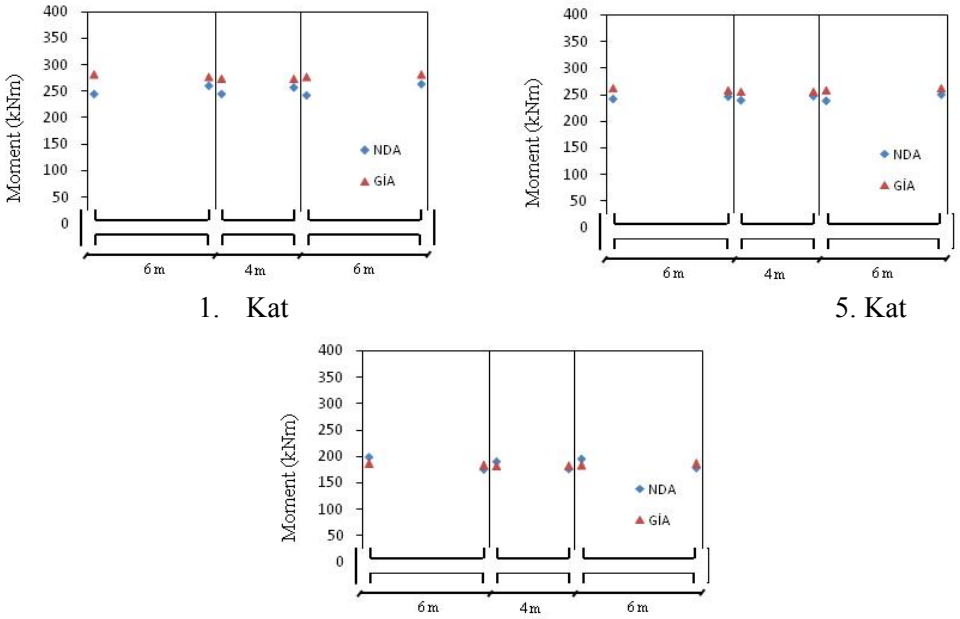
Türetilen yedi yer hareketi için sunulan kiriş uç dönmelerine ek olarak, D1 yer hareketi ile yapılan analizler sonucunda GİA yöntemi ile elde edilen kat kesme kuvvetleri, NDA ile hesaplanan sonuçlarla birlikte Şekil 6'da sunulmaktadır.



Şekil 6. D1 yer hareketi için kat kesme kuvveti dağılımları.

Alt ve orta katlardaki kat kesme kuvvetlerinde GİA ve NDA birbirine yakın değerler vermektedir. Üst katlara doğru çıkıldıkça GİA değerlerinde azalma görülmektedir.

GİA ve NDA yöntemleriyle elde edilen 1., 5. ve 10. katlardaki en yüksek kiriş uç moment değerleri Şekil 7'de sırasıyla gösterilmektedir. GİA ile NDA moment değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülebilmektedir. GİA'nın alt, orta ve üst katlardaki bu performansı, yöntemin eleman iç kuvvetlerindeki tahmin başarısını göstermektedir.



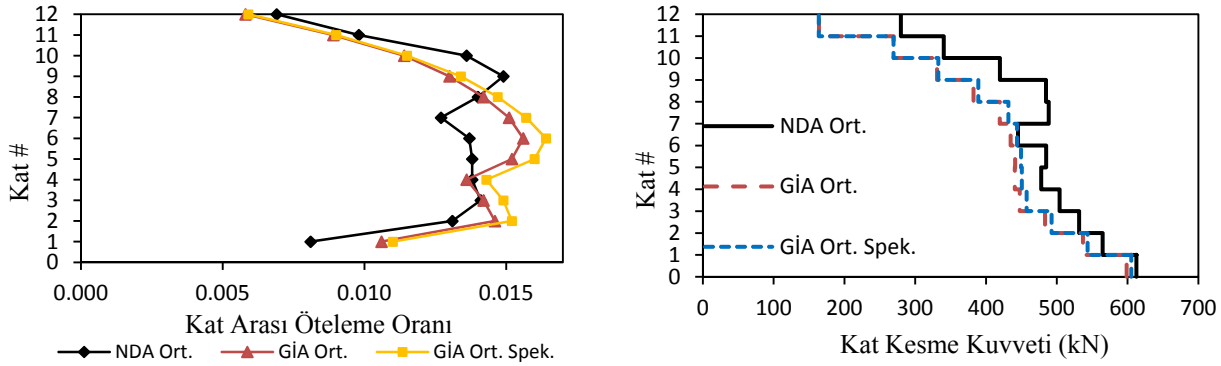
1. Kat 5. Kat

10. Kat

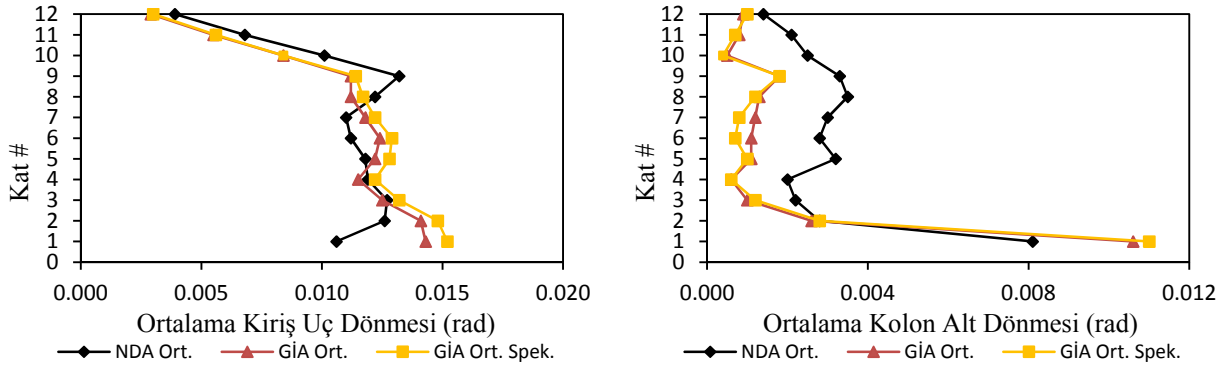
Şekil 7. D1 yer hareketi için 1., 5. ve 10. katlardaki kiriş uç momentleri.

6.2. Ortalama Deprem Spektrumu Altında Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırması

Kullanılan yedi adet yer kareketi için NDA ve GİA yöntemleri ile elde edilen sonuçlara ek olarak, bu yer hareketlerinin ivme spektrumlarının ortalaması ile oluşturulan ortalama ivme spektrumu kullanılarak Genel İtme Analizi yapılmıştır. Bu analizin sonucunda elde edilen kat arası öteleme, kat kesme kuvvetleri, kiriş uç dönmeleri ve kolon alt uç dönmeleri; yedi yer hareketi için yapılan iki farklı yöntemin sonuçlarının istatistiksel ortalamalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Şekil 8'de sunulmaktadır.



(a) (b)



(c) (d)

Şekil 8. (a) Kat öteleme oranları, (b) Kat kesme kuvvetleri, (c) Ortalama kiriş uç dönmeleri, (d) Ortalama kolon alt uç dönmeleri.

Kat arası ötelenme oranlarında (Şekil 8(a)), kat kesme kuvvetlerinde (Şekil 8(b)) ve ortalama kiriş uç dönmesi (Şekil 8(c)) değerlerinde, ortalama GİA sonuçları yüksek mod etkilerini başarılı bir şekilde göstermekte ve ortalama NDA sonuçlarıyla örtüşmektedir. Buna ek olarak, ortalama spektrum kullanılarak yapılan GİA da, ortalama GİA sonuçlarıyla hemen hemen aynı değerleri vermekte ve aynı başarıyı göstermektedir.

Her üç analiz sonucunda da kolon alt uç dönmelerinde (Şekil 8(d)) düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum kapasite tasarımının (kuvvetli kolon-zayıf kiriş) doğal sonucudur. Alt kat kolonlarının elastik dönme sınırının 0.0055 radyan olduğu göz önüne alındığında, meydana gelen plastik dönmeler çok küçük değerlerde kalmaktadır. Küçük değerlerin tahmininde hassasiyet elde etmek zordur, ancak yapılan hataların mertebesi de küçüktür.

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada anlatılan Genel İtme Analizi (GiA), genel yük vektörlerini esas almıştır. GİA'da, kat deplasmanı talebi yerine her bir kat için kat arası ötelenme talebi kullanılması, bölgesel kat tepkilerinin daha gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesine yardımcı olmaktadır. Yüksek mod etkilerini barındıran bu bölgesel tepkilerin gerçekçi bir şekilde elde edilmesi, GiA yönteminin bu etkileri hesaba kattığının bir göstergesidir. GiA'da Adaptiv yöntemlerdeki gibi özel bir programlamaya ihtiyaç duymamakla birlikte, N katlı bir yapı için N tane itme analizinin herhangi bir doğrusal olmayan itme analizi programıyla gerçekleştirilebilir olması yöntemin praktikliğini ortaya koymaktadır. GiA'daki sonuçlar herhangi bir istatistiksel birleştirme yöntemi kullanılmadan elde edilmektedir. Bu sayede, sonuçların bu tür birleştirme yöntemlerinin (SRSS, CQC) doğrusal olmayan davranışta yol açtığı hatalardan etkilenmemesi sağlanmaktadır.

Ortalama spektrum kullanılarak GiA ile elde edilen sonuçların, kullanılan yedi yer hareketin GiA sonuçlarının ortalamalarıyla yakınlık göstermesi, bu yöntemin farklı durumlardaki pratikliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada ortalama spektrum elde etmek için yedi yer hareketi kullanılmasının nedeni, bazı özel durumlarda en az yedi yer hareketi sonuçlarının ortalamasının (ASCE/SEI 7-05) kullanılması gerekliliğidir. Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında; kat ötelenme oranlarında, ortalama kiriş uç dönmelerinde ve kat kesme kuvvetlerinde ortalama spektrum ile yapılan GiA'nin başarılı bir şekilde NDA ve GİA ortalamalarını tahmin ettiği görülmektedir.

Kullanılan yer hareketlerinden D1, D5 ve D6 altında önceden yapılan Davranış Spektrumu Analizi ile Doğrusal Dinamik Analiz sonuçları arasında önemlice farklar gözlenmesi, modal birleştirmede SRSS'in bu yer hareketleri

için başarılı olmadığını göstermiştir. GİA genel yük vektörleri SRSS ilişkisinden türetildiğinden, GİA bu yer hareketleri altında NDA sonuçlarına göre alt katlarda yüksek veya üst katlarda düşük değerler vermektedir. Bu durum özelllikle katlardaki kiriş uç dönmelerinin ve kolon uç dönmelerinin karşılaştırılmasında net bir şekilde görülebilmektedir.

Deprem mühendisliğinde yer hareketlerinin tepki spektrumu ile ifade edilmesi geçmiş uygulamalarda pratik olarak çok kabul görmüş, neredeyse tüm deprem yönetmeliklerinde analiz yöntemleri bu kabul üzerine kurulmuştur. Doğrusal olmayan itme analizi yöntemleri doğrudan spektrum kullanarak doğrusal olmayan davranış hesabı yapabilmektedir. Bu yöntemler arasında GiA basitlik ve hassasiyeti dengeli biçimde birleştirebilmektedir. Basitlik GiA'nın adaptiv olmamasından, dolayısıyla herhangi bir statik itme analizi programı ile uygulanabilmesinden, hassasiyet ise çok daha karmaşık bir yöntem olan doğrusal olmayan dinamik analiz (NDA) ile oldukça yakın sonuçlar üretmesinden kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR

Antoniou, S. ve Pinho, R. (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of Earthquake Eng* **8** (5): 643-661.

Aydınoğlu, M.N. (2003). An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation. *Bull Earthquake Eng* **1** (1): 3-36.

Chopra, A.K. ve Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Eng Str Dynamics* **31** (3): 561-582.

Gupta, B. ve Kunnath, S.K. (2000). Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthquake Spectra* **16** (2): 367-391.

Sasaki, F., Freeman, S. ve Paret, T. (1998). Multi-mode pushover procedure (MMP). Proc. Sixth U.S. NCEE, Seattle, Washington.

Sucuoğlu H. ve Günay M. S. (2010). Generalized force vectors for multi-mode pushover analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2010; **10**(1002).

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (TDY), T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, 2007.

The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), Pacific Earthquake Engineering Research Center (1999,2000); component for the NEESit since 2004. Available from: http://opensees.berkeley.edu/.

Hancock ve diğ., (2006). An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering* **10** (1): 67-89.

Hancock, J. ve Bommer, J.J., (2007). Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **27**: 291-299.

PEER Strong Motin Database. Available from: http://peer.berkeley.edu/smcat [29 June 2010].

Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05), American Society of Civil Engineers, 2006, Bölüm 17.6.3.4 .