

## BNA YAPILARININ ÇOK MODLU İTME ANALİZİ ÇİN GENEL YÜK VEKTÖRLERİNİN PRATİK UYGULAMASI

F.S. Alıcı<sup>1</sup>, K. Kaatsız<sup>1</sup> ve H. Sucuoğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

<sup>2</sup> Profesör, İnşaat Müh. Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Email: fsalici@metu.edu.tr

### ÖZET:

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analize alternatif olarak doğrusal olmayan itme analizi ve çok modlu itme analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakın zamanda geliştirilmiş çok modlu itme analizlerinden biri olan genel itme analizi, doğrusal olmayan sismik davranışa katkısı olan tüm modları hesaba katarak yapı davranışını tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem, önceden belirlenen sismik taleplere erişilene kadar genel kuvvet vektörlerinin yapıya ayrı ayrı ve artımsal bir şekilde uygulanmasını kapsamaktadır. Modal kuvvetlerin kombinasyonu olarak belirlenen genel kuvvet vektörü; önceden belirlenmiş bir tepki parametresini yapının sismik davranışını sırasında en yüksek deşere ulaşan anlık kuvvet dağılımını temsil etmektedir. Çok modlu genel itme analizinde kat arası öteleme önceden belirlenmiş tepki parametresi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, genel itme analizinin yapının sismik tepkisine katkı yapan etkin modlarının sayısı ve bunların farklı kombinasyonları dikkate alınarak artımsal itme analizlerinin sayısının azaltılması pratik bir uygulama geliştirilmiştir. Söz konusu yöntem, 12 katlı bir çerçeve ve 20 katlı bir perde duvarlı çerçeve sistemlerine uygulanmış ve sonuçlar zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Genel itme analizinin pratik uygulaması, bir yer hareketi altında maksimum eleman deformasyonları ve eleman kuvvetlerinin tahmininde kapsamlı olarak uygulanan genel itme analizi ile aynı başarıyı göstermiş ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analiz ile yeterince tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, altı türetilmiş yer hareketi ile oluşturulan ortalama tepki spektrumu kullanılarak yapılan indirgenmiş genel itme analizi sonuçları, her bir deprem için elde edilmişingindenmiş itme analizi sonuçlarının ortalamalarıyla da karşılaştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Genel itme analizi, çok modlu itme analizi, yüksek mod, genel kuvvet vektörü, doğrusal olmayan tepki

### 1. GİRİŞ

Doğrusal olmayan statik analiz (artımsal itme analizi) esas olarak, bir yer hareketi altında birinci modun hâkim olduğu basit yapı sistemlerinin en yüksek tepki parametrelerini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Tek modlu itme analizinin kolaylığı ve kavram olarak basitliği nedeniyle yüksek modların etkin olduğu yapı sistemlerinde de kullanılmaktadır. Çok modlu itme analizi performans değerlendirilmesi ve tasarım için en yüksek tepki değerlerini tahmin eden zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizin yerini aldığından dolayı son dönemde deprem mühendisliği alanında geniş kabul görmektedir.

Çok modlu itme analizi doğrusal tepki spektrum analizinin doğrusal olmayan bir çeşidi olarak düşünülebilir. Çok modlu itme analizi adaptif ve adaptif olmayan olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. Adaptif yöntemlerde, modal kuvvet vektörü daha kesin sonuçlar alabilmek için her yükleme adımında yenilenerek uygulanır. Bu bağlamda, yapının öz deşere analizi sistemde olduğu doğrusal olmayan deformasyonların hesaba katılması için her yük artımında yapılmalıdır (Gupta ve Kunnath 2000, Aydinolu 2003, Antoniou ve Pinho 2004). Fakat bu

Yaklaşım da artımsal itme analizinin basitliğini ortadan kaldırmakta ve özel programlama veya hali hazırda kullanılan analiz programlarında modifikasyon gerektirmektedir. Bununla birlikte, adaptif yöntemlerin biraz daha basitletiren yarı adaptif yöntemler de geliştirilmiştir (Poursha vd. 2009, Jerez ve Mebarki 2011). Diğer taraftan, kavramsal basitlikten ve pratiklikten dolayı adaptif olmayan yöntemler daha fazla ilgi çekici olmuştur (Chopra ve Goel 2002, Sucuoğlu ve Günay 2011, Kreslin ve Fajfar 2012). Önerilen bu yöntem yer deprem itme kontrollü itme analizi yapabilen herhangi bir yazılım kullanılarak (SAP, OpenSees, Drain, vb.) uygulanabilir. Buna karşılık, sistemde doğrusal olmayan deformasyon dereceleriyle ilgisi bulunmayan yatay yük vektörlerinin kullanılması adaptif olmayan yöntemlerin en temel sorunudur.

Diğer yandan geliştirilen çok modlu itme analizi yöntemlerinin tümünde her moda ait depremler bağımsız olarak hesaplanmakta, sonra nihai sonuçlar istatistiksel birleştirme yöntemleri kullanılarak (SRSS veya CQC) elde edilmektedir. Doğrusal elastik yapıların modal spektrum analizi için geliştirilen istatistiksel birleştirme yöntemlerinin doğrusal olmayan modal analiz sonuçlarına uygulanması da önemli hatalara neden olmaktadır. Özellikle bu yolla elde edilen iç kuvvetler kapasitelerini aşmakta, her itme adımında iç kuvvetlerin kontrol edilerek düzeltilmesi gerekmektedir. Genel yük vektörleri (Sucuoğlu ve Günay 2011, Kaatsız ve Sucuoğlu 2014, Alıcı ve Sucuoğlu 2015) modal ölçekleme kuralı ile birleştirildikleri için modal birleştirmeden kaynaklanan eksiklikleri en aza indirmektedir.

Bu bildiride, yeni geliştirilen yöntem genel yük vektörleriyle yapılan çok modlu itme analizine (genel itme analizi) dayandığı için bu yönteme kısaca değinilecektir. Ayrıca yeni geliştirilen yöntemle (genel itme analizinin pratik uygulaması) on iki katlı bir çerçevenin itme analizleri altı farklı yer hareketi altında yapılmış, sonuçlar zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları karşılaştırılarak irdelenmiştir.

## 2. GENEL İTME ANALİZİ

Genel yük vektörleriyle yapılan çok modlu itme analizi (genel itme analizi) dinamik tepki sırasında  $j$ 'inci katın kat arası ötelenmesi  $\Delta_j$  maksimum depremlerde sisteme etki eden etkin yük vektörünü  $\mathbf{f}_j$  esas almaktadır. Her kata ait bu genel yük vektörü her modun farklı katkısından oluşmakta, ilgili katın kat arası ötelenmesi maksimum depremlerde yapıya etki eden yatay yük dağılımını temsil etmektedir. Eğer bu yük vektörü hesaplanabilirse, doğrusal elastik yapıya uygulanarak ve statik analiz yapılarak ilgili tepki parametresinin maksimum değeri elde edilir. Genel itme analizinde (GA) genel yük vektörleri tepki spektrumu yöntemi kullanılarak çok dereceli serbestliğe sahip doğrusal elastik sistemlerin deprem etkisi altındaki tepkilerinden elde edilir.

$$\mathbf{f}_j = \frac{\Gamma_n \mathbf{m} \boldsymbol{\varphi}_n A_n \Delta_{j,n}}{\bar{n} \Delta_{j,max}} \quad (1)$$

Burada  $\bar{n} = L_n / M_n$ ;  $L_n = \mathbf{1}^T \mathbf{m} \mathbf{l}$ ;  $M_n = \mathbf{1}^T \mathbf{m} \mathbf{1}$ ;  $\boldsymbol{\varphi}_n$   $n$ 'inci mod vektörü,  $\mathbf{m}$  kütle matrisi,  $\mathbf{l}$  yer hareketi etki vektörü,  $A_n(t_{max})$  ise  $n$ 'inci moda ait spektral ivmedir. Denklem (1)'deki  $\Delta_{j,n}$   $n$ 'inci modun tepki spektrumu yönteminden elde edilen  $j$ 'inci katın maksimum kat arası ötelenme talebine olan katkısını ifade etmektedir.  $\Delta_{j,max}$  ise spektral modal kat arası ötelenme terimlerinin  $\Delta_{j,n}$  ikinci dereceden kombinasyonudur.

$$(\Delta_{j,max})^2 \approx \frac{\Gamma_n D_n (\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1})^2}{\bar{n}} \quad (2)$$

$j$ 'inci kattaki hedef kat arası ötelenme talebi  $\Delta_{jt}$  genel yük vektörü ile tutarlı bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta_{jt} = \frac{\Gamma_n D_n \Delta_{j,n}}{\bar{n} \Delta_{j,max}} (\varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1}) \quad (3)$$

GA'de modal ölçeklemenin uygulanmasıyla:

$$D_n t_{max} = D_n \frac{\Delta_{j,n}}{\Delta_{j,max}} \quad (4)$$

Burada,  $D_n(t_{max})$  deprem etkisi altında sistemin  $n$ ' tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemini sağlayan modal yer deplasmanıdır.  $D_n$  ise  $n$ 'inci moda ait spektral yer deplasmanıdır.  $D_n(t_{max})$  Denklem (5)'i sağlar:

$$\ddot{D}_n t_{max} + 2\zeta_n \omega_n^2 \dot{D}_n t_{max} + \omega_n^2 D_n t_{max} = -\ddot{u}_g(t_{max}) \quad (5)$$

burada  $t_{max}$   $\Delta_j$ 'nin yer hareketi altında maksimum olduğu zamandır. Denklem (3)'ün tahmin ettiği sonuçları iyileştirmek için birinci mod için kullanılan doğrusal elastik spektral yer deplasmanı talebi  $D_1$  yerine elastik olmayan spektral yer deplasmanı talebi  $D_1^*$  kullanılabilir. Fakat bu seçim ilk mod için bir örnekleme analizinin yapılmasını gerektirir. Bu analiz yapıldıktan sonra da  $D_1^*$  birinci mod davranışını temsil eden tek dereceli sistemin zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analizi ile belirlenebilir.

G A'de daha düşük dereceli kat (çatı) yer deplasmanı yerine, yüksek dereceli kat arası ötelemler tepki parametresi olarak seçilmiştir. Buna göre, ilgili genel yük vektörü  $\mathbf{f}_j$  sistemi hedef kat arası öteleme talebine iterken  $\Delta_{jt}$ , elastik olmayan deformasyon aralığında sistem kendini uyarlar ve yüksek mod etkileri birinci ve ikinci derece yer deplasmanı parametreleri (dönmeler ve eylemler) ile ikinci ve üçüncü derece kuvvet parametreleri (momentler ve kesmeler) deplasmanlarına daha etkin katkı sağlar. Diğer taraftan, her kat (çatı) yer deplasmanı tepki parametresi olarak kullanılsaydı yüksek modların katkısını önemsiz hale getirirdi. Kat arası öteleme deplasmanları, bölgesel tepki parametreleri ile iyi senkronize olduğu için maksimum bölgesel tepkilerin belirlenmesinde en etkili hedef parametresidir.

G A'de her bir kat için toplam  $N$  tane örnekleme analizi sırayla yapılır.  $j$ 'inci kat G A'nde, sistem artımsal bir şekilde  $\mathbf{f}_j$  kuvvet vektörü ile itirilir. Bu yer deplasmanı kontrolü örnekleme analizi de  $j$ 'inci katın kat arası öteleme deplasmanına  $\Delta_j$  katın hesaplanan hedef öteleme deplasmanına ulaşana kadar  $\Delta_{jt}$  devam ettirilir. G A'nin 1'den  $N$ 'ye kadar tamamlanmasından sonra, eleman deformasyonları ve eleman iç kuvvetleri ilgili G A sonuçlarının zarf deplasmanları alınır. Alınan bu zarf deplasmanları maksimum sismik tepki deplasmanı olarak kaydedilir.

Bu bildiride genel örnekleme analizinin pratik uygulaması anlatılacaktır. Performans deplasmanını belirlemesi açısından on iki katlı çerçeve üzerindeki genel örnekleme analizinin pratik uygulamasının sonuçları zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

### 3. GENEL TME ANALİZ SAYISINDA AZALTMA: MAKSİMUM TEPKİ ZAMANLARI

G A genel olarak her kattaki ( $j=1-N$ ) kat arası ötelenmenin  $\Delta_j$  farklı anlarda  $t_{j,max}$ ,  $j=1-N$  olduğu varsayımına dayanmaktadır. Buna karşılık, toplam dinamik tepkiye önemli ölçüde katkı sağlayan  $n$  tane mod varsa ( $n < N$ ), bu  $n$  tane modun belli katların maksimum kat arası ötelenme tepkilerine katkı sağlayan olası  $2^{(n-1)}$  tane kombinasyonu vardır. Bunun sonucu olarak da  $N$  serbestlik derecesine sahip olan bir sistemde  $\mathbf{f}_j$  ve  $\Delta_{j,max}$  deplasmanlarını hesaplamak için  $2^{(n-1)}$  tane birbirinden bağımsız zamana  $t_{max}$  ihtiyaç vardır.

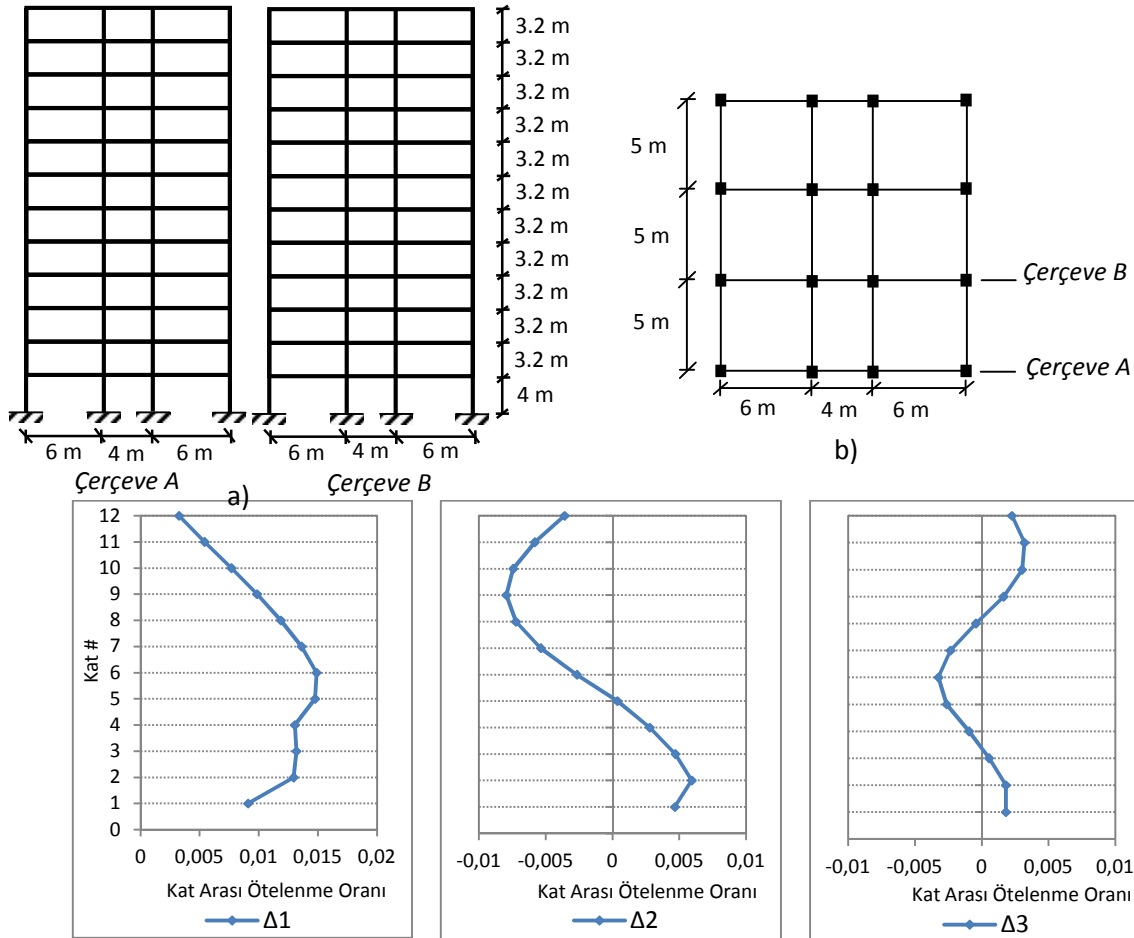
G A'daki azaltma kavramı bu bölümde özde çerçevelere sahip ve simetrik planlı 12-katlı betonarme binanın özellikleri üzerinden anlatılacaktır. Bu binanın ilk üç temel moduna ait periyot deplasmanları sırasıyla: 2.39, 0.82 ve 0.48 saniyedir. Ekil 1'de binanın yükseklik ve kat planı gösterilmektedir.

12 katlı betonarme çerçevenin 1999 Chi-Chi depreminin kuvvetli yer hareketi bileşeni olan CHY006-E altındaki ilk üç modunun elastik spektral kat arası öteleme profilleri Ekil 2'de gösterilmektedir.

Burada,

$$\Delta_{j,n} = \Gamma_n D_n \varphi_{n,j} - \varphi_{n,j-1} \quad (6)$$

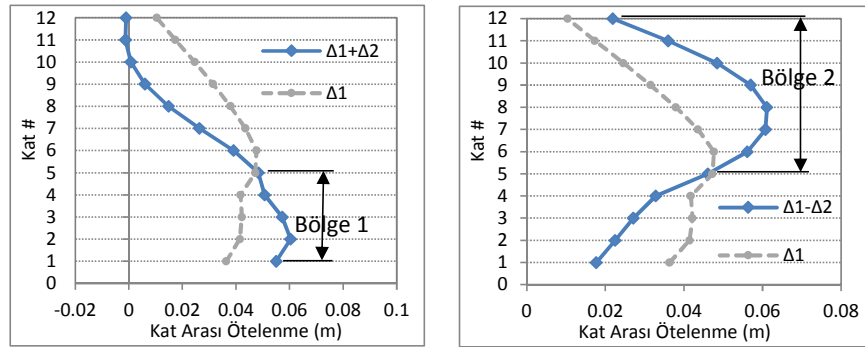
$\Delta_{j,n}$   $n$ ' inci modun  $j$ ' inci kattaki spektral kat arası ötelenmesini ifade etmektedir. Denklem (6)'daki  $D_n$  ise CHY006-E'nin dorusal elastik tepki spektrumdan elde edilen yer de i titre talebidir. Önceden de belirtildi üzere kat arası ötelenme talebine önemli ölçüde katkıda bulunan  $n$  tane modun olası  $2^{(n-1)}$  tane kombinasyonu vardır.  $n=2$  ve  $n=3$  için olası kombinasyonlar ekil 3 ve ekil 4' te gösterilmektedir. Bu kombinasyonlar modal kat arası ötelemelerinin mutlak maksimum kombinasyonlarından oluşmaktadır. Asıl sismik tepki sırasında kat arası ötelenme da ılımları aynı anda oluşmayacaktır. Fakat bu durum bu bölümde ortaya konulan yaklaşımı etkilemeyecektir.



ekil 1. 12 katlı binanın yükseklik (a) ve kat (b) planı

ekil 2. CHY006-E altında ilk üç modun kat arası ötelenme profilleri

ekil 3'e göre  $1+2$  ve  $1-2$  kombinasyonları sistemi iki farklı bölgeye ayırmakta olduğu görülmektedir. Bu bölümlerden ilki 1'inci ve 5'inci katlar arasında, diğeri ise 6'ncı ve 12'nci katlar arasındadır.

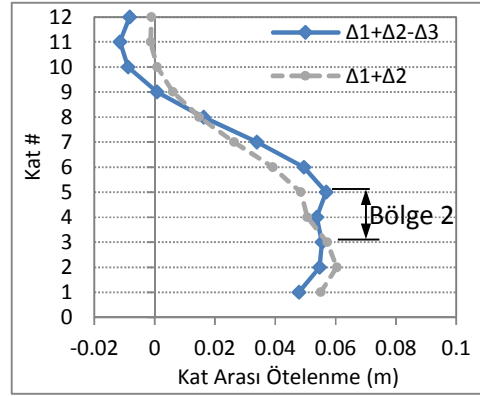
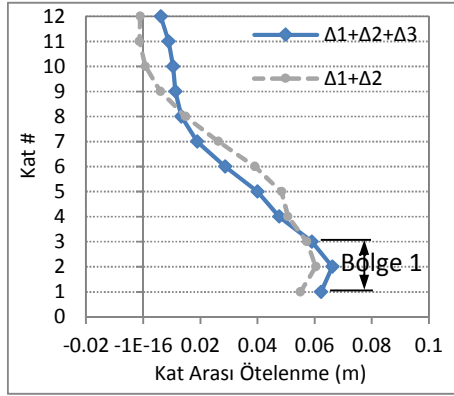


ekil 3. Kat arası ötelenmeye katkıda bulunan ilk iki modun kombinasyonu

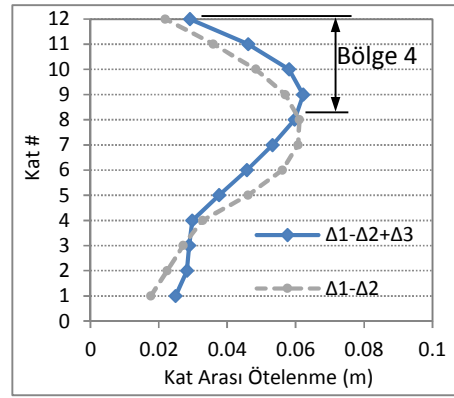
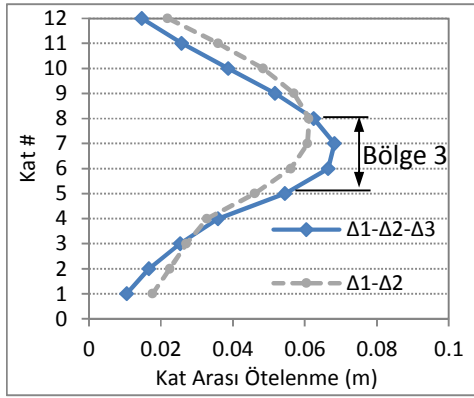
ekil 4'te ilk üç modun farklı kombinasyonları sistemi dört farklı bölgede kontrol ettiği görülmektedir. Bu dört bölgenin sıralaması şu şekilde yapılabilir:  $1-2+3$  kombinasyonu 9-12,  $1+2+3$  kombinasyonu 1-3,  $1+2-3$  4-5 ve  $1-2-3$  6-8 katlar arasındaki maksimum kat arası ötelenmeleri kontrol etmektedir.

Bu durum zaman boyutunda elastik dinamik analizinden (ZBEDA) elde edilen sonuçlarda da görülmektedir.

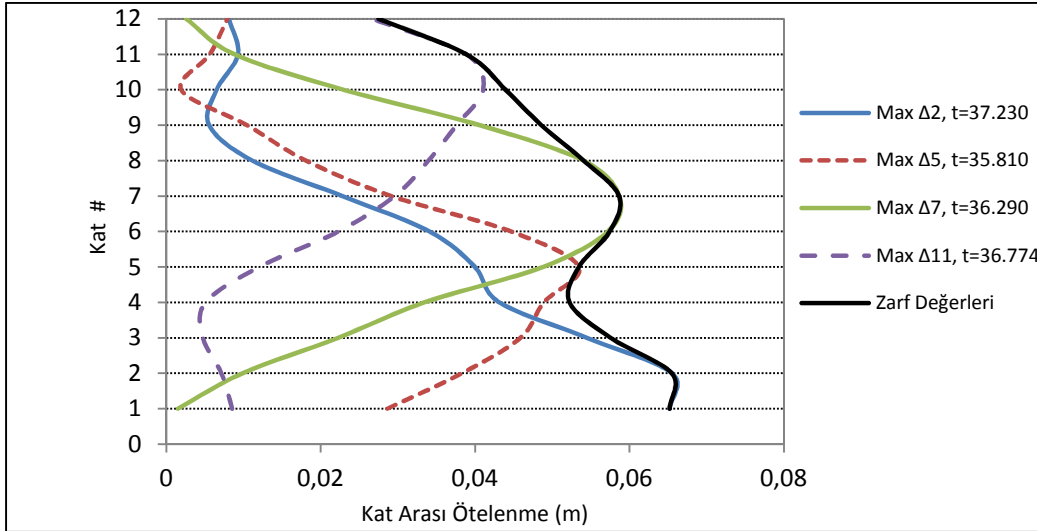
ekil 5'te çizilen kat arası ötelenmelere ait grafik ilk üç modun ilgili dört kombinasyonları için CHY006-E altında sistemin dorusal elastik tepkisi sırasında her bir kat aralığının en yüksek ötelenme değerine ulaştığı zaman ki görünümünü göstermektedir. Buna bağlı olarak da kontrol katları 2., 5., 7. ve 11. katlar sırasıyla birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü kat aralıkları için seçilmiştir. ZBEDA'dan elde edilen en yüksek kat arası ötelenmelerinin zarf değerleri ekil 5'te aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. ekil 5'te dört farklı zamanda oluşan maksimum kat arası ötelenme profillerinin ekil 4'teki profillerle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu kararla tırmanı yapmaktaki amaç sayısı azaltılmış yük vektörleri ile yapılan itme analizlerinin sistemin bir yer hareketi altında maksimum dinamik tepkilerini yakalama da yeterli olabildiğini göstermektedir. Buna göre, ilk kat bölgesinde 2. kat en yüksek ötelenme değerine ulaştığı anda 1. ve 3. katlarda senkronize bir şekilde maksimum değerlerine ulaşacaklardır. Bu durum diğer üç kat bölgesi için de geçerlidir. 9. kattaki hata bu katın iki kat bölgesinin içine de dahil olmasından kaynaklanmaktadır.



ekil 4. Kat arası ötelenmeye katkıda bulunan ilk üç modun kombinasyonu



ekil 4. (Devamı)



ekil 5. Dört kat bölgesindeki maksimum ötelenmeler ile ZBEDA 'dan elde edilen ötelenmelerin zarf değerlerinin karşılaştırılması

Buna göre, her bir kat bölgesinden bir kat seviyesi seçilebilir ve bu katın kuvvet vektörü kullanılarak GA gerçeğe tirilebilir. Bu sayede  $N$  tane kuvvet vektörü kullanılarak yapılan itme analizlerinin önemli ölçüde azaltılması olacaktır. 12 katlı çerçevede ilk üç modun kombinasyonları düşünüldüğünde kat bölgeleri için 2., 5., 7. ve 11. katlar seçilip GA dört genel yük vektörü  $f_2$ ,  $f_5$ ,  $f_7$  ve  $f_{11}$  kullanılarak yapılır. Bu dört itme analizinin sonuçlarının zarf de erleri kullanılarak en yüksek tepki parametreleri hesaplanır. 12 itme analizi yerine 4 itme analizi yapılması GA'nin pratikliği için önemli ölçüde arttırmaktadır.

#### 4. UYGULAMA: 12 KATLI BETORNAME ÇERÇEVE

Azaltılmış genel itme analizi, kapasite tasarım prensibine göre tasarlanmıştır ve yüksek süneklik düzeyine detaylandırılmış 12 katlı çerçeveye uygulanmıştır. Geliştirilen yöntem altı kuvvetli yer hareketi kullanılarak yapıya uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

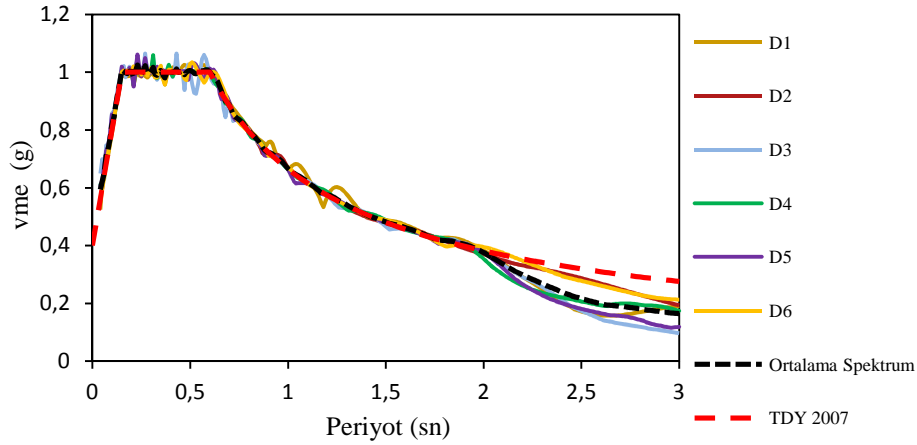
Altı yer hareketi altında elde edilen kat arası ötelenmelerin, kiriş uçlarındaki ortalama plastik dönmelerin, kolon uçlarındaki ortalama toplam dönmelerin, kiriş uçlarındaki kesme ve moment de erlerinin ve kolon uçlarındaki kesme ve moment de erlerinin en yüksek de erleri karşılaştırılmalı bir biçimde sunulacaktır. Katlardaki ortalama plastik ve toplam dönmeler ilgili kattaki elemanların uçlarındaki dönme de erlerinin her bir yükleme adımında ortalamaları alınır ve bu ortalama de erlerin maksimumları da ilgili kattaki en yüksek de er olarak kullanılır. Zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz (NDA), GA, ve indirgenmiş genel itme analizi (GA) sonuçları altı farklı yer hareketi için karşılaştırılmalı olarak sunulacaktır. Denklem (3) kullanılarak hesaplanan hedef kat arası ötelenme talebinde maksimum doğrusal olmayan yer de i tirme talebi büyüklüğü  $D_1^*$  kullanılmıştır.

##### 4.1. Kullanılan Yer Hareketleri

Analizler altı farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılacak altı yer hareketinin ivme spektrumlarının 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliğinde 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 altı kuvvetli yer hareketi kaydından türetilmiştir (Hancock ve diğeri, 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. Türetilen yer hareketlerinin ivme spektrumları, ortalama ivme spektrumu ve TDY2007 Z3 tasarım spektrumu Şekil 6'da sunulmaktadır.

Tablo 1. Yer hareketlerinin özellikleri

#	GM Kodu	Deprem (Mw)	stasyon - Komponent	CD (km)	Zemin Sınıfı	PGA (g)		PGV (cm/s)		PGD (cm)	
						Ref.	Türetilen	Ref.	Türetilen	Ref.	Türetilen
1	CLS090	Loma Prieta, 1989 (7)	Corralitos-090	3,9	A	0,479	0,449	45,2	53,2	11,3	20,3
2	LEX000	Loma Prieta, 1989 (7)	Lex. Dam-000	5,0	A	0,420	0,496	73,5	66,2	20,0	24,9
3	PCD254	San Fer., 1971 (6.6)	Pac. Dam-254	2,8	B	1,160	0,567	54,1	48,1	11,8	17,0
4	CHY006-E	Chi-Chi, 1999 (7.6)	CHY006-E	9,8	B	0,364	0,513	55,4	59,9	25,6	20,0
5	Bolu000	Duzce, 1999 (7.1)	Bolu-000	12,0	D	0,728	0,541	56,4	55,9	23,1	18,7
6	ERZ-EW	Erzincan, 1992 (6.9)	Erzincan-EW	4,4	D	0,496	0,518	64,3	64,3	21,9	23,4

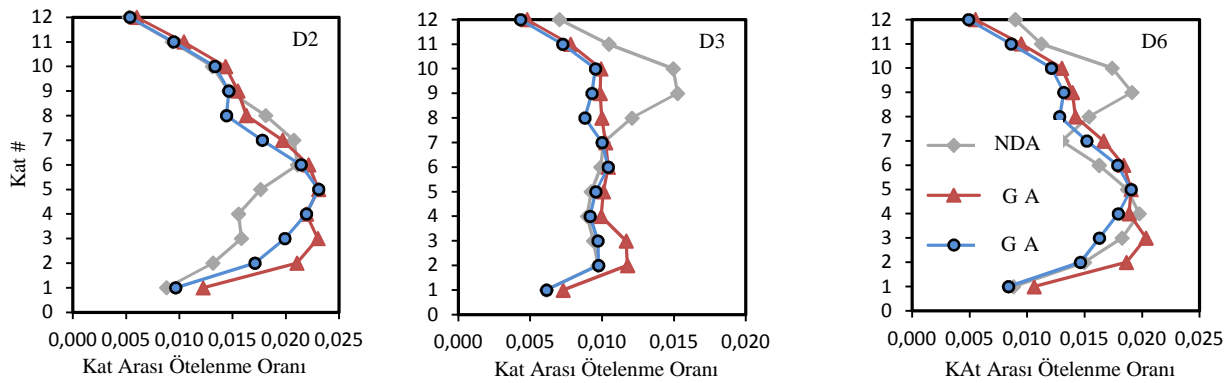


ekil 6. Türetilen altı kuvvetli yer hareketinin ivme spektrumları, ortalama spektrum ve TDY2007 Z3 tasarım spektrumu.

#### 4.2. Analiz Sonuçları

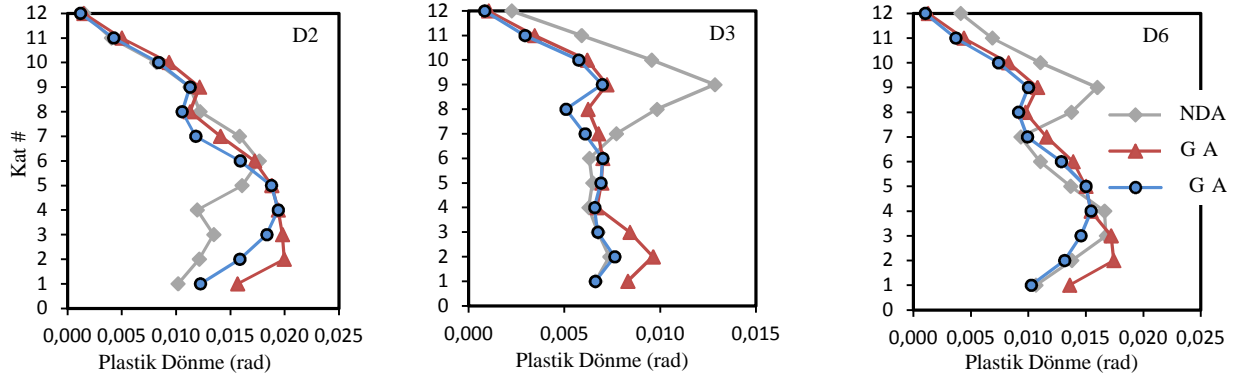
Binanın yükseklik planı ve kat planı ekil 1’ de gösterilmiştir. Beton ve çelik karakteristik dayanımları sırasıyla 25 MPa ve 420 MPa olarak alınmıştır. Tüm katlarda döşeme kalınlığı 140 mm ve hareketli yük  $3.5 \text{ kN/m}^2$  dir. İlk dört kat, ikinci dört kat ve üçüncü dört katta kiriş boyutları sırasıyla  $300 \times 550$ ,  $300 \times 500$  ve  $300 \times 450 \text{ mm}^2$  olarak seçilmiştir. Aynı katlarda kolon boyutları ise sırasıyla  $500 \times 500$ ,  $450 \times 450$  ve  $400 \times 400 \text{ mm}^2$ ’dir. Giriş katı yüksekliği 4 m, diğer katların yüksekliği 3.2 m’dir. Analizler yatay (X) yönünde yapılmıştır ve analizlerde OpenSees yazılımı kullanılmıştır. Tüm çerçeveler modellenmiştir. Betonarme elemanların dorusal olmayan modellenmesinde ilk rijitlik olarak çatlamış kesit rijitlikleri alınmıştır. İlk üç moda ait titreşim periyotları 2.39, 0.82 ve 0.48 saniye hesaplanmıştır.

NDA, GA ve GA’ dan elde edilen maksimum kat arası ötelenmeleri ve ortalama kiriş uç dönmeleri D2, D3 ve D6 yer hareketleri için sırasıyla ekil 7 ve ekil 8’ gösterilmektedir. GA, zaten NDA ile elde edilen değerlere yakın olan GA ile elde edilenlere yakın sonuçlar vermektedir.



ekil 7. D2, D3 ve D6 yer hareketleri için maksimum kat arası ötelenmelerin karşılaştırılması

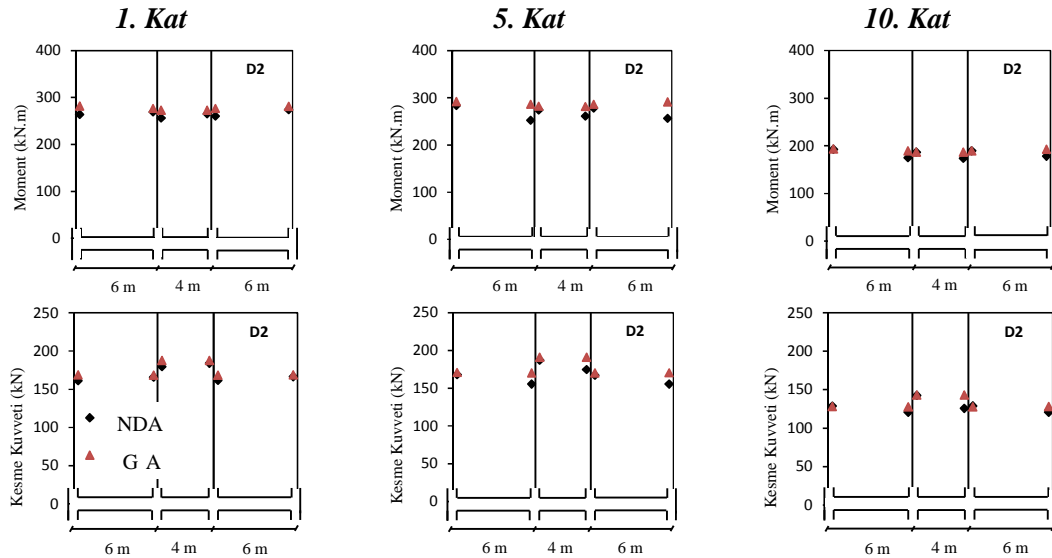




ekil 8. D2, D3 ve D6 yer hareketleri için maksimum ortalama plastik kiri uç dönmelerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada GA'nın pratik bir uygulaması geliştirildiğinden dolayı bundan sonra sunulacak sonuçlarda sadece NDA ve GA'dan elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. D2 yer hareketi için 1., 5. ve 10. katlarda elde edilen moment ve kesme kuvveti değerleri ekil 9'da gösterilmektedir. GA sonuçları NDA hemen hemen örtmektedir. Tablo 2'de ise birinci kattaki maksimum ortalama kolon uç dönmeleri gösterilmektedir. NDA ve GA'nın birbirine yakın değerler verdiğini görülmektedir. Bunlara ek olarak, altı üretilmiş yer hareketi ile oluşturulan ortalama tepki spektrumu kullanılarak yapılan indirgenmiş genel itme analizi ile elde edilen maksimum kat arası ötelenmeleri ve ortalama kiri uç dönmeleri, her bir deprem için elde edilmiş indirgenmiş itme analizi sonuçları ortalamalarıyla karşılaştırılması ekil 10'da gösterilmektedir. Ortalama spektrum ile elde edilen sonuçların her bir deprem için elde edilmiş indirgenmiş itme analizi sonuçları ortalamalarıyla çok yakın ve aynı kesinlikte sonuçlar verdiğini görülmektedir.

Azaltılmış genel itme analizi, kapasite tasarım prensibine göre tasarlanmıştır ve yüksek süneklik düzeyine detaylandırılmış 20 katlı bir perde duvarlı çerçeve sistemine de üretilmiş altı kuvvetli yer hareketi kullanılarak uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar zaman boyutunda doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yer kısıtlaması nedeniyle bu analiz sonuçları gösterilememiştir. Bu uygulamada da GA ile elde edilen sonuçların NDA ile elde edilen değerlerle çok yakın sonuçlar verdiğini gözlemlenmiştir.

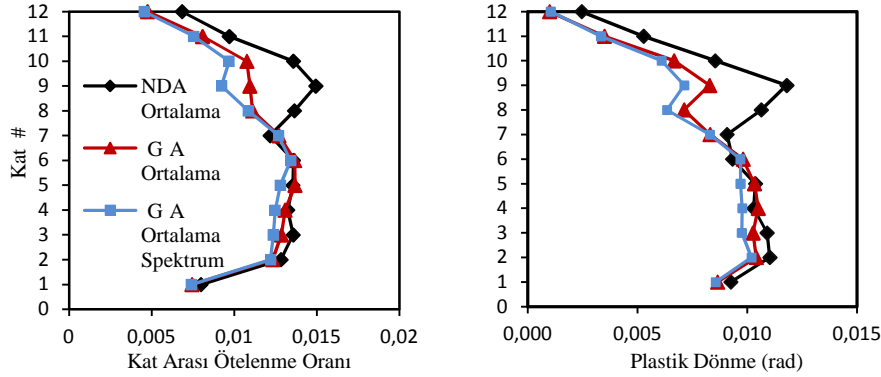


ekil 9. D2 yer hareketi için maksimum kiri uçlarındaki maksimum moment ve kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Tablo 2. Birinci kat kolon alt uçlarının maksimum ortalama uç dönmesi

Analiz Tipi	Birinci kat kolon alt uçlarındaki maksimum ortalama uç dönmesi (rad)					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
NRHA	0.0066	0.0058	0.0040	0.0050	0.0053	0.0061
RGPA	0.0050	0.0069	0.0040	0.0050	0.0049	0.0059

Akma dönmesi = 0.0049 rad.



ekil 10. Ortalama spektrum ile elde edilen kat arası ötelenme oranları ve ortalama kiriş uç dönemlerinin her bir deprem için elde edilmiş ingindenmitme analizi sonuçlarının ortalamalarıyla karşılaştırılması

## 5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada anlatılan GA'nın pratik uygulamasında itme analizlerinin sayısı  $N+1$  taneden  $2^{(n-1)} + 1$  taneye indirgenmektedir. Buradaki  $n$  toplam tepkiye katkı sağlayan önemli modların sayısını,  $l$  ise de modal olmayan ilk mod yer de i tirme parametresinin belirlenmesinde için yapılan itme analizini ifade etmektedir. Örnekteki gibi e er  $n=3$  ise toplam  $4+1=5$  tane itme analizi yapmamız gerekmektedir. E er ilk modun yer de i tirme parametresi elastik spektrumdan elde edilirse  $n=3$  için toplam 4 tane itme analizi yapmamız gerekecektir. Genel itme analizinin pratik uygulamasında itme analizlerinin önemli ölçüde azaltılması zaman boyutunda de modal olmayan dinamik analize göre daha basit bir de modal olmayan analiz yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. GA'da olduğu gibi GA'da iç deformasyon ve iç kuvvetler tahmininde NDA'ya yakın sonuçlar vermektedir. GA'nın en temel sınırlaması sistemin dinamik tepkisi sırasında oluşan bölgesel plastik deformasyonların birikiminin sistemin mod etkilerini önemli ölçüde de i tirmesinden kaynaklanmaktadır. Adaptif olmayan GA'nın bu de iimleri hesaba katamayacağından dolayı zaman boyutunda de modal olmayan dinamik analizden elde edilen sonuçlarla arasındaki fark artabilir.

## KAYNAKLAR

- Alıcı, F. S. ve Sucuo lu, H. (2015). Practical Implementation of Generalized Force Vectors for the Multimodal Pushover Analysis of Building Structures. *Earthquake Spectra* **31:2**, 1043-1067.
- Antoniou, S. ve Pinho, R. (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of Earthquake Engineering* **8:5**, 643-661.
- Aydino lu, 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 Engineering and Structural Dynamics* **31:3**, 561-582.

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

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

Hancock ve diğeri, (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* **27:4**, 291-299.

Kaatsız, K. ve Sucuoğlu, H. (2014). Generalized Force Vectors for Multi-mode Pushover Analysis of Torsionally Coupled Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **43:13**, 2015-2033.

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

Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2014, <http://opensees.berkeley.edu/>.

PEER Kuvvetli Hareket Veritabanı, <http://peer.berkeley.edu/smcat> [29 June 2010].

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; **40:1**, 55-74.