

BURULMALI S STEMLER Ç N GENEL YÜK VEKTÖRLER LE ÇOK MODLU TME ANALİZ

K. Kaatsız¹, F.S. Alıcı¹ ve H. Sucuo lu²

¹ Ara tırma Görevlisi, n aat Müh. Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara

² Profesör, n aat Müh. Bölümü, Orta Do u Teknik Üniversitesi, Ankara

Email: kaatsiz@metu.edu.tr

ÖZET:

Asimetrik planlı sistemlerin deprem yer hareketleri altında do rusal olmayan sismik taleplerini tahmin edebilmek için genelle tirilmi çok modlu itme analizi yöntemi geli tirilmi tir. Önceki çalı malarda iki boyutlu düzlemsel çerçeveler üzerinde tanımlanan genel itme analizi, bu çalı mada üç boyutlu burulmalı sistemleri de kapsayacak ekilde geni letilmi tir. Deprem hareketleri esnasında, bir kattaki kat arası öteleme miktarının en yüksek de erine ula tı ı anda yapının üzerine etki eden kuvvet da ılımı genel yük vektörü olarak tanımlanmaktadır. Daha sonra, bu yük vektörü modal kuvvetlerin kombinasyonları eklinde ifade edilmektedir. Genel yük vektörlerine modal katkılar, çalı mada tanımlanan modal ölçeklendirme kuralı kullanılarak hesaplanmaktadır. Do rusal olmayan statik analiz sırasında genel yük vektörleri her katın kütle merkezine artımsal olarak etki ettirilip, yapının yatay kuvvete tepkisi elde edilmektedir. Prosedürün en sonunda, yapının her çerçevesinin hedef kat arası öteleme oranı için elde edilen en yüksek sismik talep de erleri derlenmektedir. Geli tirilen bu yöntem 8 katlı burulmalı bir yapı üzerinde test edilmi tir. Sunulan yöntemin performansı elde edilen sonuçların zaman tanım alanında do rusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile kar ıla tırılması ile de erlendirilmi tir. Kat arası öteleme ve plastik dönme gibi yapının deprem hareketine tepkisi ile ilgili sonuç parametreleri sunulmu tur. Yöntem, üç boyutlu burulmalı sistemlerin do rusal olmayan sismik davranı nı tahmin etme konusunda ba arılı bulunmu tur.

ANAHTAR KEL MELER: çok modlu itme analizi, burulmalı sistemler, genel yük vektörleri, do rusal olmayan davranı

1. G R

Burulmalı sistemlerin elastik olmayan dinamik tepkisini tahmin etmek deprem mühendisli inin en zorlu problemlerinden biri olmu tur. Geçmi te asimetrik yapılarla ilgili yapılan çalı malar Rutenberg (1998) tarafından detaylı bir biçimde incelenmi tir. Rutenberg (1998) bu çalı maları burulmalı sistemlerin davranı nı anlamak bakımından bir ba lanğıç olarak de erlendirmi tir. Tek katlı asimetrik yapıların elastik olmayan sismik tepkisi Stathopoulos ve Anagnostopoulos (2003) tarafından çalı ılmı tir. Bu çalı mada referans sistemlere kıyasla yapının esnek ucunda süneklik taleplerinde artma gözlemlenirken rijit ucunda azalma belirlenmi tir. Burulma dengesi olmayan ve düzensiz betonarme binalar Kosmopoulos ve Fardis'in (2006) çalı masının konusu olmu tur. Bu çalı mada burulmalı betonarme binaların analizi, de erlendirmesi ve güçlendirilmesi için bir prosedür önerilmi tir.

Burulmalı sistemlere artımsal itme analizi Kilar ve Fajfar'ın (1997) çalı masında uygulanmı tir. Buna ek olarak Moghadam ve Tso (1998) yüksek titre im modlarının ve burulmanın etkilerinin dâhil edildi i bir analiz yöntemi sunmu tur. Çok modlu artımsal itme analizlerinin burulmalı sistemlere uygulanması görece yeni ve sayılı ara tırma içeren bir konudur. Chopra ve Goel (2002) çok modlu itme analizi prosedürünü (MPA) asimetrik planlı yapılara geni letmi tir. Bu yöntemde modal kuvvet vektörleri yatay kuvvetleri ve kat torklarını içermektedir. Yapının sismik tepkisi, modal itme analizleri tamamladıktan sonra elde edilen tepkilerin tam

karesel birleştirme yöntemi ile bir araya getirilmesi ile elde edilir. Fajfar v.d. (2005), tek modlu artımsal itme analizi olan N2 yöntemini (Fajfar, 2000) temel alan bir metodu asimetrik planlı yapılara önermektedir. Daha sonra Kreslin ve Fajfar (2012) N2 yöntemine kat planı ve yükseklik boyunca asimetrik yapılarda uygulanması için birleştirme sunmuşlardır. Yazarlara göre, genelleştirilmiş N2 Yöntemi yüksek mod etkilerinin tahmininde daha güvenli tarafta kalmaktadır.

Burulmalı sistemler üzerine geçmiş çalışmalar incelendiğinde, bu tip yapıların sismik tepkilerinin tahmini konusunun daha pek çok gelişmeye açık olduğu görülmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz işlemi gücü gereksinimi ve sonuç işlemi zorluğu bakımından dezavantajlı konumdadır. Bu sebeple basit ve güvenilir sonuç veren elastik olmayan analiz yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

2. BURULMALI SİSTEMLERİN GENEL YÜK VEKTÖRLERİ

Sismik tepki sırasında çeşitli parametrelerin en yüksek değerlerine farklı zamanlarda eriştikleri bilinmektedir. Belirli bir tepki parametresi t_{max} anında en yüksek değere eriştiğinde, sisteme etki eden bir etkin kuvvet vektörü bulunmaktadır. Daha önce literatürde tanımlanan (Sucuoğlu ve Günay – 2011, Kaatsız ve Sucuoğlu – 2014, Alıcı ve Sucuoğlu – 2015) bu etkin kuvvet vektörü her modun katkısını barındırmaktadır; dolayısıyla genel yük vektörü olarak isimlendirilmektedir. Genel yük vektörünü bir tepki parametresi için t_{max} anında tanımlanıp yapıya etki ettirildiğinde, bu tepki parametresinin en yüksek değere eriştiği bir yatay yükleme analizi altında elde edilebilir. Elastik olmayan sistemlerde genel yük vektörü artımsal bir şekilde uygulanır ve bu artımsal itme analizi belirlenen hedef tepki parametresine ulaşıncaya kadar devam ettirilir. Bu çalışmada kat arası öteleme hedef tepki parametresi olarak seçilmiştir. Bu seçim, kat arası ötelemenin yapının sismik performansını herhangi bir hasar durumunda iyi bir şekilde yansıtabilmesi sebebiyle yapılmıştır.

Doğrusal elastik çok dereceli sistemler için genel yük vektörleri modal birleştirme prensibinin uygulanması ile elde edilmektedir. Sistem, yer hareketi $\ddot{u}_g(t)$ etkisi altındayken herhangi bir tepki parametresinin t_{max} anında oluşan en yüksek değeri elde edilebilir. Bu anda sisteme etki eden kuvvet vektörü her modun katkısının birleştirilmesi ile oluşturulur:

$$f(t_{max}) = \sum_n f_n(t_{max}) \quad (1)$$

n 'inci mod için t_{max} anındaki etkin kuvvet vektörü Denklem (2)'de verilmiştir.

$$f_n(t_{max}) = m_n A_n(t_{max}) \quad (2)$$

Denklem (2)'deki parametreler aşağıda tanımlanmıştır.

$$A_n = L_n / M_n \quad L_n = \mathbf{m}^T \mathbf{l} \quad M_n = \mathbf{m}^T \mathbf{m} \quad (3)$$

Denklem (3)'de A_n n 'inci mod vektörü, \mathbf{m} kütle matrisi ve \mathbf{l} etki vektörüdür. Denklem (2)'deki $A_n(t_{max})$ parametresi t_{max} anındaki modal yer deplasmanı (D_n) kullanılarak yeniden yazılabilir.

$$A_n(t_{max}) = D_n(t_{max}) \quad (4)$$

Denklem (4)'teki D_n parametresi, n 'inci modun serbest titreşim frekansını belirtmektedir. (D_n) ise sönümlenmeye sahip bir sistemin t_{max} anındaki hareket denklemini sağlayan modal yer deplasmanıdır.

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

Eğer t_{max} anı bilinmiyorsa $D_n(t_{max})$ değerini Denklem (5)'ten direkt olarak hesaplayabilmek mümkün değildir. Bu çalışmada önerilen prosedürde t_{max} anı j katının kat arası ötelemesinin (δ_j) en yüksek değere ulaştığı an olarak tanımlanmıştır.

$$t_{j,max} = t_j(\delta_j) \quad (6)$$

Denklem (6)'deki $f_j(t_{max})$ parametresinin modal açılımı Denklem (7)'de verilmiştir:

$$D_n(t_{max}) = \sum_n D_n(t_{max}) \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right) \quad (7)$$

Denklem (7)'de $D_n(t_{max})$, n 'inci mod vektörünün j elemanını temsil etmektedir. Etilerinin her iki tarafının $D_n(t_{max})$ ile bölünmesi, aynı denklemin normalize edilmiş halini vermektedir.

$$1 = \sum_n \frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right) \quad (8)$$

Denklem (8)'in sağ tarafı, t_{max} anında j katının en yüksek kat arası ötelemesine n modunun normalize edilmiş katkısını göstermektedir.

$D_n(t_{max})$ parametresinin Denklem (6)'daki karışık modal elastik mod birleştirme yöntemi (RSA) uygulanarak hesaplanabilir. Bunun için bir modal kombinasyon metodundan faydalanılması gerekmektedir. Tam karesel birleştirme yöntemi yakın modal frekans değerlerine sahip olan bağımsız modlara sahip sistemler için uygun olan en iyi kombinasyon metodu olarak görülmektedir. Bu sebeple, $D_n(t_{max})$ parametresi spektral tepkilerin kombinasyonu şeklinde Denklem (9)'daki gibi ifade edilmis tir:

$$D_n(t_{max})^2 \approx \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^n [D_i(t_{max}) \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \right)] [D_n(t_{max}) \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right)] \quad (9)$$

Bu denklemde $D_i(t_{max})$ çapraz korelasyon katsayısını belirtmektedir. i ve n indeksleri 1'den toplam mod sayısı N 'e kadar olan titreşim modlarını, $D_n(t_{max})$ ise n 'inci (i 'nci) mod spektral yer değerlerini göstermektedir. Denklem (9), etillerinin her iki tarafını $D_n(t_{max})^2$ ile bölerek normalize edilebilir.

$$1 = \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^n \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \right) \right) \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right) \right) \quad (10)$$

Denklem (10)'da belirli bir katta mod birleştirme yöntemi ile elde edilen en yüksek kat öteleme değerine her bir modun normalize edilmiş katkısı gösterilmektedir. Denklem (6)'da verilen etilik göz önünde bulundurularak Denklem (8) ve Denklem (10) bir etilik halinde aşağıdaki gibi yazılmış tir:

$$\sum_n \frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right) = \sum_{i=1}^n \sum_{n=1}^n \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \right) \right) \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right) \right) \quad (11)$$

Denklem (6)'daki etilik Denklem (11)'in her iki tarafındaki payda terimlerine uygulanması ve benzer terimlerin sadeleştirilmesi ile bu etilik daha basitleştirilmiş bir şekilde ifade edilebilir.

$$D_n(t_{max}) = \sum_{i=1}^n \frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} [D_i(t_{max}) \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \right)] \quad (12)$$

Denklem (12)'de köşeli parantez içinde yazılan terim j katındaki en yüksek kat arası ötelemeye i modunun mod birleştirme yöntemi tarafından hesaplanan katkısını göstermektedir ($D_i(t_{max})$). Denklem (13) $D_n(t_{max})$ parametresi için daha da basitleştirilmiş bir tanım sunmaktadır.

$$D_n(t_{max}) = D_n \left(\frac{\sum_{i=1}^n D_i(t_{max}) \left(\frac{D_i(t_{max})}{D_i(t_{max})} \right)}{D_n(t_{max}) \left(\frac{D_n(t_{max})}{D_n(t_{max})} \right)} \right) \quad (13)$$

Yukarıdaki denklemde $D_n(t_{max})$ değeri mod birleştirme yöntemi kullanılarak t_{max} parametresinden bağımsız bir şekilde ifade edilmiştir. n modunun t_{max} anındaki modal yer değeri tirmenin büyüklüğü, bu modun spektral yer değeri tirmesinin bir faktörle çarpılması sonucu elde edilmiştir. Bu sebeple, denklemde verilen etilik modal ölçeklendirme kuralı olarak isimlendirilmiştir. Denklem (13)'ün her iki tarafını $D_n(t_{max})^2$ ile çarparak $A_n(t_{max})$ değeri de çok benzer bir şekilde hesaplanabilir. Denklem (14)'te A_n , n 'inci modun pseudo-spektral ivme değerini ifade etmektedir.

$$A_n(t_{max}) = A_n \left(\frac{\sum_{i=1}^{j,i} a_{n,i}}{a_{n,j,max}} \right) \quad (14)$$

$A_n(t_{max})$ parametresinin de modal ölçeklendirme kuralı kullanılarak spektral ivme değerleri cinsinden yazılması sayesinde, Denklem (1) a) a) daki şekilde yeniden yazılabilir:

$$f(t_{max}) = \sum_n \left(\Gamma_n m \left\{ A_n \frac{\sum_{i=1}^{j,i} a_{n,i}}{a_{n,j,max}} \right\} \right) \quad (15)$$

Daha önceden de belirtildiği gibi, bu çalışmadaki formülasyon j katının kat arası ötelemesi parametresine dayanmaktadır. Bunun sonucu olarak, Denklem (15)'te verilen $f(t_{max})$ değeri j katındaki kat arası öteleme en yüksek değeri ulaştığında oluşan genel yük vektörünü vermektedir. Bu sebeple, ilerideki kısımlarda genel yük vektörleri $f(t_{max})$ yerine f_j şeklinde gösterilmektedir. Denklem (15)'teki terimlerin yeniden gruplanması genellikle yük vektörünün son halini vermektedir:

$$f_j = \sum_n \left(\Gamma_n m \left\{ A_n \right\} \left[\frac{a_{n,j}}{a_{n,j,max}} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \left(\frac{a_{n,i}}{a_{n,j,max}} \right) \right] \right) \quad (16)$$

2. BURULMALI S STEMLER HEDEF KAT ARASI ÖTELEME TALEBİ

Denklem (7)'de t_{max} anında j katında oluşan en yüksek kat arası öteleme talebi ($a_j(t_{max})$), $D_n(t_{max})$ cinsinden verilmiştir. Denklem (13)'te verilen modal ölçeklendirme kuralından faydalanılarak, $a_j(t_{max})$ spektral yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilebilir.

$$a_j(t_{max}) = \sum_n \left(\Gamma_n \left(\frac{a_{n,j} - a_{n,j-1}}{a_{n,j,max}} \right) D_n \left(\frac{\sum_{i=1}^{j,i} a_{n,i}}{a_{n,j,max}} \right) \right) \quad (17)$$

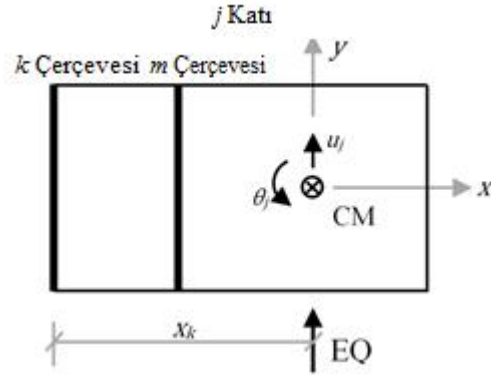
Denklem (17)'de verilen j katının hedef kat arası ötelemesi, genellikle yük vektörü f_j 'nin etki ettiği nokta için tanımlanmıştır. Bu nokta, üç boyutlu bir yapı için her katın kütle diyafram merkezleridir.

Yapı dinamiği teorisine göre, sismik etki sırasında kat boyunca kaydedilen deformasyon ve kuvvetlerin en yüksek değerleri asimetrik planlı yapılarda titreşim modlarının güçlü bağlantısını ve burulma etkileri sebebiyle farklı zamanlarda oluşur. Başka bir deyişle, dinamik tepki sırasında bir katta birden fazla t_{max} anı gözlemlenir. Bu gereksinim de kütle diyafram merkezinde ölçülen hedef kat arası ötelemesi yerine çerçevelerin kat arası öteleme değerlerini inceleme ihtiyacını doğurmuştur. Şekil 1'de verilen kat planında yer hareketi (EQ) yönündeki (y aksı) k çerçevesinin kat arası ötelemesinin; kat kütle merkezinin (CM) yerdeğiştirmesine ve kat kütle merkezi ile arasında bulunan mesafe (x_k) ile j katının modal vektörlerinin yatay hareket (u_j) ve dönme (θ_j) komponentlerine bağlı olduğu bilinmektedir. Bu bağlantı göz önünde bulundurularak, Denklem (7) k çerçevesi için yeniden yazılmıştır:

$$a_j^k(t_{max}) = \sum_n \left(\Gamma_n D_n^k(t_{max}) \left[\left(\frac{a_{n,j} - a_{n,j-1}}{a_{n,j,max}} \right) + x_k \left(\frac{a_{n,j} - a_{n,j-1}}{a_{n,j,max}} \right) \right] \right) \quad (18)$$

$a_j^k(t_{max})$ j katında k çerçevesinin kat arası ötelemesinin elde edilen en yüksek değeridir. $D_n^k(t_{max})$ ise a_j^k en yüksek değeri ulaştığında t_{max} anında Denklem (5)'i sağlayan modal yerdeğiştirmenin büyüklüğüdür. Kütle diyafram merkezi için türetilen formülasyona benzer şekilde Denklem (18) $a_j^k(t_{max})$ değeriyle normalize edilmiştir.

$$1 = \sum_n \frac{D_n^k(t_{max})}{j(t_{max})} \left[\left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] \quad (19)$$



ekil 1. k çerçevesinin j katı kütle merkezine göre pozisyonu

ekil 1'deki k çerçevesi için mod birle tirme yöntemi ile elde edilmiş kat arası öteleme ($\frac{k}{j,max}$) açık bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\left(\frac{k}{j,max} \right)^2 = \sum_{i=1} \sum_{n=1} \left[\frac{D_i}{i} \left(u_{iy,j} - u_{iy,j-1} \right) + x_k \left(u_{ix,j} - u_{ix,j-1} \right) \right] \left[\frac{D_n}{n} \left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] \quad (20)$$

Yine benzer bir şekilde, Denklem (20) ($\frac{k}{j,max}$)² de eri ile normalize edilmiş ve Denklem (21) yazılmıştır.

$$1 = \sum_{i=1} \sum_{n=1} \left[\frac{D_i}{i} \left(u_{iy,j} - u_{iy,j-1} \right) + x_k \left(u_{ix,j} - u_{ix,j-1} \right) \right] \left[\frac{D_n}{n} \left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] \quad (21)$$

Denklem (19) ve Denklem (21) birbirleriyle eşitlenip Denklem (22) üretilmiştir.

$$\sum_n \frac{D_n^k(t_{max})}{j(t_{max})} \left[\left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] = \sum_{i=1} \sum_{n=1} \left[\frac{D_i}{i} \left(u_{iy,j} - u_{iy,j-1} \right) + x_k \left(u_{ix,j} - u_{ix,j-1} \right) \right] \left[\frac{D_n}{n} \left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] \quad (22)$$

Kütle diyagram merkezleri için Denklem (6)'da ifade edilen eşitlik k çerçevesi için yapılan bu formülasyonda da geçerlidir. Bu eşitlik göz önünde bulundurularak Denklem (22)'nin her iki tarafındaki benzer terimler silindiğinde k çerçevesi için $D_n^k(t_{max})$ parametresinin spektral de erler tarafından ifadesi elde edilebilmektedir.

$$D_n^k(t_{max}) = D_n \left(\frac{\sum_{i=1}^k \frac{in}{j,i}}{k} \right) \quad (23)$$

Denklem (18)'teki $\frac{k}{j}(t_{max})$ parametresi, Denklem (23)'te k çerçevesi için verilen modal ölçeklendirme kuralından faydalanılarak spektral de erler cinsinden aşağıdaki gibi yeniden yazılmıştır.

$$\frac{k}{j}(t_{max}) = \sum_n \left[\left(u_{ny,j} - u_{ny,j-1} \right) + x_k \left(u_{nx,j} - u_{nx,j-1} \right) \right] D_n \left(\frac{\sum_{i=1}^k \frac{in}{j,i}}{k} \right) \quad (24)$$

Denklem (24) j katında k çerçevesinin hedef kat arası öteleme oranını vermektedir. Bu sebeple j^k ekinde isimlendirilmi tir ve açık halde Denklem (25)'te ifade edilmi tir.

$$j^k = \sum_n D_n \left[\left(\frac{y_{n,j} - y_{n,j-1}}{y_{n,j} - y_{n,j-1}} \right) + x_k \left(\frac{y_{n,j} - y_{n,j-1}}{y_{n,j} - y_{n,j-1}} \right) \right] \left[\frac{\frac{k}{j,n}}{k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \left(\frac{\frac{k}{j,i}}{k} \right) \right] \quad (25)$$

Yukarıda türetilen bu formülasyon iki yönlü asimetrik sistemler için geçerlidir. Denklem (25)'te verilen hedef kat arası öteleme y aksında bulunan çerçeveler içindir. Denklemlerdeki y indisleri x ile, pozisyon parametresi x_k ise y_k ile de i tirildi inde, sunulan denklemler x yönü için de geçerli olmaktadır.

3. BURULMALI S STEMLER Ç N GENEL TME ANAL Z

Burulmalı sistemler için genel itme analizi (GPA) yöntemi, diyafram kütle merkezlerine Denklem (16)'ya göre hesaplanan GPA kuvvet vektörlerinin uygulanması ve her çerçevenin Denklem (25)'e göre hesaplanan hedef kat arası ötelemesine eri mesinin izlenmesi ekinde geli tirilmi tir. Bu ekinde bir yöntem izlenmesinin sebebi, önceden de belirtildi i gibi asimetrik sistemlerde kat boyunca ula ılan en yüksek tepki de erlerinin farklı zamanlarda olu masıdır. Her kat için tek bir artımsal itme analizi uygulanarak gerçekte en hedef kat arası ötelemelerin bu analiz sonuçları içinde izlenmesi, basitlik ve i lem gücü gereksinimi bakımından her çerçeve için ayrı ayrı analiz yapılmasına durumuna avantajlı durumdadır. A a ıda verilen algoritma GPA yöntemini özetlemektedir.

1. Özde er analizi: Yapının dinamik özellikleri, serbest titre im periyotları ve mod ekilleri belirlenir.
2. Do rusal elastik mod birle tirme analizi: Her mod için spektral ivme ve yer de i tirme talepleri hesaplanır. Daha sonra kütle merkezinin modal ve en yüksek kat arası öteleme talepleri ile (Denklem 9), k çerçevesinin modal ve en yüksek kat arası öteleme talepleri (Denklem 20) belirlenir.
3. GPA kuvvet vektörlerinin hesaplanması: Denklem (16) kullanılarak GPA kuvvet vektörleri kat torklarını da içerecek ekinde hesaplanır
4. Hedef kat arası öteleme taleplerinin bulunması: Çerçevelerin hedef kat arası öteleme talepleri Denklem (25) kullanılarak bulunur.
5. Do rusal olmayan analiz: GPA kuvvet vektörleri, dördüncü adımda kat kütle merkezi için hesaplanan hedef kat arası öteleme de erleri a ılana kadar artımsal olarak uygulanır. Daha sonra, analizden elde edilen her k çerçevenin kat arası öteleme sonuç kaydında j^k de eri taranır. j^k de erini veren analiz adımından k çerçevesinin j katındaki eleman deformasyonları ve iç kuvvetleri derlenir. Do rusal olmayan statik analiz her kat için tekrar edilir ($j = 1 - N$).
6. Yapısal tepkinin tayin edilmesi: Her GPA kuvvet vektörü ile yapılan do rusal olmayan statik analizden her çerçevedeki bütün elemanların iç kuvvetleri ve deformasyon de erleri belirlenir. Daha sonra, tüm yapının genel sismik tepkisi her kuvvet vektörü için derlenen sonuçların bir zarf kombinasyonu ile bir araya getirilmesi ile tayin edilir. Ba ka bir deyi le, yapılan statik analizlerden elde edilen sonuçların her yapısal eleman için en büyük de erleri derlenir. Elde edilen sonuçlar, nihai sismik tepki olarak belirlenir. Bir sonraki bölümde GPA yönteminin performansı sekiz katlı bir burulmalı sistem üzerinde sınanmaktadır.

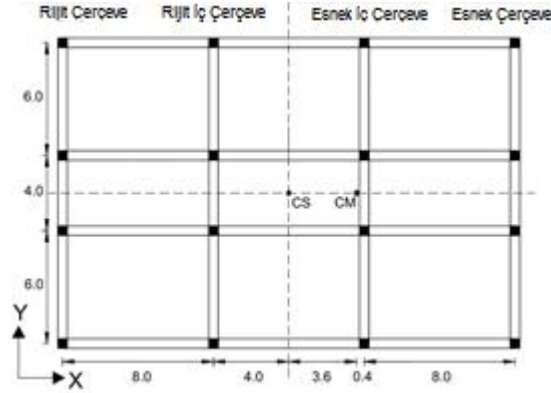
4. SEK Z KATLI ÇERÇEVE S STEM

Sekiz katlı moment çerçeve sisteminin genel kat planı ekinde 2'de verilmi tir. Bina, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'e (2007) göre tasarlanmı tir. Kapasite tasarımı uygulanmı olup, yüksek süneklik hedeflenmi tir. Yönetmelik'te tanımlanan Z3 tip zeminde ve birinci derece deprem bölgesinde oldu u var sayılmı tir. Binanın depreme dayanıklı tasarımı bu varsayımlara göre yapılmı tir. Detaylandırmada C25 sınıfı beton ve S420 sınıfı donatı çeli i kullanılmı tir. Bütün kiri ler 30x55 cm ve bütün kolonlar 50x50 cm olarak boyutlandırılmı tir. İlk katın yüksekli i 3.5 metre iken di er katlar 3 metre yüksekli indedir. Binada

asimetrik davranış, kütle merkezini (CM) rijitlik merkezinden (CS) toplam plan uzunluğunun %15'i kadar sağa doğru kaydırarak sağlanmıştır. Böylece, y yönünde asimetrik davranış elde edilmiştir.

Bina, OpenSees (2014) platformunda modellenmiş ve analiz edilmiştir. Doğrusal elastik mod birleştirme yöntemini uygulamak için doğrusal elastik bir model, doğrusal olmayan dinamik analiz (NDA), GPA ve klasik artımsal itme analizi (PO) için doğrusal olmayan elemanlar ile bir model oluşturulmuştur. Bu modelde, uç bölgelere toplanmış plastisite özelliğine sahip elemanlar kullanılmıştır. Doğrusal olmayan davranış, kiriş elemanlarının uç bölgelerinde moment-rotasyon ilişkileri tanımlanarak, kolon elemanlarının uç bölgelerinde ise fiber kesitler kullanılarak sağlanmıştır. Kolonların deprem eksenel yük altında daha isabetli bir tepki vermesi bu sayede mümkün kılınmıştır.

Yapının ilk dört basıntılı titreşim moduna tekabül eden periyot değerleri 1.62, 1.03, 0.52 ve 0.33 saniye olarak belirlenmiştir. İlk ve üçüncü modlar dominant olarak yatay yer deprem titreşimi özelliği sergilerken, ikinci ve dördüncü modlar dönme dominant bir davranış göstermektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, yapının burulma rijitliği gösterdiği anlaşılmaktadır. x yönündeki modal özellikler göz önünde bulundurulmamıştır.



ekil 2. 8 katlı burulmalı sistemin plan görünümü (boyutlar metre cinsinden verilmiştir).

4.1. Kuvvetli Yer Hareketleri

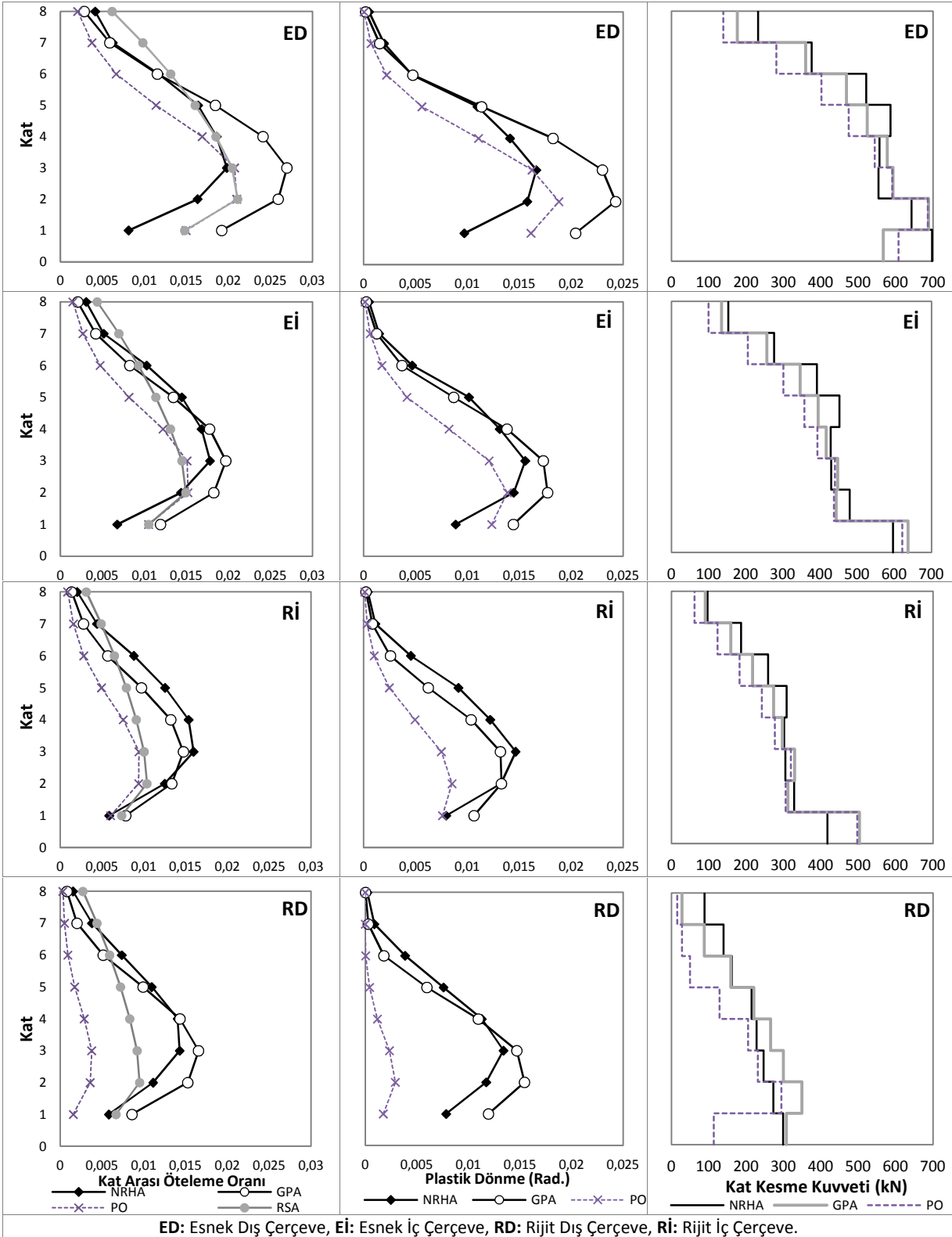
Yapılan analizlerde, PEER Kuvvetli Yer Hareketi Veritabanı'ndan elde edilen yer hareketi kayıtları herhangi bir ölçeklendirme ya da deprem sıklığı yapılmadan kullanılmıştır. Çalıma mada kullanılan onbe yer hareketi kaydının seçiminde, yapının üzerinde farklı seviyelerde doğrusal olmayan deformasyon talepleri oluşturulmasına dikkat edilmiştir.

4.2. Analiz Sonuçları

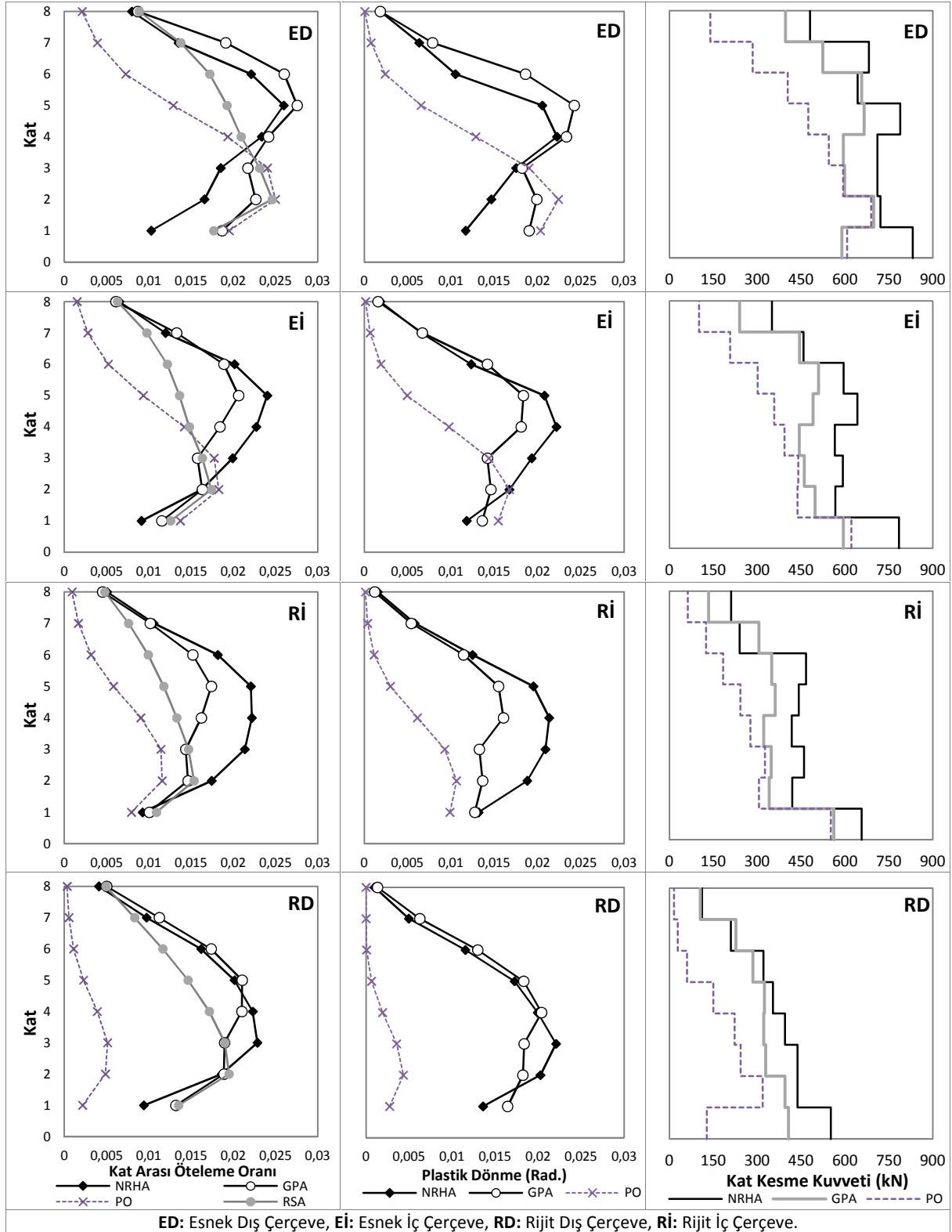
Çalıma mada onbe yer hareketi kaydı ile yapılan analizlerden seçilen iki yer hareketi kaydına ait olan detaylı sonuçlar ekil 3 ve ekil 4'te verilmiştir. Bu ekillerde GPA, RSA, PO, NDA altında alınan sismik talepler verilmektedir. Yapının deformasyon ekleme göre isimlendirilen dört çerçeve için sonuçlar kümelendirilmiştir. Her iki ekilde de ilk sütun kat arası öteleme oranları taleplerini gösterirken, orta sütun her çerçevedeki kirişlerin ortalama plastik dönmelerini son sütun ise çerçevelerde gözlemlenen kat kesme kuvvetlerini içermektedir.

ekil 3'te görüldüğü gibi, yapıda orta büyüklükte bir sismik talep yaratan H-E04140 PEER kodlu yer hareketi altında, GPA sonuçları referans NDA sonuçlarına kıyasla iyi bir örtüşme göstermektedir. Geleneksel itme analizi (PO) burulma düzensizliği kaynaklı çok modlu etkileri ihmal etmesi sebebiyle dinamik tepkiyi yakalayamamaktadır. GPA sonuçları herhangi bir istatistik kombinasyonu kullanılarak derlenmediği için kat kesme kuvvetlerinin tahmini oldukça isabetlidir. NDA tarafından verilen kapasite kesme kuvvetleri GPA tarafından da doğru bir biçimde tahmin edilmiştir.

8 katlı yapının yüksekliği boyunca yüksek mod etkilerinin gözlemlendiği ekil 4'te verilen SPV270 PEER kodlu yer hareketi altındaki sonuçlar GPA'nın yüksek mod etkilerini yakalama konusunda başarısını göstermektedir. RSA ve PO analizlerinin tahmin edemediği ve NDA tarafından verilen deformasyon ekileri,



ekil 3. H-E04140 kodlu yer hareketi kaydı altında kat arası öteleme oranları, ortalama kiriş plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetlerinin her çerçeve için dağılımı.



ekil 4. SPV270 kodlu yer hareketi kaydı altında kat arası öteleme oranları, ortalama kiri plastik dönmeleri ve kat kesme kuvvetlerinin her çerçeve için dağılımı.

GPA tarafından her dört çerçevede de isabetli bir biçimde hesaplanabilmektedir. GPA'nın performansının özellikle kiri plastik dönmelerinin tayin edilmesi konusunda konvansiyonel statik analiz yöntemlerinden ayrı tutulması ve referans degerlere yakın sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Her çerçevede hesaplanan kat kesme kuvvetleri incelendiğinde, NDA tarafından verilen kapasite kesme kuvvetlerine kıyasla GPA'nın performansı başarılı olarak nitelendirilebilir.

4. DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada üç boyutlu burulmalı sistemler için Genel İtme Analizi (GPA) sunulmuştur. Modal ölçeklendirme kuralı kullanılarak yapıya etkiyen genel yük vektörleri hesaplanmış ve hedef kat arası öteleme miktarları belirlenmiştir. Çalışmanın devamında, 8 katlı burulmalı bir yapı genel yük vektörleri altında artımsal itme analizine tabi tutulmuştur. Kat sayısı kadar yapılan itme analizlerinden elde edilen sonuçlar herhangi bir istatistik kombinasyonu kullanılmadan derlenip yapının sismik tepkisi olarak sunulmuştur.

Kısa kuvvetli yer hareketi için detaylıca verilen sonuçlar, GPA'nın referans sismik tepki olarak addedilen NDA sonuçlarıyla oldukça uyumlu bir sismik talep tahmininde bulunduğunu göstermektedir. Konvansiyonel itme analizlerinin yakalayamadığı burulma etkisi ve bunun sonucunda yapının her çerçevesinde deki en sismik talepler GPA tarafından isabetli bir şekilde saptanmaktadır. Buna ek olarak, genel itme analizinde nihai sonuçların bir zarf kombinasyonu vasıtasıyla elde edilmesi sayesinde eleman iç kuvvetleri doğru bir şekilde saptanabilmektedir. Bütün bu avantajlar, genel itme analizinin etkin bir dorusal olmayan analiz yöntemi olarak uygulanabilirliğini göz önüne koymaktadır.

KAYNAKLAR

- Rutenberg A. Nonlinear Response of Asymmetric Building Structures and Seismic Codes: A State of the Art Review. *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, 1992; 281–305.
- Stathopoulos KG, Anagnostopoulos SA. Inelastic Earthquake Response of Single-Story Asymmetric Buildings: An Assessment of Simplified Shear-Beam Models. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003; **32**(12): 1813–1831.
- Kosmopoulos A, Fardis MN. Seismic Evaluation of Strongly Irregular and Torsionally Unbalanced Concrete Buildings. *Proceedings of the 2nd FIB Congress*, Naples, 2006.
- Kilar V, Fajfar P. Simple Push-Over Analysis of Asymmetric Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997; **26**(2): 233–249.
- Moghadam AS, Tso WK. Pushover Analysis for Asymmetrical Multistory Buildings. *Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI*, Oakland, California, 1998.
- Chopra AK, Goel RK. A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002; **31**(3): 561–582.
- Fajfar P. A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 2000; **16**(3): 573–592.
- Kreslin M, Fajfar P. The Extended N2 Method Considering Higher Mode Effects in Both Plan and Elevation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012; **10**: 695–715.
- Sucuoğlu H, Günay MS. Generalized Force Vectors for Multi-mode Pushover Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011; **40**(1): 55–74.
- Kaatsız K, Sucuoğlu H. Generalized Force Vectors for Multi-mode Pushover Analysis of Torsionally Coupled Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014; **43**(13): 2015–2033.
- Alicı F.S., Sucuoğlu H. Practical Implementation of Generalized Force Vectors for the Multimodal Pushover Analysis of Building Structures. *Earthquake Spectra*, 2015, **31**(2): 1043-1067.
- Bayındırlık ve Şehircilik Bakanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, 2007
- OpenSees – Open System for Earthquake Engineering Simulation, 2014, <http://opensees.berkeley.edu>.
- PEER Kuvvetli Hareket Veritabanı, 2014, <http://peer.berkeley.edu/smcat>.