



Orta Katlı Betonarme Yapılar İçin Deplasman İstemi Hesaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Hayri Baytan ÖZMEN, Mehmet İNEL ve Hüseyin Bilgin
Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı, Denizli, Türkiye

ÖZ: Yurdumuz mevcut yapı stokunun büyük bölümünün deprem performansı açısından yeterli güvenlik seviyesinde olmadığı bilinen bir durumdur. Yapı stokunun iyileştirilmesi için atılması gereken ilk adım mevcut yapıların değerlendirilmesidir. Bu değerlendirme işleminin önemli aşamalarından biri deplasman isteminin belirlenmesidir. Bu çalışmanın amacı deplasman isteminin hesabında kullanılan kapasite spektrumu (ATC-40), deplasman katsayıları (FEMA-356, FEMA-440) ve 2006 Afet Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (AY-2006) Bölüm 7C’de önerilen yöntemlerle bulunan değerler birbirleri ve seçilen deprem kayıtları ile hesaplanan istemler ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla halen yapı stokunun çoğunluğunu oluşturan 1975 Afet Yönetmeliği’ne göre tasarlanan 4 ve 7 katlı 28 betonarme binanın doğrusal ötesi modelleri oluşturularak kapasite eğrileri elde edilmiştir. Bu yapılar tek serbestlik dereceli sisteme indirgenerek, ülkemizde yaşanmış yıkıcı 18 ve literatürde sıklıkla kullanılan 10 yurt dışı depremin ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal ötesi analiz (ZTAA) ile deplasman istemleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda deplasman katsayıları yöntemleri arasında ve ZTAA sonuçları arasında genel bir uyum gözlenirken kapasite spektrumu yöntemiyle hesaplanan istemlerin oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir. FEMA-356 ve FEMA-440 yöntemlerinde dikkate alınan dayanım, rijitlik kaybı ve negatif akma sonrası rijitlik nedeniyle oluşacak olumsuzlukların dikkate alındığı fakat AY-2006 da yer almadığı gözlenmiştir. Bu nedenle bu tür olumsuzlukların etkilerinin arttığı durumlarla ilgili mühendis ve araştırmacıların bilgilendirilmesi gerektiği kanaatine varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Afet yönetmeliği, Deplasman tabanlı analiz, Doğrusal ötesi analiz, Talep deplasman

1 GİRİŞ

İnşa ettiğimiz yapıların hemen tümünün tasarım yükleri veya buna yakın yüklerde elastik kalmayarak doğrusal ötesi bölgede davranış gösterdiği bilinmektedir. Buna rağmen özellikle son yıllara kadar, yapıların deprem veya diğer tasarım yükleri altında davranışı elastik, kuvvet tabanlı yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılmaktaydı. Fakat son yıllarda bilgisayar teknolojisinde ve inşaat mühendisliğinde yaşanan gelişmeler doğrusal ötesi yöntemlerin daha yaygın ve pratik kullanımına olanak vermektedir. Elastik yöntemlere göre birçok üstünlüğü bulunan bu yöntemler gittikçe daha çok yaygınlaşmakta ve tasarım ve değerlendirme ile ilgili birçok kaynakta yer almaktadır [1–4].

Bu yöntemler içinde nispeten pratik oluşu nedeniyle en yaygın olarak kullanılan “Doğrusal Ötesi Statik Analiz” yöntemidir[5]. Yabancı literatürde “pushover” olarak geçen yöntem “İtme Analizi”

olarak da bilinmektedir. İtme Analizi 2006 yılında yayınlanan Deprem Yönetmeliği’nde (DY-2006) de yer almıştır ve özellikle mevcut yapıların değerlendirilmesi için kullanımı önerilmektedir [6].

Doğrusal Ötesi Yöntemler genellikle deplasman tabanlı prosedürlerle birlikte anılmaktadır. Deplasman tabanlı tasarım ve değerlendirmede dikkate alınan parametre kuvvet değil deformasyondur. Bu sebeple kapasite ve talepler deplasman ekseninde ifade edilmektedir. Zira bir yapıda depremin kuvvet talebi, yapı doğrusal ötesi bölgede ise, zaten yapının dayanımı kadardır. Daha büyük bir kuvvet talebi anlamsızdır. Fakat yapının doğrusal ötesi bölgede deformasyon (deplasman) göstererek sismik talepleri karşılaması gerçek davranışa daha uygun düşmektedir. Bu sebeple bu yöntemlerde belirli bir yatay dayanıma sahip yapıya gelen deplasman taleplerinin, deplasman kapasitesini aşıp, aşmamasına göre değerlendirme yapılmaktadır.

Bu çalışmada gittikçe yaygınlaşan ve DY-2006' da da yer alan Deplasman Esaslı Prosedürlerde talep deplasmanın bulunması yöntemleri değerlendirilecektir. Çalışmada özellikle orta katlı 1975 Afet Yönetmeliği'ne göre tasarlanmış betonarme binalar üzerinde durulmuştur. Bu tür yapılar halen ülkemizde mevcut yapıların büyük bölümünü teşkil etmektedir. Artan kat sayısı ile birlikte ülkemiz yapılarının hasar görülebilirliği arttığından ve dayanım fazlalığı etkileri azaldığından orta katlı binaların sismik değerlendirilmesi daha büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla orta katlı yapıların alt ve üst grubunu temsil etmesi amacıyla 1975 Afet Yönetmeliği'ne göre tasarlanan 7 adet dört katlı, 7 adet yedi katlı betonarme yapı İtme Analizine tabii tutularak iki asal ekseninde (x ve y) kapasite eğrileri elde edilmiştir [7]. Bu kapasite eğrilerinden yola çıkılarak seçilen yöntemlerinin her biri ile talep deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu değerler 28 depremin ivme kayıtları kullanarak, incelenen binaların tek serbestlik derecesine indirgenmiş hallerine uygulanan Zaman Tanım Alanında doğrusal ötesi Analiz (ZTAA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2 BİNA MODELLERİ

Adı geçen yöntemlerin mevcut yapıların değerlendirilmesinde kullanımının daha önemli olması ve halen mevcut yapı stoğu içinde büyük bir yeri olması nedeniyle betonarme bina modelleri AY-75'e göre tasarlanmıştır. Tasarım parametreleri Çizelge 1'de verilmektedir. Tasarlanan binalar SAP2000 programında İtme Analizine tabii tutularak her iki asal yönde kapasite eğrileri elde edilmiştir [8]. Elde edilen kapasite eğrileri iki doğrulu (bilinear) hale getirilerek yatay dayanım katsayısı (C_v =akma dayanımı/yapı ağırlığı), ve efektif periyot (akma noktasında hesaplanan periyot değeri) hesaplanmıştır. Analizi yapılan binalar ile ilgili bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir. Kapasite eğrilerinin iki doğrulu hale getirilmesine bir örnek Şekil 1'de verilmektedir.

3 İVME KAYITLARI

Bina modellerinin tek serbestlik dereceli hallerinin doğrusal ötesi ZTA analizinde kullanılmak üzere Türkiye ve dünyanın diğer bölgelerinden yıkıcı depremlere ait ve literatürde sıklıkla kullanılan ivme kayıtları seçilmiştir. Seçilen ivme kayıtlarının elde edildiği istasyonların zeminin tasarlanan modellerin zemini ile uyum göstermesine dikkat edilmiştir. Depremlere ait ivme kayıtları ve zemin

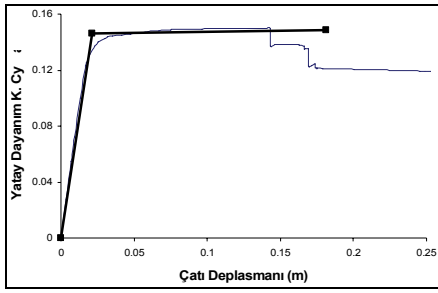
bilgileri www.deprem.gov.tr ve PEER'in web sitesinden elde edilmiştir [9,10]. Türkiye dışı ve Türkiye depremlerine ait bilgiler Çizelge E1 ve E2'de verilmiştir. Depremlere ait ivme spektrumu, ortalama spektrum ve DY-2006 Z3 zemin sınıfı tasarım spektrumu Şekil 2'de verilmektedir.

Çizelge 1. Tasarım parametreleri

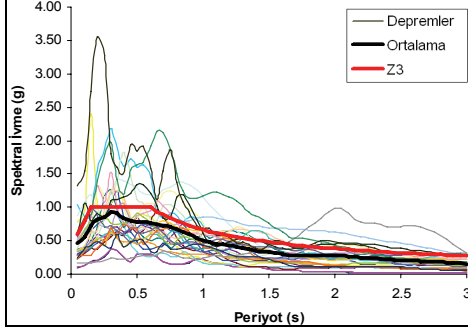
Özellik	Değer
Yönetmelik	1975
Yapı Sınıfı	Konut (I=1)
Beton Sınıfı	BS 16
Çelik Sınıfı	S220 (BÇI)
Hareketli Yük (Normal Kat)	0.200 t/m ²
Hareketli Yük (Çatı Kat)	0.150 t/m ²
Ölü Yük (Normal Kat)	0.470 t/m ²
Ölü Yük (Çatı Kat)	0.450 t/m ²
Duvar Yükü	0.600 t/m
Hareketli Yük Azaltma Katsayısı (n)	0.3
Deprem Bölgesi	1. Derece (0.4g)
Yerel Zemin Sınıfı	Z3

Çizelge 2. Bina özellikleri

Kat	Mod.	Yön	T_e	C_v	PF_1	α_1
4	1	X	0.781	0.132	1.35	0.83
	1	Y	0.681	0.156	1.31	0.83
	2	X	0.847	0.112	1.34	0.84
	2	Y	0.708	0.145	1.32	0.83
	3	X	0.819	0.126	1.26	0.93
	3	Y	0.805	0.130	1.25	0.93
	4	X	0.757	0.147	1.32	0.83
	4	Y	0.732	0.158	1.32	0.83
	5	X	0.848	0.112	1.26	0.93
	5	Y	0.846	0.129	1.25	0.93
	6	X	0.944	0.099	1.26	0.93
	6	Y	0.906	0.118	1.25	0.93
	7	X	0.755	0.134	1.32	0.72
	7	Y	0.742	0.139	1.32	0.72
7	1	X	1.124	0.115	1.41	0.77
	1	Y	1.081	0.129	1.38	0.77
	2	X	1.090	0.114	1.38	0.77
	2	Y	1.075	0.124	1.39	0.77
	3	X	1.087	0.117	1.35	0.86
	3	Y	1.096	0.121	1.36	0.85
	4	X	1.080	0.128	1.37	0.77
	4	Y	1.077	0.140	1.37	0.77
	5	X	1.182	0.104	1.35	0.86
	5	Y	1.179	0.114	1.36	0.86
	6	X	1.236	0.104	1.35	0.86
	6	Y	1.222	0.108	1.36	0.86
	7	X	1.060	0.124	1.37	0.72
	7	Y	1.078	0.128	1.42	0.77



Şekil 1. Örnek iki doğrusal kapasite grafiği



Şekil 2. İvme kayıtlarına ait spektral ivme grafiği

4 TALEP DEPLASMAN BELİRLEME YÖNTEMLERİ

Çalışmada kullanılan yöntemler kısaca özetlenecektir. Kullanılan tüm yöntemlerde AY-2006'da Z3 zemin için verilen ivme spektrumunun kullanıldığı unutulmamalıdır.

4.1 Kapasite Spektrumu

ATC-40'da yer verilen Kapasite Spektrumu Yöntemi (KSY) ilk olarak Jacobsen'in ortaya attığı eşdeğer viskoz sönüm kavramına dayanmaktadır [11]. Aynı prensipleri kullanan farklı KSY'leri bulunmaktadır. Bunlarla ilgili Fardis ve Panagiotakos (1996) çalışmasına bakılabilir [12]. Bu çalışmada ATC-40'da verilen grafiksel A prosedürü kullanılmıştır [4].

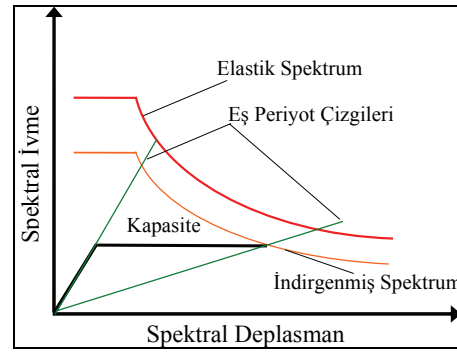
Yöntemin temel varsayımı doğrusal ötesi bir Tek Serbestlik Dereceli Sistemin (TSDS) maksimum deplasman talebi bu sisteme eşdeğer sistemin ilk sönüm ve periyodundan daha yüksek sönüm ve periyoda sahip elastik bir TSDS kullanılarak hesaplanabileceğidir. Hesaplama kullanılan elastik TSDS "Eşdeğer TSDS" ve bu sisteme ait sönüm ve periyot değerleri de "eşdeğer sönüm" ve "eşdeğer periyot" olarak isimlendirilmektedir.

$$T_{eq} = T_0 \sqrt{\frac{\mu}{1 + \mu\alpha - \alpha}} \quad (1)$$

$$\beta_{eq} = 0.05 + \kappa \frac{2(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\pi\mu(1 + \mu\alpha - \alpha)} \quad (2)$$

T_{eq} =eşdeğer periyot, T_0 =ilk periyot, μ =deplasman sönüklüğü, α =akma sonrası rijitlik, β_{eq} =eşdeğer sönüm, κ =histeritik davranış katsayısıdır.

κ katsayısı yapı kalitesine göre yapılan (iyiden kötüye) A, B, C sınıflandırmasına göre farklı değerler almaktadır. Her sınıflama için κ ve β_{eq} değerleri için farklı sınırlamalar öngörülmektedir. Çalışma kapsamında incelenen yapıların A ve B sınıfı olma durumları dikkate alınarak her iki durum içinde deplasman istemleri hesaplanmıştır.



Şekil 3. Kapasite Spektrumu Yöntemi

Çalışmada kullanılan prosedür grafiksel bir deneme-yanılma metodu ile çözüm sağlamaktadır. Öncelikle iki doğrusal hale getirilen kapasite diyagramı ve talep spektrumu aynı grafik üzerinde gösterilmektedir (Spektral İvme-Spektral Deplasman) (Şekil 3). Deplasman talebi için belirlenen bir değerle deneme-yanılma süreci başlamaktadır. Tahmin edilen deplasman değerine göre azaltılan elastik spektrumdan İndirgenmiş Spektrum elde edilir. İndirgenmiş spektrum ile kapasite eğrisinin kesiştiği nokta ilk tahmin edilen değerden fazla ise deplasman değeri azaltılır, fazla ise artırılır. Bu işlem tahmin edilen değer ve kesişme noktasından bulunan değer yeterince yaklaşıncaya kadar devam eder. Genellikle %5 hata yeterli kabul edilir. Böylelikle talep deplasman değeri bulunmuş olur. Daha detaylı bilgi için ATC-40 dokümanından faydalanılabilir [4].

4.2 Deplasman Katsayıları (FEMA-356)

Belirli bir değerden daha yüksek periyoda sahip elastoplastik sistemlerin maksimum deplasmanının, aynı periyot ve sönüme sahip elastik sistemlere yaklaşık olarak eşit olması “eş deplasman” prensibi olarak bilinmektedir. Daha küçük periyotlu sistemler için ise daha yüksek bir maksimum deplasman oluşmaktadır. Bu varsayımdan yola çıkarak elastik deplasman değerinin farklı katsayılarla artırılarak inelastik sistemin deplasman talebinin belirlenmesi yöntemine “Deplasman Katsayıları Metodu” denilmektedir. Bu metod FEMA-273/274 ve FEMA-356’da yer almaktadır [1,2]. Yönteme göre deplasman talebi (δ):

$$\delta = C_o C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e}{4\pi^2} g \quad (3)$$

T_e = Yapının efektif periyodu (iki doğrulu kapasite eğrisinin ilk eğiminden hesaplanan periyot), S_a = efektif periyoda ve elastik sönüme karşılık gelen spektral ivme, g = yer çekimi ivmesi.

C_o = TSDS’in spektral deplasmanını Çok Serbestlik Dereceli Sistemin (ÇSDS) çatı deplasmanına dönüştüren katsayı. ÇSDS’in ilk modunun modal katılım katsayısı olarak alınabilir veya FEMA-356’da verilen tablolardan belirlenebilir.

C_1 = Elastik sistem deplasmanını, inelastik sistemin deplasmanıyla ilişkilendiren katsayıdır. Eş deplasman prensibi gereği periyodu, zemin spektrumunun eşit ivme bölgesinden eşit hız bölgesine geçtiği periyottan (T_B) büyük yapılar için 1 değeri alır. Diğer durumlarda:

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1)T_B/T_e}{R} \geq 1.0 \quad T_e < T_B \quad (4)$$

$$R = \frac{S_a}{C_y} C_m \quad (5)$$

C_y = Yapının yatay dayanım katsayısı, C_m = efektif kütle katsayısı, birinci moda ait modal kütle katılım oranı olarak alınabilir.

C_2 = Histerisis davranışında çevrim sıkışması, dayanım ve rijitlik azalmasını nedeniyle oluşan etkileri yansıtan katsayıdır. FEMA-356 da Tablo 3.3’ten belirlenmektedir. Doğrusal ötesi prosedürlerde 1.0 olarak alınabilir. Bu çalışmada AY-75’e göre inşa edilmiş mevcut yapılarda yeterli sargılama sağlanmamış olacağı varsayımıyla Tablo 3.3’te verilen 1.2 katsayısı kullanılmıştır.

C_3 = P- Δ etkileri sebebiyle artan deplasman etkilerini yansıtan kasayıdır. Pozitif akma sonrası rijitliğe (α) sahip yapılarda 1.0 olarak alınır. Negatif akma sonrası rijitliğe sahip yapılar için :

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{1.5}}{T_e} \quad (6)$$

4.3 Deplasman Katsayıları (FEMA-440)

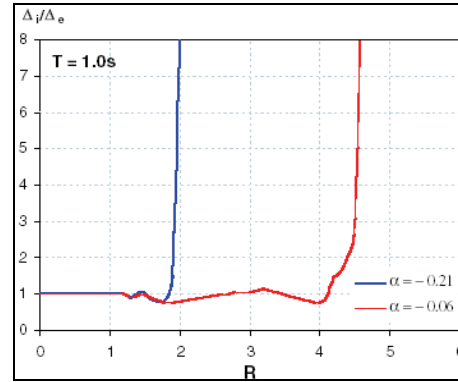
FEMA-356 ve ATC-40 dokümanlarının yenilenmiş hali niteliğinde olan FEMA-440’da FEMA-356’da verilen yöntem modifiye edilmiştir [3]. Denklemden yer alan C_1 ve C_2 katsayıları için yeni formüller önerilmiştir. C_3 katsayısı ise kaldırılmış yerine negatif akma sonrası rijitliğe sahip yapılar için R (elastik kuvvet talebi/yatay dayanım oranı) değerlerine üst sınır getirilmiştir.

$$C_1 = 1.0 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (7)$$

a = Yapı zeminine bağlı katsayı.

$$C_2 = 1.0 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (8)$$

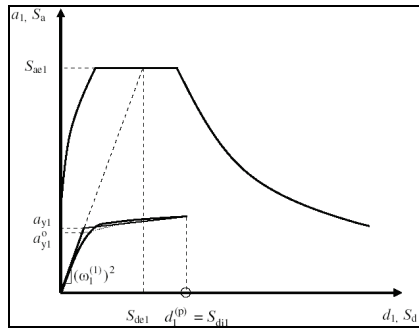
Negatif akma sonrası rijitliğe sahip (akma sonrasında artan deplasman ile dayanım kaybına uğrayan) sistemlerin dinamik stabilite kaybına uğradıkları yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır [13,14]. Şekil 4’te farklı R değerleri için bir yapıya ait inelastik deplasmanın elastik deplasmana oranı verilmektedir [14]. Şekilde α değerine bağlı olarak belirli R değerinden sonra deplasmanların çok hızlı biçimde artışı görülmektedir. Bu nedenle bu tür yapılar için C_3 katsayısı yerine max. R değeri belirlenmesi önerilmiştir.



Şekil 4. Farklı R ve α değerleri için deplasman oranları [14]

4.4 Deprem Yönetmeliği 2006

2006 yılında yayınlanan Deprem Yönetmeliği'nde deplasman tabanlı prosedürlere ve bir deplasman talebi bulma yöntemine yer verilmiştir [6]. Aynı yöntem Eurocode 8'de de yer almaktadır [15]. Yöntem esas olarak elastik deplasman talebinin C_{R1} katsayısı ile artırılmasına dayandığından bir deplasman katsayıları yöntemidir. C_{R1} katsayısı FEMA-356'da verilen C_1 katsayısı ile amaç ve denklem olarak aynıdır. Deprem Yönetmeliği'nde yer alan yöntem $C_2=C_3=1.0$ olan FEMA-356 yöntemi ile aynıdır. Yalnız efektif periyodu T_B 'den küçük yapılarda kapasite eğrisinin iki doğrulu hale getirilmesi için deplasman talebinin bilinmesi gerektiğinden yöntem iteratif bir hal almaktadır. Kapasite eğrisinin iki doğrulu hali altında kalan alan ile eğrisel ilk hali altında kalan alanı eşit hale getiren spektral ivme değeri iteratif olarak bulunur (Şekil 5).



Şekil 5. AY-2006'ya göre kapasite eğrisinin iki doğrulu hale getirilmesi

4.5 Zaman Tanım Alanında Doğrusal Ötesi Analiz

Hazırlanan bina modelleri TSDS haline dönüştürülerek belirlenen depremler ait ivme kayıtları kullanılarak doğrusal ötesi ZTA analizine tabii tutulmuştur. Analizlerde USEE (Utility Software for Earthquake Engineering) yazılımı kullanılmıştır [16]. Bina modellerinin TSDS dönüşümü için FEMA-440 ve ATC-40'ta önerilen yöntem kullanılmıştır. Buna göre kapasite eğrilerinin iki doğrulu hale getirilmesiyle ÇSDS akma dayanımı (V_y) ve akma deplasmanı (Δ_y) belirlenmiş olmaktadır. Bu değerlerden TSDS akma dayanımı (Δ_{ys}) ve yatay dayanım katsayısı (C_{ys}) Denklem 9 ve 10 yardımıyla belirlenir.

$$\Delta_{ys} = \frac{\Delta_y}{PF_1} \quad (9)$$

$$C_{ys} = \frac{V_y}{W\alpha_1} \quad (10)$$

PF_1 = Birinci moda ait modal katılım katsayısı, W = Yapı ağırlığı, α_1 = Birinci moda ait kütle katılım oranıdır.

Elde edilen tek serbestlik dereceli sistemin, depremlere ait ivme kayıtları kullanılarak doğrusal ötesi analizi gerçekleştirilir ve maksimum deplasman değeri bulunur. Elde edilen TSDS'e ait değer PF_1 ile çarpılarak ÇSDS'in söz edilen depreme ait deplasman istemi bulunmuş olur. Bu işlem her bir ivme kaydı için tekrarlanarak farklı depremlere ait bir deplasman istemleri seti elde edilmiş olur.

5 ANALİZ SONUÇLARI

Kapasite eğrileri elde edilen binaların her bir asal yönü için hesaplanan deplasman istemleri Çizelge E3'te verilmiştir. Çizelge incelendiğinde ilk göze çarpan durum ATC-40'ta verilen Kapasite Spektrumu yöntemiyle hesaplanan değerlerin diğer tüm yöntemlere göre oldukça yüksek olmasıdır. Bu duruma en önemli nedeni yöntemde her bir yapı sınıfı için hesaplanan κ değerlerinde üst sınır ve efektif sönüm yoluyla hesaplanan indirgeme katsayılarında alt sınır değerler olmasıdır. Yani belirli bir deplasman değerinde sonra yapının doğrusal ötesi bölgede ilerlemesi sonucu sönümlenen enerji dikkate alınmamakta ve talep spektrumunda daha fazla indirgenmemektedir.

Ayrıca eşdeğer sönüm arttıkça azalan κ değerleri ve sönüm oranı ve indirgeme katsayıları arasındaki logaritmik ilişki nedeniyle sönüm artışı talep spektrumunun indirgenmesine gittikçe azalan bir oranda yansımaktadır. Dolayısıyla bu sistemlerde deplasman talebi arttıkça, deplasman talebi artmaktadır demek yanlış olmaz. Bu sebeple özellikle C_y katsayısı düşük sistemlerde oldukça büyük deplasman istemleriyle karşılaşılması olasıdır.

İlk iki paragrafta değinilen nedenlerle izin verilen minimum indirgenmiş spektrumun elde edildiği deplasman değerinden sonra kapasite eğrisinin altında kalan alanın bir önemi kalmamaktadır. Bu noktadan sonra işlemler yalnız akma sonrası rijitlik değerine (α) bağlı olmaktadır. Bu duruma örnek olarak 1 numaralı modelin (A sınıfı yapı varsayımıyla) X doğrultusunda farklı α değerleri için deplasman istemi değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3). Yapının hesaplanan α değeri %0.4'tür. Çizelgede bu değer 0 ve %2 olması durumunda hesaplanan

deplasman değerlerinde sırasıyla %8 artış ve %20 azalma görülmektedir. İncelenen diğer yöntemlerde negatif olma durumu dışında formülasyonda dikkate alınmayan bu değer Kapasite Spektrumu yönteminde oldukça önemli etkisi olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Farklı α katsayıları için örnek talep değerleri

α	Talep (%)	Oran
0.020	4.47	0.81
0.000	6.01	1.08
0.004	5.55	1.00

Kapasite Spektrumu yönteminden elde edilen yüksek taleplerin bir nedeni de hesaplamalarda DY-2006 Z3 İvme Spektrumunun kullanılmasıdır. Spektrumun sabit hız bölgesi denklemi Denklem 11'de verilmektedir.

$$S(T) = 2.5 \left(\frac{T_B}{T} \right)^U \quad (11)$$

Denklemden yer alan U katsayısı bazı yönetmeliklerde 1.0 olarak geçerken DY-2006'da 0.8'dir [6, 21]. Bu katsayının 1.0 ve 0.8 olması durumuna göre hesaplanan taleplerin bina yüksekliğine oranının ortalamaları ve artış miktarı Çizelge 4'te verilmiştir. Diğer yöntemlerdeki %8.5-9 oranındaki artışın yanında Kapasite Spektrumu yöntemindeki artış miktarları %40'ı geçmektedir. Bu durumun da sebebi ilk iki paragrafta değinilen etkenlerdir.

Çizelge 5'te farklı yöntemler için bina yüksekliği ile normalize edilmiş deplasman değerlerinin ortalamaları ve bunların ZTA Analizden elde edilen ortalama taleplere oranları verilmiştir. Kapasite Spektrumu yönteminden sonra en yüksek talep değerleri FEMA-356 yönteminden elde edilmiştir. Bu durumun sebebi bu yöntemde C_2 katsayısının 1.2 gibi yüksek bir değer olarak alınmış olmasıdır. Bu değer 1.0 alınmış olması durumunda FEMA-356 yöntemi incelenen yapı için DY-2006 ile benzer sonuçlar vermektedir.

Çizelge 4. Farklı U katsayıları için ortalama talep değerleri

Sd (%)	Sd (%)	Talep (%)		Artış (%)
		U=0.8	U=1	
		1.007	0.922	8.4
ATC-40	A	4.167	2.502	40.0
	B	4.832	2.782	42.4
FEMA356	FEMA356	1.609	1.472	8.5
FEMA440	FEMA440	1.446	1.318	8.9
AY-2006	AY-2006	1.341	1.226	8.5

FEMA-356 yönteminden sonra FEMA-440 yönteminden elde edilen talep deplasmanları gelmektedir. Bunun nedeni DY-2006'da T_B 'den büyük periyot değerleri için 1.0 alınan C_1 değerlerinin 1.0'dan büyük olması ve DY-2006'da zaten bulunmayan C_2 katsayısı ile istemlerin artırılmış olmasıdır.

Çizelge 5. Farklı yöntemler için ortalama deplasman talepleri

		4 Katlı		7 Katlı	
		Talep (%)	Oran	Talep (%)	Oran
		Ort.	1.182	1.00	0.895
ZTAA	Max.	3.598	3.04	2.747	3.07
	Min.	0.232	0.20	0.198	0.22
	Sd (%)	-	1.075	0.91	0.940
ATC-40	A	4.956	4.19	3.378	3.77
	B	5.725	4.84	3.939	4.40
FEMA356	-	1.669	1.41	1.548	1.73
FEMA440	-	1.603	1.36	1.384	1.55
AY-2006	-	1.391	1.18	1.290	1.44

DY-2006 incelenen yöntemler içinde en düşük ortalama deplasman istemlerine sahip yöntemdir. Diğer yöntemlerde yer alan C_2 ve C_3 katsayıları bu yöntemde yer almamaktadır. Buna rağmen ZTAA sonuçlarından 4 katlı yapılar için ortalama %18 ve 7 katlı yapılar için %44 daha yüksek deplasman istemi değerleri vermektedir. Çevrim sıkışması ve histeritik çevrimler sırasında dayanım ve rijitlik kaybının yöntemde hesaba katılmamış olması dikkate alındığında bu fazlalığın güvenli tarafa kalmak adına yararlı olacağı düşünülebilir. Karşılaştırma yapılan değerlerin ortalama değerler olduğu dikkate alındığında yöntemin aşırı yüksek deplasman talepleri verdiği söylenemez.

Türkiye yapı stoğunda çoğunlukla düşük yatay dayanım katsayısına (C_y) sahip yapılarla karşılaşmaktadır. Düşük C_y değerleri nedeniyle yüksek R talepleri ortaya çıkmaktadır. Artan R değerleriyle birlikte histeritik çevrimler sırasında dayanım ve rijitlik kaybının yükselmesi beklenilir. Ayrıca çok yüksek R değerlerinde dinamik stabilite kaybı problemleri görülme ihtimali artmaktadır.

C_2 ve C_3 katsayıları yeni yönetmelikte yer almadığından dolayı özellikle mevcut yapı değerlendirme yapan araştırmacı ve mühendislerin yukarıda değinilen hususlarda bilgilendirilmesi faydalı olacaktır.

Çalışmanın en dramatik sonuçlarından biri Kapasite Spektrumu Yöntemiyle hesaplanan deplasman istemi değerlerinin diğer yöntemlere göre oldukça

yüksek olmasıdır. Özellikle elastik spektrum indirgeme katsayılarının limit değerlerine ulaştığı durumlarda bu problem oldukça belirgindir. Yöntem adeta belirli deplasman isteminin aşılmasından sonra stabilite kaybına uğramaktadır. Oldukça yatay hale gelmiş indirgenmiş talep spektrumu ile düşük ya da sıfır akma sonrası rijitliğe sahip yapıların yataya yakın eğrileri kesiştirilmeye çalışılmaktadır. Düşey eksenlerdeki küçük oynamalar yatay ekseninde eğim nedeniyle büyük değişimlere meydan vermekte ve bu durum da hata payını oldukça arttırmaktadır. Yöntemin eşdeğer sönümün limit değerlerle sınırlandırıldığı bazı durumlarda inelastik deplasmanların yüksek hesaplanmasına neden olduğu bazı araştırmacılar tarafından ileri sürülmüştür [18].

Priestley çok farklı histeritik özelliğe sahip sistemlerin aynı maksimum deformasyona sahip olduğunu gözlemlemiş ve "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering" adlı yayınında "deprem mühendisliğindeki yaygın mitlerden birinin optimum sismik davranışın elde edilmesi için enerji sönümleme kapasitesinin maksimize edilmesi gerektiğidir" şeklinde yazmıştır [19]. Başka bazı araştırmacılar da histerisis şeklinin maksimum deplasman talepleri üzerinde büyük etkiye sahip olmadığını gözlemlemişlerdir [20]. Kapasite Spektrumu gibi eşdeğer lineer yöntemlerde farklı histerisis şekilleri için çok farklı süneklik talepleri elde edilmesi bu sonuçlarla çelişmektedir.

Bu sebeple çalışma sonucunda düşük yatay dayanıma sahip yurdumuzdaki mevcut yapılarda Kapasite Spektrumu yönteminin kullanılması tavsiye edilmemektedir.

6 KAYNAKLAR

- [1] FEMA 273-274, 1997. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, federal Emergency Management Agency, Washington.
- [2] FEMA 356, 2000. Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings, NEHRP Guidelines, Washington.
- [3] FEMA 440, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, "NEHRP Guidelines", Washington.
- [4] ATC-40, 1996. "Seismic evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Vol.1, Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- [5] Krawinkler, H. and Seneviratna, G. D. P. K., 1998. Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance

- Evaluation. Engineering Structures, Vol. 20, Nos 4-6, pp. 452-464.
- [6] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2006), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [7] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (1975), Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [8] CSI, SAP2000 V-8, 2002. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- [9] Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, www.deprem.gov.tr.
- [10] Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://peer.berkeley.edu>
- [11] Jacobsen, L.S., 1930, "Steady forced vibrations as influenced by damping," Transactions ASME, Vol. 52 (APM), pp. 169-181.
- [12] Fardis, M.N. and Panagiotakos, T.B., 1996, "Hysteretic damping and reinforced concrete elements," Proceedings, 11th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper 464, Acapulco, Mexico.
- [13] Jennings, P.C. and Husid, R., 1968, "Collapse of yielding structures during earthquakes," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 94, No. 5, American Society of Civil Engineers, pp. 1045-1065.
- [14] Miranda, E. and Akkar, S.D., 2002, "Dynamic Instability of Simple Structural Systems," submitted for review and possible publication to Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers.
- [15] EC8 (Eurocode 8): Earthquake resistance design of structures—Part 1: general rules, ENV 1998-1-1/2/3, European Committee for Standardization, Brussels, 1995.
- [16] Inel, M., E. M. Bretz, E. F. Black, M. A. Aschheim, and D. P. Abrams, USEE 2001: *Utility Software for Earthquake Engineering –Program, Report, and User's Manual*, CD Release 01-05, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois, Urbana, IL, September 2001. Available: <http://mae.ce.uiuc.edu/>.
- [17] Miranda, E. and Akkar, S.D., 2002, "Evaluation of iterative schemes in equivalent linear methods," submitted for review and possible publication to Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- [18] Priestley, M.J.N. (1993). "Myths and fallacies in earthquake engineering – Conflicts between design and reality", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 329-341, also in Proceedings of the T. Paulay Symposium: Recent Developments in Lateral Force Transfer in Buildings, La Jolla, CA, ACI Special Publication 157, pp. 231-254.
- [19] Shi, S. and Foutch, D.A. (1997). "Evaluation of connection fracture and hysteresis type on the seismic response of steel buildings," Report No. 617, Civil Engineering Studies, Structural Research Series, University of Illinois at Urbana- Champaign, Urbana, IL.
- [20] FEMA-368

Çizelge E1. Kullanılan Türkiye dışı depremlerin özellikleri

Kategori	Deprem	Tarih	Büyüklik	İstasyon	Bileşke	PGA (g)	Uzaklık (km)
ID	Imperial Valley	15.10.1979	$M_L = 6.6$	Brawley	315°	0.221	43^1
	Loma Prieta	17.10.1989	$M_S = 7.1$	Saratoga	360°	0.504	28^1
	Northridge	17.01.1994	$M_W = 6.7$	Newhall	360°	0.589	19^1
	Northridge	17.01.1994	$M_W = 6.7$	Sylmar	090°	0.604	15^1
US	Imperial Valley	18.05.1940	$M_L = 6.3$	ElCentro	180°	0.348	12^1
	Landers	28.06.1982	$M_S = 7.5$	Joshua Tree	360°	0.274	15^1
	Michoacan	19.09.1985	$M_S = 8.1$	SCT1	270°	0.171	376^1
	Tabas	16.09.1978	$M_L = 7.4$	Tabas	344°	0.937	$<3^1$
KS	Imperial Valley	15.10.1979	$M_L = 6.6$	Array #7-14	140°	0.333	27^1
	Northridge	17.01.1994	$M_W = 6.7$	Century City	360°	0.221	19^1

ID, İleri Doğrultulu (Forward Directivity), US (Uzun Süreli), KS (Kısa Süreli), ¹ Merkez üssüne uzaklık

Çizelge E2. Kullanılan Türkiye depremlerinin özellikleri

Deprem	Tarih	Büyüklik	İstasyon	Bileşke	PGA (g)	Uzaklık (km)
Afyon-Sultandağ	03.02.2002	$M_W = 6.5$	Afyon	North	0.114	73.9^1
Afyon-Sultandağ	03.02.2002	$M_W = 6.5$	Afyon	East	0.094	73.9^1
Bingöl	01.05.2003	$M_W = 6.4$	Bingöl	North	0.546	10.5^1
Bingöl	01.05.2003	$M_W = 6.4$	Bingöl	East	0.277	10.5^1
Adana-Ceyhan	27.06.1998	$M_S = 5.9$	Ceyhan	East	0.274	32.0^1
Adana-Ceyhan	27.06.1998	$M_S = 5.9$	Ceyhan	South	0.223	32.0^1
Dinar	01.10.1995	$M_S = 5.9$	Dinar	East	0.33	10.8^1
Dinar	01.10.1995	$M_S = 5.9$	Dinar	South	0.282	10.8^1
Düzce	12.11.1999	$M_W = 7.2$	Bolu	360°	0.728	17.6^2
Düzce	12.11.1999	$M_W = 7.2$	Bolu	090°	0.822	17.6^2
Düzce	12.11.1999	$M_W = 7.2$	Düzce	180°	0.348	8.2^2
Düzce	12.11.1999	$M_W = 7.2$	Düzce	270°	0.535	8.2^2
Erzincan	13.03.1992	$M_S = 6.8$	Erzincan	North	0.515	2.0^2
Erzincan	13.03.1992	$M_S = 6.8$	Erzincan	East	0.496	2.0^2
Kocaeli	17.08.1999	$M_S = 7.4$	Düzce	180°	0.312	12.7^2
Kocaeli	17.08.1999	$M_S = 7.4$	Düzce	270°	0.358	12.7^2
Kocaeli	17.08.1999	$M_S = 7.4$	Yarımca	060°	0.268	2.6^2
Kocaeli	17.08.1999	$M_S = 7.4$	Yarımca	330°	0.349	2.6^2

¹ Merkez üssüne uzaklık, ² Fay kırığına en yakın uzaklık

Çizelge E3. Binalar için hesaplanan deplasman taleplerinin bina yüksekliğine oranı (%)

Kat	Model	Yön	ZTAA			S _d	ATC-40		FEMA356	FEMA440	AY-2006
			Ort.	Max	Min		A	B			
4	1	X	1.29	3.57	0.28	1.10	5.56	6.50	1.78	1.70	1.48
	1	Y	1.07	3.41	0.23	0.93	4.31	5.04	1.47	1.44	1.22
	2	X	1.32	4.06	0.24	1.21	5.98	6.85	1.94	1.86	1.62
	2	Y	1.15	3.44	0.24	0.97	4.96	5.83	1.54	1.52	1.29
	3	X	1.18	3.63	0.20	1.05	5.42	6.24	1.59	1.54	1.32
	3	Y	1.11	3.42	0.21	1.03	4.64	5.32	1.54	1.50	1.28
	4	X	1.19	3.38	0.23	1.06	4.62	5.43	1.67	1.59	1.39
	4	Y	1.17	3.51	0.27	1.01	4.33	5.09	1.61	1.53	1.34
	5	X	1.23	3.80	0.19	1.09	5.49	6.26	1.65	1.62	1.38
	5	Y	1.16	3.55	0.20	1.09	4.73	5.42	1.63	1.56	1.36
	6	X	1.38	4.23	0.23	1.24	6.22	7.09	1.88	1.80	1.57
	6	Y	1.21	3.85	0.23	1.18	5.28	6.02	1.77	1.67	1.48
	7	X	1.05	3.28	0.24	1.05	3.99	4.61	1.67	1.57	1.39
7	Y	1.03	3.25	0.24	1.03	3.83	4.45	1.63	1.54	1.36	
Ortalama			1.18	3.60	0.23	1.07	4.96	5.73	1.67	1.60	1.39
7	1	X	0.99	3.12	0.18	0.97	3.91	4.62	1.64	1.47	1.37
	1	Y	0.84	2.48	0.16	0.93	2.88	3.35	1.53	1.37	1.28
	2	X	0.95	2.89	0.17	0.93	3.83	4.55	1.55	1.40	1.29
	2	Y	0.89	2.61	0.16	0.92	3.33	3.92	1.53	1.38	1.28
	3	X	0.93	3.08	0.20	0.88	3.77	4.40	1.42	1.28	1.18
	3	Y	0.82	2.48	0.20	0.89	2.94	3.35	1.45	1.30	1.20
	4	X	0.89	2.58	0.16	0.92	3.23	3.84	1.52	1.36	1.27
	4	Y	0.85	2.48	0.16	0.92	2.84	3.37	1.51	1.34	1.26
	5	X	0.96	3.13	0.26	0.97	4.02	4.63	1.57	1.41	1.31
	5	Y	0.87	2.58	0.24	0.97	3.07	3.50	1.58	1.40	1.32
	6	X	1.01	3.35	0.27	1.02	4.33	5.04	1.66	1.47	1.38
	6	Y	0.94	2.91	0.28	1.01	3.57	4.09	1.65	1.46	1.37
	7	X	0.77	2.33	0.15	0.90	2.79	3.25	1.49	1.34	1.24
7	Y	0.81	2.43	0.17	0.92	2.79	3.23	1.57	1.40	1.31	
Ortalama			0.90	2.75	0.20	0.94	3.38	3.94	1.55	1.38	1.29