DÜMF Mühendislik Dergisi
web: http://dergipark.gov.tr/dumf

Deprem yalıtımlı binaların ticari yazılımlarla analizinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

Ali Ruzi ÖZUYGUR *
YPU – Yapı Proje Uygulama A.Ş., İstanbul
aliruzi@gmail.com, Tel: (212) 444 09 78

Geliş: 23.03.2017, Kabul Tarihi: 29.07.2017

Öz

Deprem yalıtımı geçmiş çeyrek yüzyılda yapısal ve yapısal olmayan elemanların depremlerin yıkıcı etkilerinden korunmasında etkili bir şekilde kullanılmıştır. Deprem yalıtımı son yıllarda ülkemizde de özellikle sağlık yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Deprem yalıtımı cihazlarının temel fonksiyonu yalıtımlı bina titreşim periyodunu uzatarak ve yalıtımlı bina sistemine ek sönüm ekleyerek üstyapıya etkiyen deprem yükünü azaltmaktır. Deprem yalıtımlı binaların dinamik analizi yaygın olarak ticari yazılım ETABS veya SAP2000 ile yapılmaktadır. ETABS veya SAP2000 yazılımında doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi için Hızlı Doğrusal-olmayan Analiz (Fast Nonlinear Analysis) ve Doğrusal-olmayan Doğrudan İntegrasyon (Nonlinear Direct Integration) seçenekleri bulunmaktadır. Bu çalışmada Hızlı Doğrusal-olmayan Analiz ve Doğrusal-olmayan Doğrudan İntegrasyon yöntemleri farklı parametreler kullanılarak yapılan sayısal analizlerle karşılaştırılmış ve uygulamaya yönelik öneriler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Deprem yalıtımı; Hızlı Doğrusal-olmayan Analiz; Doğrusal-olmayan Doğrudan İntegrasyon;*

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Binaların taban yalıtımı veya deprem yalıtımı yöntemiyle deprem yer hareketinin yıkıcı etkilerinden korunması düşüncesinin geçmişi 100 yıl öncesine dayanmaktadır. Deprem yalıtımı geçmiş çeyrek yüzyılda gelişmiş ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılmış ve meydana gelen şiddetli depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanların korunmasındaki etkinliği kanıtlanmıştır. Deprem yalıtımı son yıllarda ülkemizde de özellikle sağlık yapılarında yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Deprem yalıtımı yönteminin temel çalışma prensibi üstyapıyı kauçuk veya eğri yüzeyli kayıcı mesnetler gibi esnek ve elasto-plastik davranış gösteren yalıtım cihazları yardımıyla temel veya bodrum katlarından ayırması şeklindedir. Deprem yalıtımı cihazları binanın titreşim periyodunu uzatarak ve yalıtımlı bina sistemine ilave sönümleme kapasitesi ekleyerek üstyapıya etkiyen deprem yükünü azaltmaktadır (Naeim ve Kelly, 1999).

Deprem yalıtımlı binalar başlangıç olarak rijit üstyapı yaklaşımıyla Eşdeğer Yatay Kuvvet (EYK) yöntemiyle analiz edilmektedir. Yalıtım cihazlarının üzerinde yer alan üstyapı sistemi toplamının bir serbestlik derecesine sahip olduğu varsayıma dayanan rijit üstyapı yaklaşımıyla, yalıtımlı sistemin doğal titreşim periyodu, yalıtım cihazı seviyesindeki taban kesme kuvveti, yatay yerdeğiştirme, hız ve spektral ivme gibi temel tasarım parametreleri temel yapı dinamiği bağıntılarından elde edilebilmektedir (Chopra, 2012). Üst katların ivmeleri sadece ASCE (2010) veya taslak TBDY (2016)'da tarif edildiği gibi tepki spektrumu analizi ve zaman geçmişi (tepki geçmişi) analizi yöntemleriyle elde edilmektedir.

Ülkemizde sıkça kullanılan ASCE (2010) veya taslak TBDY (2016) yönetmelikleri EYK yöntemiyle yapılan ilk adım tasarımının, performansa dayalı tasarım yaklaşımıyla zaman geçmişi analizi kullanılarak gerçellenmesini gerekli kılmaktadır. Zaman geçmişi analiz sonuçlarının alt sınırı EYK yöntemi sonuçlarına bağlı olarak tarif edilmektedir. Zaman geçmişi analizi ASCE (2010) veya taslak TBDY (2016)'da tarif edildiği gibi bina konumunun depremsellik özellikleri ve yerel zemin şartlarına göre seçilecek ve hedef tasarım spektrumuna ölçeklendirilecek 7 veya 11 adet yer hareketi ivme kaydı kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de deprem yalıtımlı bina analiz ve tasarımında ticari yazılım ETABS (2011) ve SAP2000 (2017) programları yaygın olarak kullanılmaktadır. ETABS ve SAP2000 programlarında doğrusal olmayan zaman geçmişi analizi için Hızlı Doğrusal-olmayan Analiz (HDA) ve Doğrusal-olmayan Doğrudan İntegrasyon (DDİ) seçenekleri bulunmaktadır. HDA ve DDİ yöntemleri arasında özellikle analiz hızı açısından kıyaslanamayacak düzeyde fark bulunmaktadır. HDA yöntemi sergilediği işlem hızıyla yapısal tasarım sürecinin doğası gereği ortaya çıkacak iterasyonlara olanak sağlarken, DDİ yöntemi çoğu zaman analiz süresinden dolayı kullanılabilirlikten uzak kalmaktadır. Buna ek olarak özellikle deprem yalıtımlı bina analizlerinde HDA yönteminin, DDİ yöntemine göre daha doğru sonuç verdiği ifade edilmektedir (Wilson, 2002).

DDİ yönteminin HDA yöntemine kıyasla daha genel bir yöntem olması itibariyle deprem yalıtımlı bina tasarımında HDA yönteminin kullanılmasına yönelik itiraz veya tereddüt yaşanabilmektedir. Bu çalışmada DDİ ve HDA yöntemlerinin özellikleri genel çerçevede açıklandıktan sonra farklı parametreler kullanılarak yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayalı olarak deprem yalıtımlı bina analizi ve tasarımında HDA yönteminin kullanılması analiz hızına ek olarak daha mantıklı sonuçlar verdiğinden dolayı tavsiye edilmiştir. DDİ ve HDA yöntemlerinin teorik

altyapısının detaylı incelenmesi ve karşılaştırılması bu çalışma kapsamının dışında tutulmuştur.

HDA Yöntemi ve Özellikleri

HDA yöntemi doğrusal veya doğrusal olmayan yapısal sistemlerin statik veya dinamik analizi için kullanılan bir çeşit modal analiz yöntemidir (Wilson, 2002). HDA yönteminin kullanılabilmesi için analiz modeli aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Yapı sistemi esas itibariyle doğrusal elastik davranış göstermelidir;
- Doğrusal olmayan davranış gösterecek yapısal elemanlar belli olmalıdır;
- Yığılı doğrusal olmayan elemanlar Bağ (link) elemanlarıyla modellemiş olmalıdır.

Malzemenin doğrusal olmayan kuvvet – şekil değiştirme bağıntısına ek olarak doğrusal olmayan Bağ elemanları sönümleme cihazları, yalıtım birimleri ve diğer enerji yutucu cihazları temsil edebilir.

HDA yönteminin etkinliği büyük oranda doğrusal olmayan eleman kuvvet vektörü $\mathbf{R}_{\mathrm{NL}}(t)$'nin elastik rijitlik matrisi ve sönümlü hareket denkleminden ayrılmış olmasından ileri gelmektedir. HDA yönteminin temel hareket denge denklemi $\mathbf{R}_{\mathrm{NL}}(t)$'yi içerecek şekilde aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{u}(t)+\mathbf{R}_{\mathrm{NL}}(t)=\mathbf{R}(t) \qquad (1)$$

Burada **M**, **C** ve **K** sırasıyla sistemin kütle matrisi, sönüm matrisi ve rijitlik matrisidir. Elastik rijitlik matrisi **K** doğrusal olmayan elemanların rijitliklerini içermemektedir. $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ ve $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ sırasıyla sistemin zamana bağlı yer değiştirme, hız ve ivme vektörüdür. $\mathbf{R}(t)$ ise sisteme etkiyen dış yük vektörüdür. Her bir zaman adımında ayrıklaştırılmış modal denklemlerin kesin çözümü yapılır; buna karşın $\mathbf{R}_{\mathrm{NL}}(t)$ ile ifade edilen ön tanımlı doğrusal olmayan serbestlik dereceleri iterasyonla denklemin dengesini sağlayacak şekilde elde edilir. Bu işlem sayesinde HDA yöntemi kuvvet dengesi, kuvvet – şekildeğiştirme bağıntısı ve uygunluk şartlarını sağlayan etkin ve doğru bir doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi olarak ortaya çıkar.

DDİ Yöntemi ve Özellikleri

Yapısal sistemlerin dinamik hareket denge denkleminin çözümünde kullanılan en genel yöntem DDİ yöntemidir (Wilson, 2002). Dinamik hareket denge denkleminin DDİ yöntemiyle çözülmesi, her bir zaman adımında sistemin bir önceki zaman adımında sergilediği davranışı esas alınarak iterasyonla dinamik dengeyi sağlayan çözümün bulunması işlemidir. Dolayısıyla DDİ yöntemi adım adım integrasyon yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bir sistemin dinamik hareket denge denklemi genel şekliyle aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{u}(t)=\mathbf{F}(t) \qquad (2)$$

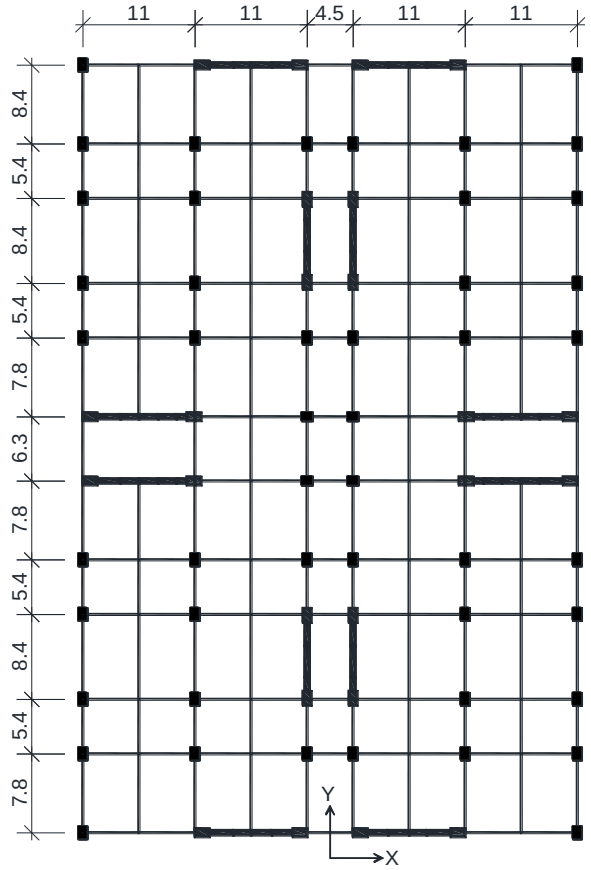
Burada $\mathbf{F}(t)$ dış yük vektörüdür. DDİ yönteminin en önemli özelliği her zaman adımında rijitlik matrisinin yeniden oluşturulmasıdır. Üstyapının esas itibariyle doğrusal elastik davranış göstereceği şekilde tasarlanan yalıtımlı binalarda analizin her adımında aynı üstyapı rijitlik matrisinin yeniden oluşturulması gereksiz bir işlem olarak görülebilir.

Örnek Deprem Yalıtımlı Binalar

Bu çalışmada yer verilen sayısal analizlerde aynı taşıyıcı sistem ve yük değerlerine sahip 3 katlı ve 2 katlı olmak üzere 2 adet örnek deprem yalıtımlı bina kullanılmıştır. Örnek deprem yalıtımlı binaların ağır yük taşıyan sanayi yapıları olduğu varsayılmıştır. Binaların tip kat planları Şekil 1'de gösterildiği gibi olup kat yükseklikleri 6 m'dir. Binaların yatay yük taşıyıcı sistemi betonarme perdeler ile kolon

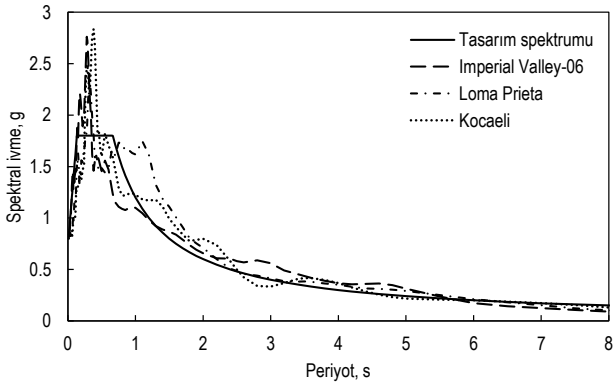
kiriş çerçevesinden oluşmaktadır. Kolon boyutları 0.8 m x 1.0 m ve kiriş boyutları 0.6 m x 1.0 m'dir. Yalıtım cihazı üzerindeki zemin kotu döşeme tabliyesinin kalınlığı 0.5 m ve üst katlardaki döşeme kalınlığı 0.25 m'dir. Perde kalınlıkları 0.45 m'dir.

Seçilen beton sınıfı C40 ve betonarme donatı sınıfı S420a'dır. Döşeme kaplama yüküne ek olarak 10 kPa düzgün yayılı ölü yük ve 2 kPa hareketli yük dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Örnek deprem yalıtımlı binaların tip kat planı

Yapılan sayısal analizlerde 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan deprem düzeyi dikkate alınmıştır. Kuzey Anadolu Fayı'na 10 ~ 15 km mesafedeki bir konumun depremselliğini yansıtan tasarım ivme değerleri olarak kısa periyot için S_{aS} = 1.8 g ve 1 saniye periyot için S_{a1} = 1.2 g spektral ivme değerleri dikkate alınmıştır. Dikkate alınan spektral ivmelerle oluşturulan %5 sönümlü tasarım ivme spektrumu Şekil 2'de verilmiştir. Doğrusal olmayan zaman geçmişi analizlerinde Imperial Valley-06, Loma Prieta ve Kocaeli olmak üzere 3 adet çift bileşenli deprem kaydı kullanılmıştır. Özellikleri Tablo 1'de verilen ilgili depremlerin ivme kayıtları Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi veri tabanından elde edilmiştir (PEER, 2017). Bu makaledeki parametrik çalışmada esas alınan analiz sonuçlarının mümkün olduğunca gerçek tasarım mertebesine yakın olması hedeflendiğinden dolayı ilgili deprem kayıtları, Şekil 2'de verildiği gibi yatay bileşenleri spektral ivmelerinin karelerinin toplamının karekökü, tasarım spektrumunun üzerinde kalacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Ayrıca, bu çalışmanın amacı ilgili yönetmeliklere göre performansa dayalı analizle deprem yalıtımı tasarımının gerçellenmesi değil, HDA ve DDİ yöntemlerinin ürettiği sonuçlar açısından karşılaştırılması olduğundan dolayı zaman geçmişi analizinde sadece 3 adet deprem ivme kaydı kullanılmıştır.



Şekil 2. Tasarım ivme spektrumu ve Imperial Valley-06, Loma Prieta ve Kocaeli depremi ivme spektrumları

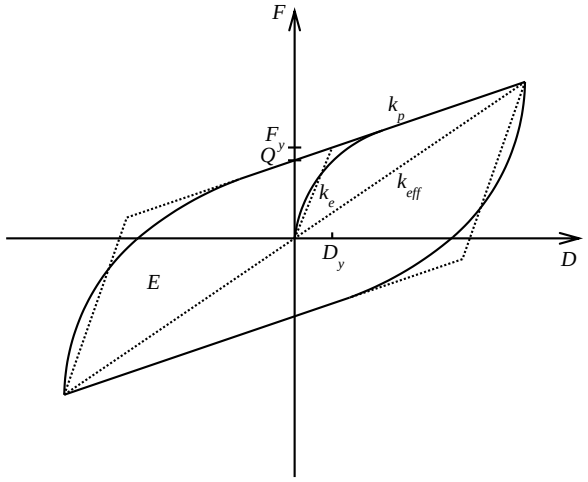
Tablo 1. Deprem özellikleri

Kayıt sıra No.	Ölçek kat-sayısı	Yıl	Deprem adı	Büyük-lük	Faya uzaklık (km)	V_{s30} (m/sec)
161	3.052	1979	Imperial Valley-06	6.53	8.54	209
803	1.945	1989	Loma Prieta	6.93	8.48	348
1158	1.667	1999	Kocaeli	7.51	13.6	282

Kurşun Çekirdekli Yalıtım Cihazıyla Deprem Yalıtımı Tasarımı

Deprem yalıtımı tasarımı Naeim ve Kelly (1999) tarafından kapsamlı olarak ele alınmıştır. ASCE (2010) ve TBDY (2016) yalıtım cihazı tasarımı ve uygulamasında uyulması gereken kuralları tarif etmektedir. Bu çalışmada yer alan deprem yalıtımı tasarımı kurşun çekirdekli yalıtım cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve detayları bu bölümde açıklanmıştır.

Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım cihazının kuvvet şekil değiştirme eğrisi Şekil 3'te gösterildiği gibi çift doğruyla idealize edilebilir. Yalıtım cihazının karakteristik dayanımı Q, elastik rijitliği k_e ve akma sonrası rijitliği k_p idealize edilen çift doğrultulu grafik üzerinde Şekil 3'te gösterildiği gibi tarif edilebilir.



Şekil 3. Kurşun çekirdekli yalıtım cihazı kuvvet şekil değiştirme eğrisi

Karakteristik dayanım Q aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q = \sigma_L A_L \tag{3}$$

Burada σ_L kurşunun akma dayanımı olup genelde 8 MPa alınmaktadır. A_L kurşun çekirdeğin en kesit alanıdır. Elastik rijitlik k_e genelde akma sonrası rijitlik k_p'nin 10 katı alınır. k_p aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$k_p = \frac{GA_r}{T_r} \tag{4}$$

Burada G kauçuğun kayma modülü olup genelde 0.4 ~ 0.7 MPa arasında değişmektedir ve bu çalışmada 0.6 MPa alınmıştır. A_r kauçuğun en kesit alanıdır. T_r kauçuk katmanlarının toplam kalınlığıdır. Etkin rijitlik k_{eff} maksimum değerleri birleştiren eğrinin eğimi olarak aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} \qquad \text{ve} \qquad D \geq D_y \tag{5}$$

Burada D maksimum yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Yalıtım cihazının akma yer değiştirmesi D_y aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \tag{6}$$

Bir çevrimde tüketilen enerji E bir çevrimde taranan alan olarak aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$E = 4Q(D - D_y) \tag{7}$$

Etkin sönüm oranı β_{eff} bir çevrimde tüketilen enerjiye bağlı olarak aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

$$\beta_{eff} = \frac{E}{2\pi k_{eff} D^2} \tag{8}$$

Akma yer değiştirmesine karşı gelen akma kuvvet F_y ve en büyük yer değiştirmeye karşı gelen maksimum kuvvet F sırasıyla aşağıda verildiği gibi elde edilir:

$$F_y = D_y k_e \tag{9}$$

$$F = Q + Dk_p \tag{10}$$

Yalıtımlı sistemin etkin periyodu T_{eff}, etkin rijitlik k_{eff} ve sistemin toplam sismik ağırlığı W'den elde edilen kütlesi M yardımıyla aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$T_{eff} = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} \tag{11}$$

Yalıtımlı sistemin tasarım (maksimum) yer değiştirmesi spektral ivme S_{a1} ve yerçekimi ivmesi g kullanılarak aşağıda verildiği gibi elde edilebilir:

$$D = \frac{gS_{a1}T_{eff}}{4\pi^2 B_D} \tag{12}$$

Burada B_D etkin sönüme bağlı bir katsayı olup ASCE (2013)'te aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$B_D = \frac{4}{5.6 - \ln\left(100\beta_{eff}\right)} \tag{13}$$

Yalıtımlı sistemin taban kesme kuvveti V_b aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir:

$$V_b = K_{eff} D \tag{14}$$

Etkin sönüm katsayısı C_{eff} aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$C_{eff} = 2\beta_{eff}\sqrt{MK_{eff}}. \tag{15}$$

Sayısal analizlere tabi tutulan 3 katlı ve 2 katlı binalarda kullanılan kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım cihazı özellikleri iterasyonla Tablo 2'te verildiği gibi belirlenmiştir. Deprem yalıtımı tasarım parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Sayısal Analiz

Yalıtımlı binaların ETABS veya SAP2000 programlarıyla doğrusal-olmayan 3 boyutlu analiz modelinde yalıtım cihazları İzolatör (isolator) olarak modellenmektedir. Yalıtım cihazları genel olarak çekme kuvveti taşımadıklarından dolayı yalıtım cihazı çekme kapasitesinin analizde dikkate alınmaması için Boşluk (gap) elemanları kullanılmaktadır. Boşluk elemanlarının kullanılması özellikle perde uçlarında meydana gelebilecek yukarıya doğru hareketin doğru olarak elde edilmesinde önem kazanmaktadır.

Tablo 2. Deprem yalıtım cihazı özellikleri

Yalıtım cihazı özellikleri	3 katlı bina	2 katlı bina
Dış çapı (mm)	1300	1200
Kurşun çekirdek çapı (mm)	300	280
Kauçuk katman sayısı	42	36
Kauçuk katman kalınlığı (mm)	8	8
Çevre koruma katmanı (mm)	20	20
Yalıtım cihazı sayısı	72	72

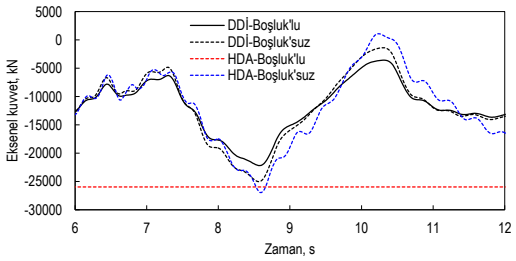
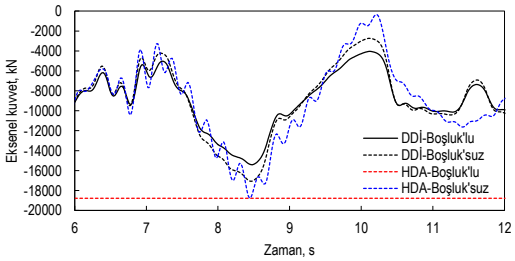
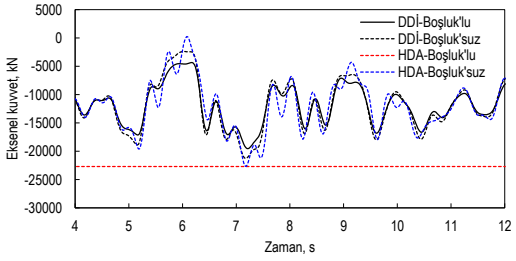
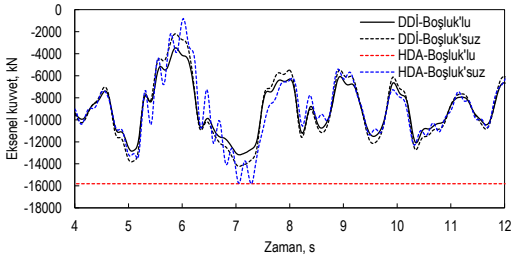
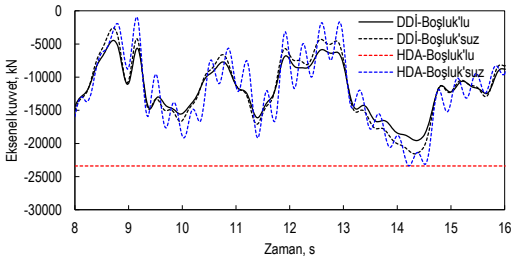
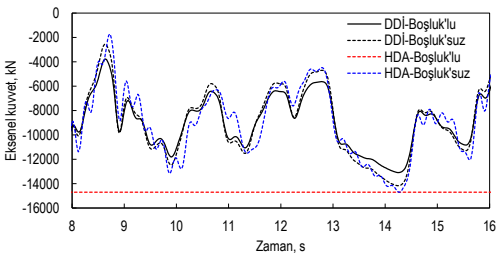
Tablo 3. Deprem yalıtımı tasarım parametreleri

Bina	W (kN)	D (m)	K_{eff} (kN/m)	T_{eff} (s)	β_{eff}	$\frac{V_b}{W}$
3 katlı	498285	0.570	233013	2.93	0.19	0.27
2 katlı	388164	0.508	230320	2.60	0.18	0.30

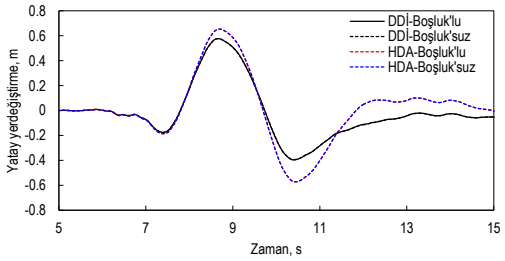
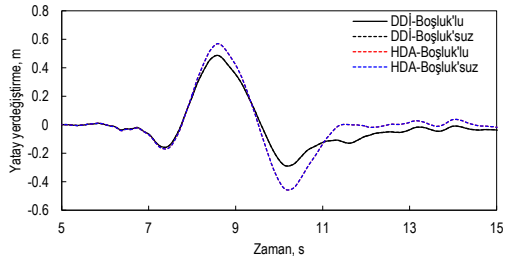
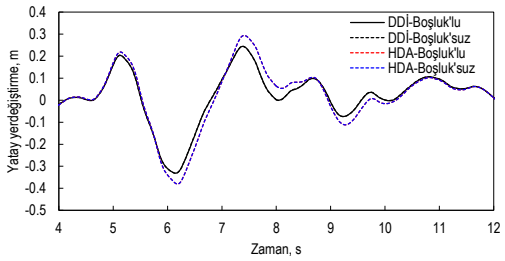
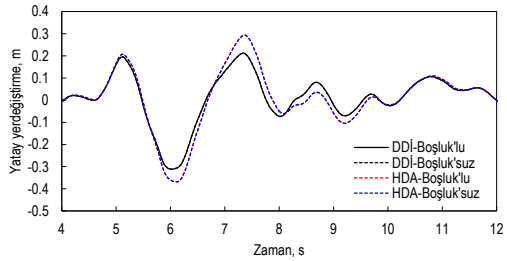
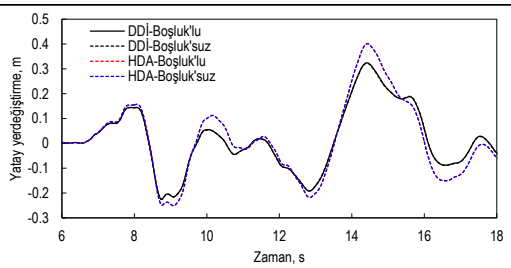
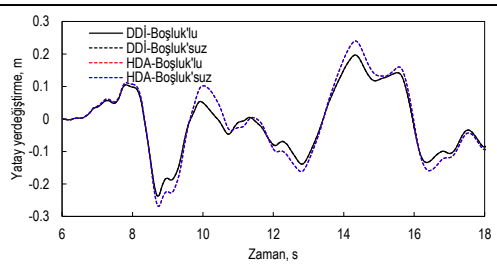
Seçilen depremlerin ivme kayıtları kullanılarak ETABS yazılımıyla HDA ve SAP2000 yazılımıyla DDİ analizi gerçekleştirilmiştir. 3 katlı ve 2 katlı binaların zaman geçmişi analizlerinden elde edilen, perde uç bölgesinde yer alan bir adet yalıtım cihazına ait eksenel kuvvet, yatay yer değiştirme, düşey yer değiştirme ve kat ivmesi zaman geçmişleri sırasıyla Tablo 4, Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7'de grafik halinde verilmiştir.

Yalıtım cihazı eksenel kuvveti zaman geçmişi grafiklerinden görüldüğü gibi a) HDA yönteminden elde edilen yalıtım cihazı eksenel kuvveti DDİ yönteminden elde edilenden daha büyüktür; b) Her iki yöntemde Boşluk elemanı kullanıldığında yalıtım cihazı eksenel kuvveti benzer mertebede veya daha küçük olarak elde edilmiştir.

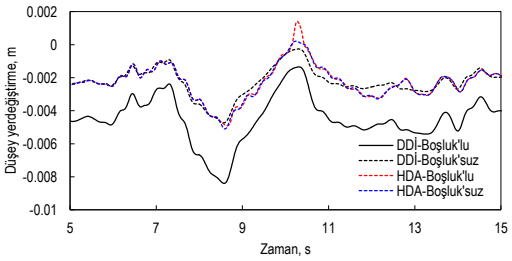
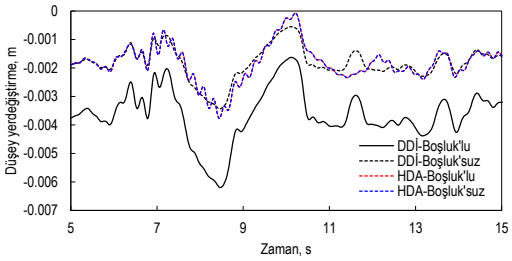
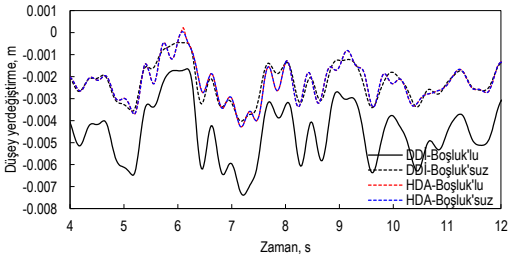
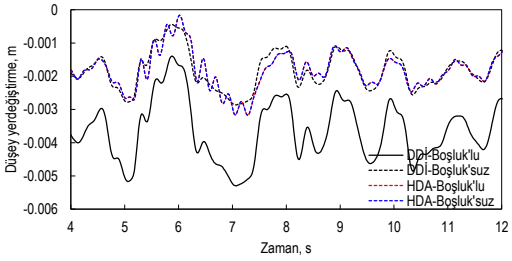
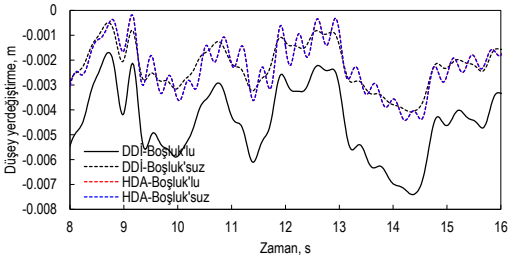
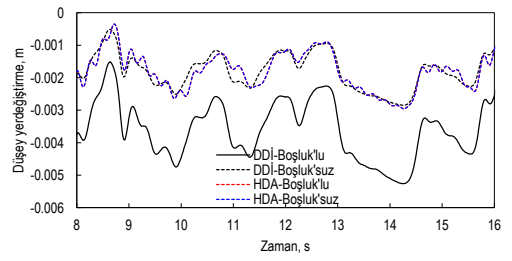
Tablo 4. Yalıtım cihazı eksenel kuvvet zaman geçmişi

Deprem	3 katlı bina	2 katlı bina
Imperial Valley-06		
Loma Prieta		
Kocaeli		

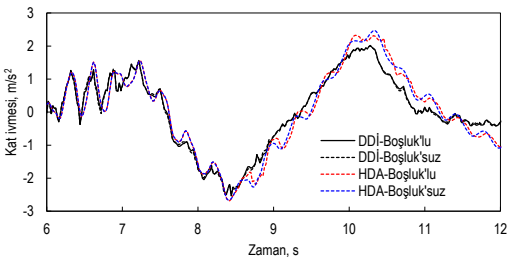
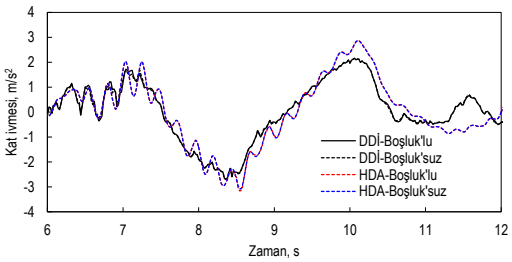
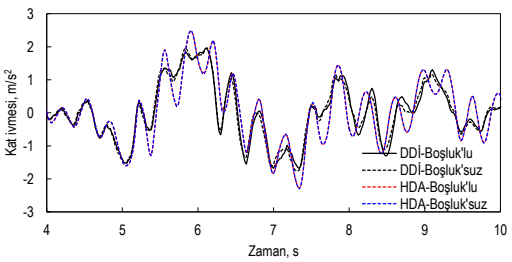
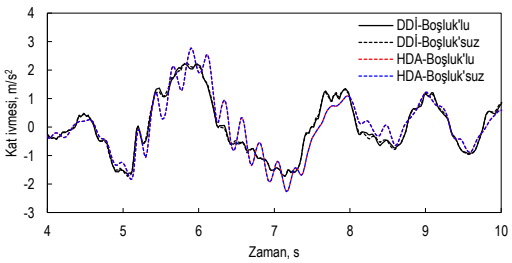
Tablo 5. Yalıtım cihazı yatay yer değiştirme zaman geçmişi

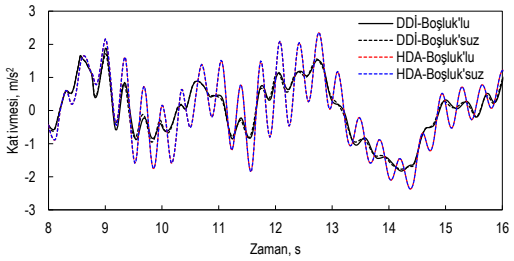
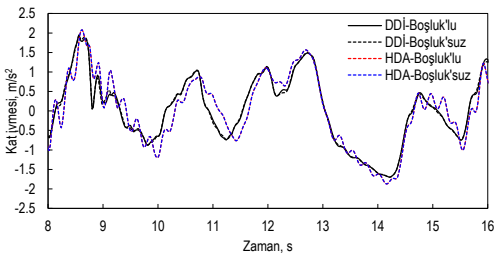
Deprem	3 katlı bina	2 katlı bina
Imperial Valley-06		
Loma Prieta		
Kocaeli		

Tablo 6. Yalıtım cihazı düşey yer değiştirme zaman geçmişi

Deprem	3 katlı bina	2 katlı bina
Imperial Valley-06		
Loma Prieta		
Kocaeli		

Tablo 7. Kat ivmesi zaman geçmişi

Deprem	3 katlı bina	2 katlı bina
Imperial Valley-06		
Loma Prieta		

Kocaeli		

Deprem yalıtımı cihazının yatay yer değiştirme sonuçları yaklaşık aynı olmakla birlikte, HDA yönteminden elde edilen değerler bir miktar daha büyüktür. Ayrıca analiz modelinde Boşluk elemanı kullanılıp kullanılmaması yatay yer değiştirme sonuçlarını değiştirmemektedir.

Yalıtım cihazının düşey doğrultudaki hareketiyle ilgili olarak a) HDA yönteminden elde edilen yukarıya doğru hareket DDİ yönteminden elde edilenden daha büyüktür; b) Her iki yöntemde Boşluk elemanı kullanıldığında yukarıya doğru hareket daha büyük olarak elde edilmiştir.

Kat ivmeleriyle ilgili olarak a) HDA yönteminden elde edilen kat ivmesi DDİ yönteminden elde edilenden daha büyüktür; b) Her iki yöntemde Boşluk elemanı kullanıldığında kat ivmesi daha büyük olarak elde edilmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada kullanılan örnek yalıtımlı binalar üzerinde 3 farklı deprem için gerçekleştirilen doğrusal-olmayan zaman geçmişi analizi sonuçlarına dayalı olarak HDA ve DDİ yöntemleriyle ilgili elde edilen sonuçlar ve uygulamaya yönelik öneriler aşağıda verilmiştir:

1) Yalıtım cihazı eksenel kuvveti, yatay yer değiştirmesi, kat ivmesi ve düğüm noktasının düşey hareketi açısından HDA yöntemi tasarımı güvenli tarafta bırakan sonuçlar vermektedir.
2) Boşluk elemanı kullanıldığında yalıtım cihazı eksenel kuvveti her iki yöntemde benzer mertebede veya daha küçük olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla güvenli tarafta kalmak amacıyla yalıtım cihazı maksimum eksenel kuvvetinin elde edilmesinde Boşluk'lu ve Boşluk'suz modelin birlikte kullanılması önerilir.
3) Boşluk elemanı kullanıldığında HDA yönteminde kat ivmesi ve düğüm noktasının yukarıya doğru hareketi daha büyük olarak elde edilmiştir.
4) Analiz modelinin Boşluk'lu veya Boşluk'suz olmasının yalıtım cihazı yatay yer değiştirmesi açısından bir önemi yoktur.
5) Yalıtım cihazları çekme kuvveti taşımadıklarından dolayı düğüm noktasındaki yukarıya doğru hareketin belirlenmesinde Boşluk elemanı kullanılması önem arz etmektedir.

Semboller

A_L : kurşun çekirdeğin en kesit alanı
A_r : kauçuğun en kesit alanı
B_D : etkin sönüme bağlı bir katsayı
$\mathbf{C}$: sönüm matrisi
C_{eff} : etkin sönüm katsayısı
D : maksimum yer değiştirme
D_y : akma yer değiştirmesi
E : bir çevrimde tüketilen enerji
F : maksimum kuvvet
F_y : akma kuvvet
$\mathbf{F}(t)$: dış yük vektörü
G : kauçuğun kayma modülü
g : yerçekimi ivmesi
k_e : yalıtım cihazının elastik rijitliği
k_p : yalıtım cihazının akma sonrası rijitliği
k_{eff} : yalıtım cihazının etkin rijitliği
K_{eff}: izolatör sisteminin toplam rijitliği
$\mathbf{K}$: rijitlik matrisi
M : kütle
$\mathbf{M}$: kütle matrisi
Q :yalıtım cihazının karakteristik dayanımı
$\mathbf{R}(t)$: dış yük vektörü
$\mathbf{R}_{NL}$: doğrusal olmayan eleman kuvvet vektörü
S_{aS} : kısa periyot için spektral ivme

S_{a1} : 1 saniye periyot için spektral ivme
T : bina titreşim periyodu
T_{eff} : etkin titreşim periyodu
T_r : kauçuk katmanlarının toplam kalınlığı
$\mathbf{u}(t)$: yer değiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{u}}(t)$: hız vektörü
$\ddot{\mathbf{u}}(t)$: ivme vektörü
V_b : taban kesme kuvveti
V_{s30}: zeminin kayma dalga hızı
W : sismik ağırlık
β_{eff} : etkin sönüm oranı
σ_L : kurşunun akma dayanımı

Kaynaklar

ASCE, (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7/10, Reston, VA.

ASCE, (2013). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE 41-13, Reston, VA.

Chopra, A.K., (2012). Dynamics of Structures, 4th Ed., Prentice Hall, NJ.

ETABS, (2011). Extended 3D analysis of building systems, Nonlinear Version 9.7.4. Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.

Naeim, F. ve Kelly, J.M., (1999). Design of Seismic Isolated Structures – From Theory to Practice, John Wiley and Sons, NY.

PEER, (2017). NGA-West2 Database of Pacific Earthquake Engineering Research Center, http://ngawest2.berkeley.edu.

SAP2000, (2017). Structural Software for Analysis and Design, Nonlinear Version 19. Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.

TBDY, (2016). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (taslak), T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

Wilson, E.L., (2002). Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, 3rd Ed., Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA.

Comparison of Dynamic Analysis Methods of Commercial Structural Analysis Software Used for the Analysis of Seismically Isolated Buildings

Extended abstract

Seismic base isolation technique has been successfully used to protect structural as well as nonstructural components from the damaging effects of earthquakes since many decades. Most of the seismically isolated structures have demonstrated well performance during the past earthquakes. The basic principle of the base isolation technique is to decouple the superstructure from the foundation or basement by means of more flexible and yielding isolation devices such as rubber or spherical sliding bearings. The isolation devices lengthen the vibration period and increase the damping capacity of the structure which result in reduction of the structural response to the earthquake ground acceleration (Naeim and Kelly, 1999).

Commercial structural analysis and design software ETABS and SAP2000 developed by Computers and Structures, Inc. are widely used to perform response history analysis of seismically isolated buildings. Two types of response history analysis module, namely Fast Nonlinear Analysis (FNA) and Nonlinear Direct Integration (NDI), are available in ETABS and SAP2000. In this paper, a comparative numerical study of FNA and NDI methods for two different seismically isolated buildings using three different earthquake ground motions is presented and practice-related recommendations are made.

The example buildings are assumed to be industrial facilities carrying heavy acceleration-sensitive equipment. The buildings have 3 and 2 stories with equal 6-m story height. The buildings have dual lateral force resisting system consisting of shear walls and moment resisting frames. The dimensions of the columns are 0.8 m x 1.0 m and 0.8 m x 1.1 m. The dimensions of the beams are 0.6 m x 1.1 m and 0.8 m x 1.1 m. The slab on top of the base isolators is 0.5-m thick with ribbed beams whose height is 1.2 m under shear walls and columns. The slab thickness of upper stories is 0.25 m. The shear wall thickness is 0.45 m. Selected concrete class is C40 with the characteristic strength fc = 40 MPa and reinforcing steel is S420 with the yield strength f_{sy} = 420 MPa. The equipment weight is taken as 10 kPa in addition to the superimposed dead loads. Live load is taken as 2 kPa uniformly for all area.

The parametric study is carried out under assumed maximum considered earthquake (MCE), having 2% probability of exceedance in 50 years, whose spectral accelerations at short period (S_{aS}) and period of 1 second (S_{a1}) are S_{aS} = 1.8 g and S_{a1} = 1.2 g, respectively. Bidirectional ground motion accelerations of Imperial Valley-06, Loma Prieta and Kocaeli earthquake scaled to the spectra (PEER, 2017) are used in the response history analysis.

The properties of the lead-rubber bearings defined by iterative calculations are as below:

Properties	*3-story building*	*2-story building*
Overall diameter (mm)	*1300*	*1200*
Lead diameter (mm)	*300*	*280*
Number of rubber layers	*42*	*36*
Thickness of rubber layer (mm)	*8*	*8*
Side cover thickness (mm)	*20*	*20*
Number of isolators	*72*	*72*

The design parameters of the isolated buildings are as below:

Building	W *(kN)*	D *(m)*	K_{eff} *(kN/m)*	T_{eff} *(s)*	β_{eff}	$\frac{V_b}{W}$
3-story	*498285*	*0.570*	*233013*	*2.93*	*0.19*	*0.27*
2-story	*388164*	*0.508*	*230320*	*2.60*	*0.18*	*0.30*

The following conclusions and practice-related recommendations are made based on the results of FNA and NDI analysis:

1) *FNA generates results in terms of axial force and lateral displacement of the isolator, floor acceleration and uplift which make the design on the safe side.*
2) *It is recommended to use both options, the isolator models with and without Gap element, in obtaining the axial force of the isolator via FNA.*
3) *FNA generates larger floor acceleration and uplift.*
4) *Using Gap element with the isolator model has almost no effect on the lateral displacement of the isolator.*
5) *It is important to use Gap element in obtaining the uplift because the isolator doesn't carry tensile force.*

Keywords: *Seismic isolation, Fast Nonlinear Analysis, Nonlinear Direct Integration*