Üç Katlı bir Yapının Depreme Karşı Yarı Aktif Karma Kontrolü

G.Turan

Yrd. Doç. Dr. , İnşaat Müh. Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Urla-İzmir
Email: gursoyturan@iyte.edu.tr

ÖZET:

Üç katlı bir bina modelinin zemin izolasyonu sayesinde uzak depremlerden sorunsuz olarak korunduğu söylenebilmektedir. Ancak, tabandaki hareket miktarının izolatör sınırını zorlama ihtimali istenmeyen bir durumdur. Bir ikincisi de deprem kaynağının yakın mesafeden geliyor olma olasılığıdır. Diğer bir ifade ile zemin hareketi izolatörlerde büyük yer değiştirmelere sebep olursa, izolatörde yırtılma ve parçalanma oluşabilir ve ikinci sorun olan zemin hareketinin büyük periyotlara sahip oluşu izolatörlü binayı rezonansa sürükleyecektir. Bu çalışmanın amacı yukarıda bahsedilen olası iki durumdan korunabilmek için yarı aktif kontrol sisteminin geliştirilmesidir. Kontrol aygıtı olarak taban ile zemin arasında, sönümleme sabiti anlık değiştirilebilen, bir amortisör kullanılmaktadır. Hesaplanan kontrol algoritması ile bina davranışı ölçülüp duruma göre amortisör sabitini küçülterek veya büyüterek sistem davranışı her iki koşul için azaltılmaktadır. Amaçlanan kontrol yöntemi bilgisayar ortamında programlanıp deprem benzetişimi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar zaman eğrileri ve en büyük değerler olarak bir çizelgede sunulmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER : yarı-aktif karma kontrolü, üst kontrolcü, deprem davranış benzetimi

1. GİRİŞ

Yarı aktif sönümleyiciler güvenilir kontrol aygıtlarıdır ki, bu özelliklerinden dolayı yapı kontrolünde geniş yer almaktadırlar. Yapıdan enerji yutulması amacıyla amortisörler kullanılmaktadır. Sönümleme arttıkça, yapı deplasmanı ve hızı azalmakta, ancak ivmeler artmaktadır. İvme artışı sorun yaratmayacaksa, sönümleyicilerin kontrolü anlamsız olur. En büyük sönümleme ile en düşük deplasman ve hız değerleri elde edileceğinden bir kontrolcüye ihtiyaç olmayacaktır. İvmelerin sorun olabildiği yapılarda ise (örnek: müzeler) zemin izolatörlerin kullanımı söz konusudur. Sismik izolatörlerle zeminden izole edilmiş binalarda ilave olarak amortisörlerin kullanımı izolatörlerin aşırı deplasman yapıp hasar görmeleri engellenebilir. Buna karşın, sönümleyici bir elemanın sismik izolatörün etkisini azaltacağı bilinmesine rağmen, aşırı deplasman tehlikesini engelleyeceğinden faydalı bir işlevi olmaktadır.

Ayarlanabilir sönümlemeli amortisörlerin modellemesi ve uygulaması için bir takım araştırmalar yürütülmüştür. Kurata vd. (1999) tasarladıkları binada sönümleme kuvveti 1000 kN olan bir takım amortisörler kullanılmış. Sönümleme ayarı için ise sadece 70 Watt'lık elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Wongprasert ve Symans (2005) ayarlanabilen delikli bir amortisör kullanarak 1:4 oranındaki zemin izolatörlü üç katlı bir bina çerçevesinin davranışını geliştirmeye çalışmışlardır. Sistem davranışın benzetimi hem sayısal olarak bilgisayar ortamında, hem de gerçek modeli ile deprem simülatörü üzerinde yapılmıştır. Laboratuvar uygulamasında zemin izolatörün boyutlandırılamaması sonucu sistemin birinci periyotu izolasyon sağlanamayacak derecede az büyütülebilmiştir. Aldemir ve Bakioğlu (2000) tek serbestlik dereceli bir sistemde bulunan bir amortisör için zamana bağlı bir kontrolcü tasarlamışlardır. Kontrollü davranışın kontrolsüzünkine oranı %18 daha düşük olduğunu gösterebilmişlerdir. Çetin vd. (2009) altı katlı bir binanın zemin katında bulunan Manyeto Reolojik (MR) sıvılı amortisörün kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Bu cihaz ayarlanabilir normal sıvılı amortisörden farklı olmasına karşın, ilkeleri aynıdır. Yapıyı tek serbestlik dereceli bir sisteme indirgeyip, buna göre gürbüz Hinf kontrolcü tasarlamışlardır. Ribakov ve Gluck (2002) de zemin izolatörlü bir binanın kontrolünde kullanılan MR

amortisör için bir kontrolcü tasarlamışlardır. Bu kontrolcü belli bir deplasman aşılınca devreye sokulduğunda çok etkin olduğu gösterilmiştir.

Bu çalışma kapsamında izole edilmiş üç katlı binada farklı sönümlemeler (farklı amortisör vana açıklıkları) için tasarım modelleri oluşturulmuş, ve bunların her birine doğrusal karesel düzenleyici bazlı kontrolcüler tasarlanmıştır. Kontrol gereksinimine karar veren ve farklı sönümleme durumuna göre kontrolcülerin arasında geçişi sağlamak üzere bir üst kontrolcü oluşturulmuştur. Bunun sayesinde düşük genlikli izolatör deplasman ve hızlarında amortisör sönümlemesi en düşük konumdadır. Ancak, belli bir eşik değerin üzerine çıkıldığında üst kontrolcü sayesinde optimum sönümleme için gereken amortisör vana ayarları yapılmaktadır.

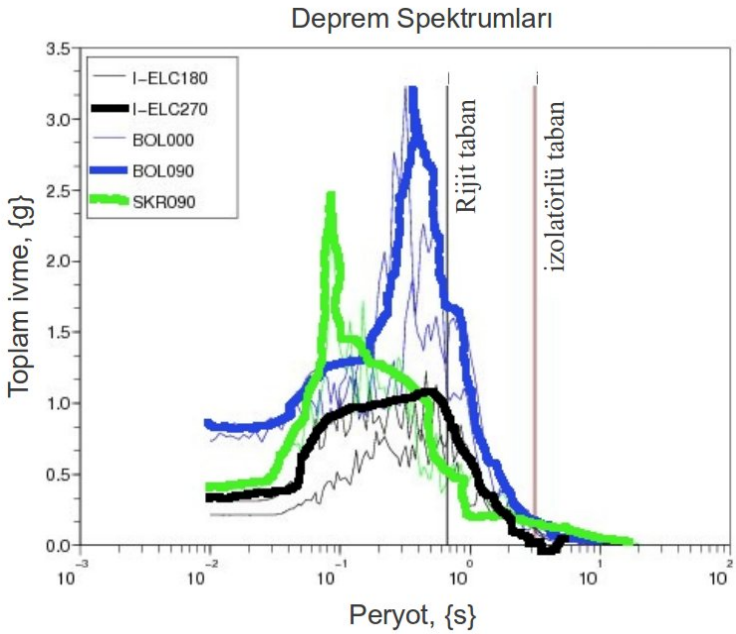
2. ÜÇ KATLI VE ÜÇ BOYUTLU BINA MODELİ

Bu çalışma için üç boyutlu ve üç katlı bir bina modeli oluşturulmuş, ve elastomer bazlı zemin izolatörleri ile her iki yönde ikişer olmak üzere toplam dört ayarlanabilir amortisör tasarlanmıştır (Şekil 1). Bina modelin oluşturulmasında üç boyutlu çelik kiriş elemanları kullanılmıştır (kolonlar: 17.5mm x 17.5mm, kirişler: 90 x 90 x 5). Kat yükseklikleri 80cm olup, binanın oturma alanı 100cm x 60cm'dir. Bina modelin hareketi zeminde ve dikey yönde kısıtlanmıştır. Amortisörlerin bağlandığı iki kolon üzerindeki düğüm noktaların yatay yöndeki serbestlik dereceleri hariç, geriye kalanlar statik kondensasyon ile serbestlik dereceleri vektöründen kaldırılmışlardır.

Elde edilen sistem ikinci dereceden diferansiyel bir denklem ile ifade edilmekte olup, rijit zeminli bina için 12, zemin izolatörlü bina için ise 16 serbestlik derecesine sahiptir. İki sistemin periyotları ve davranış şekilleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Rijit tabanlı binanın periyotları T_0, izolatörlü olanınki ise T_i ile ifade edilmiştir. Davranış şekilleri incelendiğinde ilk üç periyotların zemin izolatörlü binanın tabanındaki harekete bağlı olduğu anlaşılmaktadır, ki bunlara izolasyon şekilleri denilebilmektedir. 13ncü ve üstü periyota bağlı davranışlar zemin izolatöründe gerçekleşmekte ve frekansları çok yüksek olduğundan deprem tarafından dürtüklenmeyecekleri gibi, bunlara bağlı olarak oluşabilecek deplasman ve hız genlikleri de çok düşük olacaktır. Bundan dolayı sistemin genel davranışında bir kayba uğramaksızın izolatörlü binanın son dört davranış şekilleri çıkarılmıştır.

Rijit temelli bina modelin birinci periyotu 0,62 saniye olup, bu periyota bağlı şeklin uygulanan depremlerden etkileniş miktarı şekil 2'de gösterilmektedir. Binanın depremlerden izole edilmesi amacıyla temel periyotun üç saniyenin üzerine çıkması gerekir ki, bunun için izolatör rijitlikleri 1200 N/m olarak seçilmişlerdir (kıyaslama olarak kolon rijitlikleri 36.600 N/m'dir). Buna istinaden, izole edilmiş binanın temel periyotu 3,19 saniyeye uzatılmış ve şekil 2'de görülebildiği gibi binanın toplam ivme davranışı önemli derecede azalmıştır.

Şekil 1: Üç boyutlu bina modeli



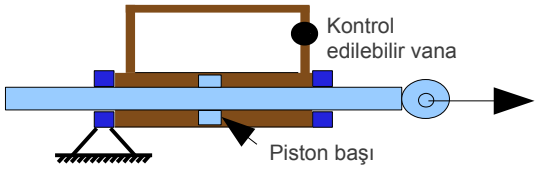
Şekil 2: Binanın rijit ve izolatörlü zemin durumları için deprem Spektrum eğrileri

Çizelge 1. Titreşim modları

Mod #	Rijit temelli Bina Modeli		İzolatörlü Bina Modeli	
	Mod	T_0 (sec)	Mod	T_i (sec)
1	Trans - x	0.6240327	Trans-x	3.195628
2	Trans - y	0.6136168	Trans - y	3.1149813
3	Twist - xy	0.5465168	Twist - xy	2.9001827
4	Trans - x	0.2223123	Trans - x	0.3212533
5	Trans - y	0.2185406	Trans - y	0.2999065
6	Twist - xy	0.1946937	Twist - xy	0.2775705
7	Trans - x	0.1535019	Trans - x	0.1688653
8	Trans - y	0.1508431	Trans - y	0.1653284
9	Twist - xy	0.1344292	Twist - xy	0.1496442
10	Trans - x	0.0102958	Trans - x	0.1315104
11	Trans - y	0.0102450	Trans - y	0.1246109
12	Twist - xy	0.0102001	Twist - xy	0.1084598
13			skew - B	0.0090029
14			skew - 2	0.0089442
15			skew - 1	0.0088889
16			skew - 3	0.0080344

3. YARI AKTİF AMORTİSÖR

Hidrolikli bir piston değiştirilerek iki hazne arasında bağlantı oluşturulmuş ve bu bağlantıda step motoru ile açıklığı ayarlanabilen bir vana yerleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3: Kullanılan ayarlanabilir amortisörün kesiti

Amortisör üzerinde oluşturulan kuvvetin piston başlık hızı ile doğru orantılı olduğu varsayılmaktadır.

$$F_d = -c_d \quad \dot{x}_d \tag{1}$$

Burada F_d amortisör kuvveti, $\dot{x}_d$ amortisör hızı ve c_d ise amortisörün ayarlanabilir sönümleme sabitidir. Bu çalışmada kullanılan amortisörün sönümleme miktarı 5000 ile 25000 Ns/m olarak seçilmiştir. Üst sınırı oluştururken, depremden kaynaklanan hız göz önünde bulundurularak cihazın iç kuvveti 5000 N'yi aşmayacak şekilde ayarlanmıştır. Alt sınır ise vananın tamamen açık olduğu durumdaki sönümleme miktarıdır.

4. KONTROLCÜ TASARIMI

Bu çalışmada hibrit kontrol, genlik planlaması, tasarımı yapılarak binanın davranışı kontrol edilmiştir. Zemin izolatörlü ve dört amortisörlü binanın her amortisör vana konumu olasılığı için birer model oluşturulmuştur. Her bir sönümleyicinin sabiti 5000 Ns/m aralıkla değiştirilmiş ve bu şekilde her amortisör başına beş farklı sönümleme durumu oluşmuştur. Bütün bina için ise 5^4=625 farklı sönümleme durumu ortaya çıkmaktadır. Her durumu göz önüne alabilecek, doğrusal karesel düzenleyici yöntemi kullanılarak, birer kontrolcü tasarlanmıştır (toplam 625 adet). Deprem davranış benzetimi esnasında gerek duyulan kuvvet hesaplanmakta ve bu kuvvet vektörüne en yakın ulaşabilecek dört amortisörün sönümlemeleri hesaplanmaktadır.

4.1 Doğrusal Karesel Düzenleyici Tasarımı

Zeminden izole edilmiş binaya kontrol kuvveti etki eden modelinin hareket denklemi aşağıda sunulmaktadır.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\Gamma_{eq}\ddot{x}_g + \Gamma F_c \tag{2}$$

Burada, M, C ve K değişkenleri sırasıyla kütle, sönümleme ve rijitlik matrislerini temsil ediyorlar. Yapının zemine göre göreceli kat deplasmanı x ve zamana bağlı türevleri ile hız ve ivmeleri hesaplanmaktadır. Denklemin sağ tarafındaki birinci terimi deprem sarsıntısının, ikinci terimi ise kontrol kuvvetin etkisini temsil etmektedir. Depremden kaynaklanan zemin ivmesinin ($\ddot{x}_g$) etkisi, M ve Γ_{eq} ile çarpıldıktan sonra binanın katlarına etki ettiriliyor. Benzer şekilde, optimum kontrol kuvveti de Γ ile çarpıldıktan sonraki etkisi katlara aktarılıyor. Optimum kontrol kuvveti, F_c, amortisörler vasıtası ile elde edilmektedir ve dört ayrı amortisör üzerindeki kuvveti temsil etmektedir.

$$F_c = \left\{ F_d^{(1)}, F_d^{(2)}, F_d^{(3)}, F_d^{(4)} \right\}^T \tag{3}$$

Amortisör kuvveti, edilgen bir cihaz olup yapının hızına bağlı olduğundan dolayı denklem 2'nin sol tarafına aktarılabilir.

$$M\,\ddot{x}+\left(C+\Gamma\,C_d\,\Gamma^T\right)\dot{x}+K\,x=-M\,\Gamma_{eq}\,\ddot{x}_g \tag{4}$$

Optimum kontrol kuvvet hesabı için birinci dereceden diferansiyel denklem geçişi sağlamak amacıyla $q=\left\{x^T,\dot{x}^T\right\}^T$ değişkeni kullanarak aşağıda gösterilen sistem denklemi gösterilmektedir.

$$\dot{q}=A\,q+B_1\,\ddot{x}_g+B_2\,u \tag{5}$$

i, B_1 ve B_2 matrisleri aşağıda ifade edilmekte olup, u değişkeni ise mevcut sönümleme konumuna ilave olarak gereken optimum kontrol kuvvetidir.

$$A=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M^{-1}K & -M^{-1}\left(C+\Gamma\,C_d\,\Gamma^T\right)\end{bmatrix}$$
$$B_1=\begin{bmatrix}0\\ \Gamma_{eq}\end{bmatrix}\quad B_2=\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}\Gamma\end{bmatrix} \tag{6}$$

Uygulanan kontrolün amacı, bina taban deplasmanının küçük tutulmaya çalışılmasıdır. Bunu gerçekleştirmek için aşağıda belirtilen amaç fonksiyonunu oluşturan Q ve R değişkenleri tayin edilmişlerdir.

$$V(q)=\int_0^\infty q^T\,Q\,q+u^T\,R\,u\;\;dt \tag{7}$$

Burada Q 'nun diyagonali üzerindeki binanın taban deplasman çarpanları 1 ve kalanları sıfır olarak seçilmiş, R 'nin de diyagonalleri ise birkaç davranış benzetimleri sonrasında 1e-8 olarak atanmıştır. Daha büyük R değerleri için kontrol uygulaması verimsiz olmakta, daha küçük değereler için ise gereken kontrol kuvveti amortisörler tarafından sağlanamamaktadır. Bu doğrultuda hesaplanan optimum kontrol kuvveti denklem 7 ile ifade edilmektedir.

$$u^o=-R^{-1}\,B_2^T\,\bar{P}\,q^o\;=\;K_c\,q^o \tag{8}$$

Burada K_c geri besleme matrisi, q^o binanın optimum deplasman ve hız değerleridir ve u^o da (seçilmiş Q ve R için) optimum kontrol kuvvetidir. $\bar{P}$ ise Riccati denklemin çözümüdür.

$$A^T\,\bar{P}+\bar{P}\,A+Q-\bar{P}\,B_2\,R^{-1}\,B_2^T\,\bar{P}=0 \tag{9}$$

Bu şekilde 625 farklı sönümleme konumu için geri besleme kazanç matrisleri, K_c, elde edilmiştir. Bu matrisler, davranış benzetimi esnasında, ihtiyaca yönelik, kullanılmaktadır.

4.2 Üst Kontrolcü (Genlik Planlaması)

Yukarıda bahsedilen 625 adet geri besleme kazanç matrisleri arasında geçişi sağlamak amacıyla bir üst kontrolcü ya da diğer adıyla "genlik planlaması" tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan davranış benzetimi esnasında her zaman diliminde optimum kontrol kuvveti hesaplanmaktadır. Bir önceki amortisör konum ayarına göre yapılan bu hesap, bir sonraki zaman diliminde amortisörlerin konumunu belirleyecektir. Her bir cihazın oluşturması gereken optimum kuvvet değeri, o cihazın hızına bölündükten sonra optimum sönümleme sabiti hesaplanmış olur (denklem 1). Mevcut sönümleme dilimleri arasından (5000 ile 25000 Ns/m ve 5000 Ns/m aralıklı) en yakın olanı seçilir ve bir sonraki zaman diliminde benzetimi gerçekleştirilir.

Amortisörler, edilgen aygıtlar olduklarından dolayı, sistemden sadece enerji emebilirler – enerji ekleyemezler. Bu yüzden sönümleme kuvveti, aygıt hızının sadece ters yönünde etki edebilir. Dolayısıyla hesaplanan optimum sönümleme sabiti sıfırdan küçük ise, gereken kuvveti oluşturmak mümkün olmayacaktır. Bu durumda, vananın tamamen açık olduğu ve sönümlemenin 5000 Ns/m olduğu duruma geçilmektedir. Buna ilave olarak, sayısal bir önlem olarak, en küçük aygıt hızı 1 mm/s alındığında "sıfıra bölünme" hatasının önüne geçilmektedir. Bu işlem ile yapı davranışı çok fazla etkilenmeyecektir, çünkü en büyük sönümleme ile bu durum 25 N'luk bir kuvvet oluşturmaktadır.

Üst kontrolcünün ikinci görevi de optimum kuvvetin ne zaman uygulanacağı sorununu üstlenmektir. Hareketin başında amortisör sabiti en düşük seviyede olup, aktif kontrol uygulaması yok. Dört amortisörden birinin deplasmanı, öngörülen sınırı aştığında (bu çalışma için 15 mm) üst kontrolcü devreye giriyor. Üst kontrolcü devreye girdikten sonra amortisörler optimuma yakın kuvvet uygulamaktadırlar. Kontrolcünün devreden çıkması için ise izolatör deplasmanı emniyet sınırları içerisinde bir minimum oluşturması gerekmektedir.

5. DAVRANIŞ BENZETİMLERİ

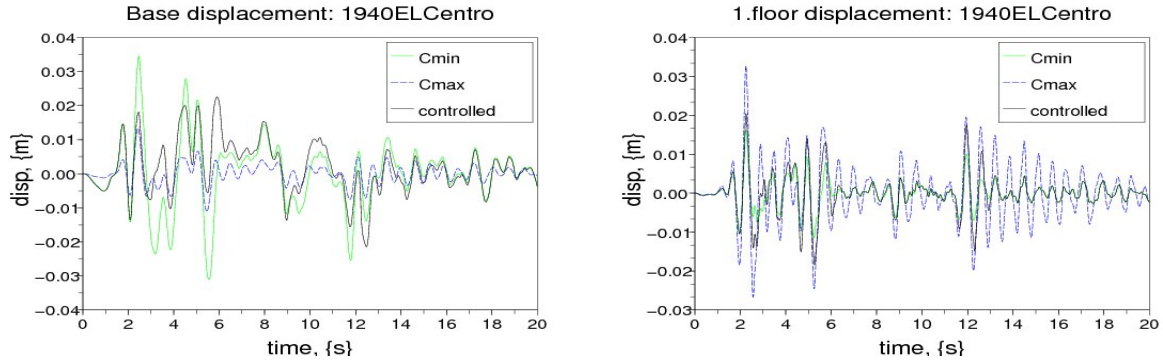
Yarı aktif karma kontrollü üç boyutlu binanın davranış benzetimi üç farklı deprem ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar, 19.05.1940 Imperial Valley (ElCentro istasyonu), 12.11.1999 Düzce (Bolu istasyonu) ve 17.08.1999 Kocaeli (Sakarya istasyonu) depremlerin düzeltilmiş ivme kayıtlarından oluşmaktadırlar. Deprem kayıtlarının Kuzey-Güney ve Doğu-Batı istikametindeki farklı kayıtlar bina modelimizin birbirine dik yönlerine uygulanmıştır. Ancak, Sakarya istasyonu Kuzey-Güney kaydı bulunmadığından, her iki yöne Doğu-Batı kaydı uygulanmıştır. Bununla birlikte bu depreme ait ilk 30 saniye süresince bir hareket olmadığından dolayı, bu ilk kısım davranış benzetimine dahil edilmemiştir. Kullanılmakta olan deprem kayıtlarının taslak hareket değerleri tablo 2'de sunulmaktadır.

Tablo 2. Deprem Karakteristikleri

Deprem	**Tarih**	**PGA, {g}**	**PGV, {cm/s}**	**PGD, {cm}**
I-ELC-270	1940	0.215	30.2	23.91
I-ELC-180	1940	0.313	29.8	13.32
Bolu-000	1999	0.728	56.4	23.07
Bolu-090	1999	0.822	62.1	13.55
SKR-090	1999	0.376	79.5	70.52

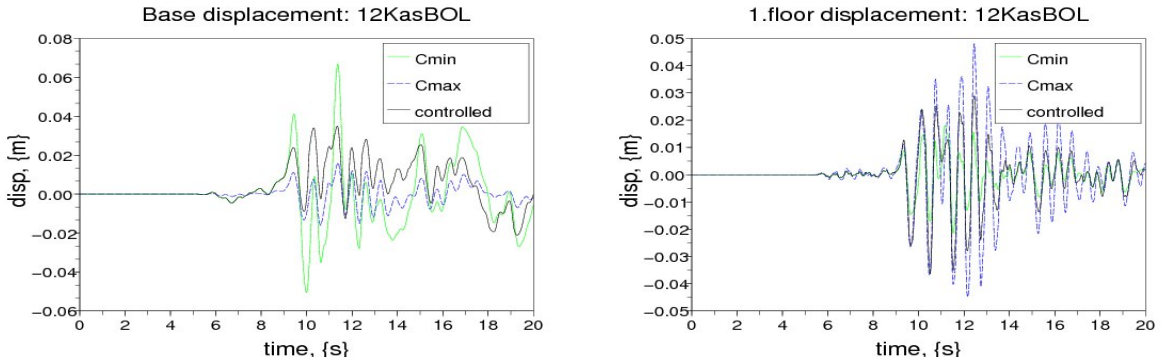
Diferansiyel denklemin çözümünde Newmark'ın β metodu kullanılmış ve binanın deprem davranışı her deprem için sadece 20 saniye süresince hesaplanmıştır. Binanın ana hareketi bu zaman diliminde gerçekleştiğinden dolayı sonuçların sunumu açısından daha yalın grafikler elde edilmiş ve benzetim zamanından da tasarruf sağlanmış oldu.

Binanın deprem davranışı Şekil 4, 5 ve 6'da her bir deprem için gösterilmektedir. Her şekil üzerinde binanın minimum, maksimum ve yarı aktif kontrollü davranışı sergilenmektedir. Yukarıda tarif edilmiş olduğu gibi, bu binanın kontrol amacı, izolatör seviyesindeki taban hareketini tehlikeli boyutlara ulaştırmadan üst yapı deplasmanlarını mümkün olduğu kadar düşük seviyede tutmaktır. Üst yapı açısından en az sönümlemeli ve hatta tamamen sönümlemesiz durum en az kat ötelenmelerine sebebiyet veriyorsa da, izolatörler için bu durum tam tersidir. Amortisör ne kadar sert davransa, izolatörlerdeki hareket o kadar azalacaktır. Bu bilgiler ışığında yukarıdaki şekilleri incelediğimizde kontrolcünün amacına ulaştığını söylemek mümkündür.



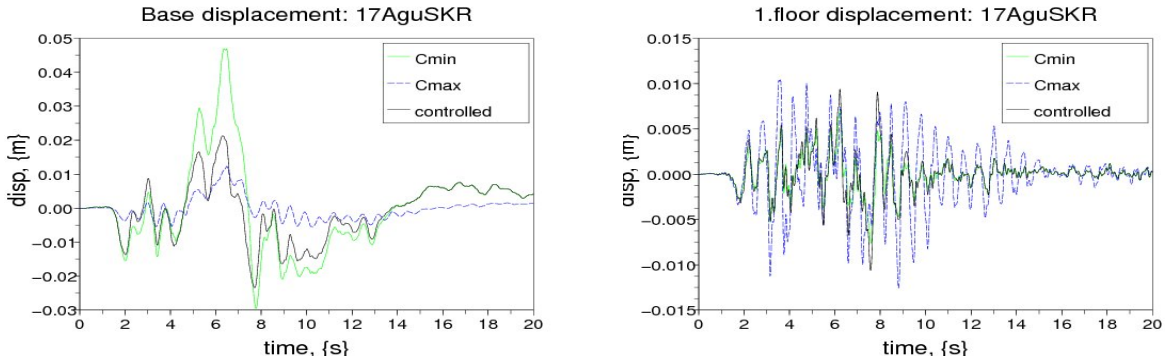
a) b)

Şekil 4: 1940 ElCentro depremi için Taban (a) ve 1.kat (b) deplasman davranışı (No:3, x-yönü)



a) b)

Şekil 5: 12 KasBOL depremi için Taban (a) ve 1.kat (b) deplasman davranışı (No:3, x-yönü)



a) b)

Şekil 6: 17 AguSKR depremi için Taban (a) ve 1.kat (b) deplasman davranışı (No:3, x-yönü)

Tablo 3. Davranış Benzetim Sonuçları

	Deplas. (rölatif)	C_{min}	C_{max}	C_{Kontr}	$\frac{C_{kontr} - C_{min}}{C_{min}}$
El Centro	Taban {m}	0.035	0.013	0.022	-35 %
	1st Floor {m}	0.016	0.033	0.020	26 %
Bolu	Taban {m}	0.067	0.016	0.035	-48 %
	1st Floor {m}	0.022	0.048	0.036	69 %
Sakarya	Taban {m}	0.047	0.012	0.023	-50 %
	1st Floor {m}	0.0076	0.0126	0.0106	39 %

Tablo 3'te her üç davranış benzetimi için taban ve 1.kat deplasmanının en büyük mutlak değerleri gösterilmektedir. Son sütunda da kontrollü sönümlemenin sağladığı kazanç ifade edilmektedir. Eksi işaretli olan sayılar, hareketin azaldığını, sıfırdan büyük olanlar ise, hareketin arttığını ifade etmektedir. ElCentro depremi benzetimi sonucu taban hareketinde %35'lik bir azalma söz konusu iken 1. kat deplasmanında %26'lık bir artış var. Türkiye depremleri için ise, görüldüğü gibi, bu rakamlar biraz daha yüksek.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada sismik izolatörlü, üç katlı ve üç boyutlu bir bina dört amortisörle kontrol edilmiştir. Herbir sönümleme durumu için kontrolcü tasarlanmış ve bir üst kontrolcü tarafından gerekli zamanlarda devreye sokulmuşlardır. Davranış benzetimleri sonucunda, bu karma kontrol uygulamasının izolatör seviyesini büyük deplasmanlardan koruyabildiği, üst yapının davranışını da sınırlı tutabildiği görülmektedir.

7. TEŞEKKÜR

Bu bildirideki çalışma, TUBITAK'ın 107M353 numaralı projenin desteği sayesindeki gerçekleşmiştir.

KAYNAKÇA

Aldemir, Ü., ve Bakioğlu, M. (2000). Semiactive Control of Earthquake-Excited Structures. Turk J Engin Environ Sci, 24, 237-246.

Çetin, S., Sivrioğlu, S., Zergeroğlu, E., ve Yüksek, İ. (2009). Semi-Active Hinf Robust Control of Six Degree of Freedom Structural System using MR Damper. Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, YTÜ, İstanbul.

Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N. ve Midorikawa, H. (1999). Actual Seismic Response controlled building with semi-active damper system. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 28, 1427-1447.

Ribakov, Y. ve Gluck, J. (2002). Selective controlled base isolation system with magnetorheological dampers. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 31, 1301-1324.

Wongprasert, N. ve Symans, M.D. (2005). Experimental evaluation of adaptive elastomeric base-isolated structures using variable-orifice fluid dampers, ASCE - Journal of Structural Engineering, 131:6, 867-877.