

H. Kaplan  
Dr. Mak. Yük. Müh.

Atılım Üniversitesi  
Kızılcaşar Koyu, 06836 Incek,  
Ankara, TÜRKİYE

K. Alsaif  
Dr. Mak. Yük. Müh.

King Saud Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Riyad, SUUDİ ARABİSTAN

M. Dölen  
Y. Doç. Dr. Mak. Yük. Müh.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makina Mühendisliği Bölümü  
06531 Ankara, TÜRKİYE

# Yay-Yürek Mekanizmalı Etkin Bir Temel Yalıtım Sisteminin Deprem Şokları Karşısındaki Dinamik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi

*Bu makale yeni bir etkin (aktif) temel yalıtım sisteminin dinamik davranışını deneysel olarak inceler. Bu çalışmada önerilen sistemde; tek katlı bir yapı, iç bükey yataklarla üzerinde hareket eden bilyalarla taşınmaktadır. Özel olarak tasarlanmış yay mekanizması, binanın hareketine normal koşullarda izin vermez. Deprem sırasında, mekanizma devre dışı kalarak yapının belli bir alan içinde serbestçe hareketine imkan tanır. Sistemin temeline yerleştirilen ve doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olması düşünülen yaylarsa, sistemin hareketine deprem sırasında belirli sınırlamalar getirir. Gerek bilgisayar benzetimi gerekse deneysel çalışmalar sonucunda tabanı yalıtılmış böyle bir yapıya iletilen sismik kuvvetlerin %95 oranında azaltıldığı gözlemlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Sismik korunma, mekanik sistem tasarımı, etkin temel yalıtma, deprem şok dalgaları, dinamik gerilmeler, ivme ölçümü, iç bükey taban yatakları, içi boş bilyalar.*

## GİRİŞ

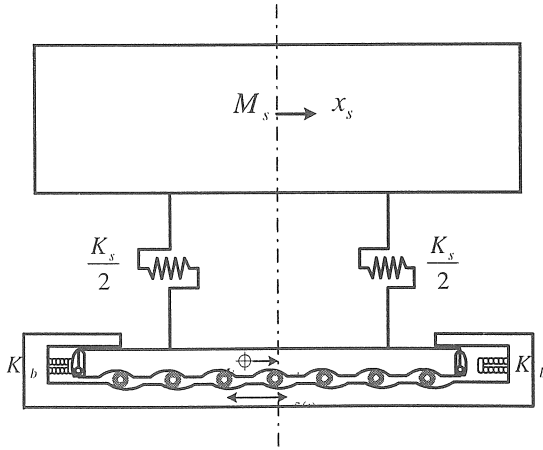
Tabanı yalıtılmış yapıların depremlerin yarattığı yıkıcı etkilere karşı çok dayanıklı olduğu bilinen bir gerçektir. Konunun önemi nedeniyle; gerek etkin-gerekse edilgen temel yalıtım sistemleri birçok araştırmaya son yıllarda konu olmuştur [1].

Palazzo ve Petti [2] binanın altına veya üstüne yerleştirilen etkin titreşim yutucularını ("absorber") incelemiştir; benzer olarak Kareem'de [3] kolon tipi titreşim sönümleyicilerini araştırmıştır. Wang ve Liu [4] kuru (Coluomb) sürtünmeye sahip düz bir yüzey üzerine oturtulmuş temel yalıtım sistemini incelemiştir; bu sistem için geliştirilen hibrid denetimin işe yarayacağı bilgisayar benzetimi yoluyla gösterilmiştir. Kayıcı taban yalıtım sistemlerinde etkin sürtünme denetimi Wang ve Reinhorn [5] tarafından ele alınmıştır. Bu tip sistemlerin arayüzeylerinde sürtünme düşük olduğundan; yer ve temel (taban) arasında bağıl hareketi sınırlamak (denetlemek) için bir ilave bir mekanizma yine bu araştırmada önerilmiştir. Edilgen olarak yalıtılmış binalarda, eyleyici ("actuator") kullanan etkin denetim mekanizmaları Jahilal ve Utku [6] tarafından incelenmiştir. Önerilen sistem yardımıyla binanın yatay- ve dönüş hareketleri en aza indirgendigi gösterilmiştir. Teknik kayanıklarda, sürtünmeli veya ince tabakalardan oluşan lastik elemanlar üzerine oturtulmuş temel yalıtım sistemleri üzerine oldukça fazla sayıda araştırma bulunmaktadır. Mostaghel ve Davis [7] kayıcı temel üzerinde kuru sürtünmenin

etkisini araştırmıştır. Bu çalışmalarında rijit (katı) kabul edilen yapı; viskoz sönüm, kuru sürtünme ve geri getirici kuvvet içeren bir temel yalıtım sistemiyle desteklenmektedir. Mokha ve Amin [8] büyük tarihi bir binanın tipik bir deprem sırasındaki dinamik cevabını incelemiştir. Bu çalışmaya göre, normal bir bina ile karşılaştırıldığında; deprem sırasında temeli yalıtılmış bir yapıya gelen en büyük ivmenin (ve dolayısıyla iletilen kesme kuvvetinin) 1 ila 5 kat azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Almazan ve La Llera [9] kuru sürtünmeli bir sarkacın edilgen taban yalıtım sisteminde kullanıldığı zaman, sistemde ortaya çıkan yatay ve dikey etkileri analiz etmiştir. Bu çalışmada, küresel paslanmaz çelik bir yüzey üzerine oturtulmuş mercimek şeklindeki yuvarlanmalı elemanlar yapıyı desteklemektedir. Benzer olarak, Zhou ve Lu [10], iç bükey bir yüzeye oturan bilyalarla yardımıyla temeli yalıtılmış bir binanın (bilgisayar) modelini oluşturmuştur. Maria and Mauricio [11] lastik sönümleyici elemanlar üzerine oturan dört katlı bir bina üzerinde çeşitli deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında; depremin karakteristiğine bağlı olarak, böyle bir sistemde ortaya çıkan ivmenin 1 ila 3.5 kat azaltıldığı gösterilmiştir. Kuroda ve Saruta [12] lastikli taban yalıtım sistemlerinin etkinliğini, gerçek depremler sırasında tam-ölçekli binalar üzerinde yaptıkları deneylerle göstermişlerdir. İki ayrı tip yalıtım sistemi araştırmalarında denenmiştir. Bunlardan ilki ince tabakalardan oluşan lastikler ve yağlı sönümleyici içeren bir yalıtım sistemidir. Diğeri ise yüksek

sönümlü lastik yataktır. Deneysel çalışmaların ışığı altında ilk sözü edilen yalıtım sisteminin diğerine göre çok daha etkin olduğu (yüksek ivme azaltma oranı) görülmüştür. [1] ve [17] bilyalı yatak üzerine oturmuş bir binayı gözönüne almaktadır. Bu makalede de incelenecek olan bu sistemde, bir yürek mekanizması binanın yanal hareketini kısıtlayarak, normal koşullar altında binayı katı bir destek sağlar. Yürek mekanizması deprem sırasında açılarak, (belli bir alan içinde) binanın bilyalar üzerinde hareketine izin verir. Tasarım gereği, bina bu sözü edilen alan dışına çıkarsa, taban çevresine yerleştirilmiş yaylarla temasa geçmektedir. Depremiň şok dalgaları sona erdiğinde, yürek mekanizması tekrar devreye girerek yayaları sıkıştırıp, binayı eski konumuna getirir. Kontrol bilgisayarı yeni bir şok sinyali aldığı sürece, bu işleme sürekli olarak devam eder. Tabanın geometrik tasarımı binanın kütle dağılımı dolayısıyla ortaya çıkan dönme etkilerinin asgariye indirmektedir. Bunu sağlamak için, tabanın ağırlık noktalarıyla yapının kiler eş merkezli olarak yerleştirilmiştir.

Bu makalenin amacı, [1] ve [17]'de sözü edilen ve detaylı bir bilgisayar benzetimi yoluyla dinamik davranışı incelenen bu etkin taban yalıtım sisteminin tekrar ele alarak, çalışmanın deneysel olarak doğrulamasını yapmaktır. Makalenin kendi içinde bütünlüğünü sağlamak amacıyla, üçüncü bölümde söz konusu sistemin matematiksel modeli verilip, onu takip eden bölümde, sistemin dinamik davranışı bilgisayar benzetimi yoluyla incelenecektir. Beşinci bölümde, öncelikle dinamik ölçümlerin yapılabilmesi amacıyla deneysel bir model geliştirilecektir. Bütün deneylerde, yapıya iletilen ivme ve modelde ortaya çıkan azami dinamik gerilmeler göz önüne alınacaktır. En son bölümdeyse, elde edilen teorik, sayısal, ve deneysel bulguların irdelemesi yapılarak, makaledeki önemli noktaların kısa bir özeti sunulacaktır.



Şekil 1 Taban yalıtım sisteminin yandan ve üstten şematik olarak görünüşü.

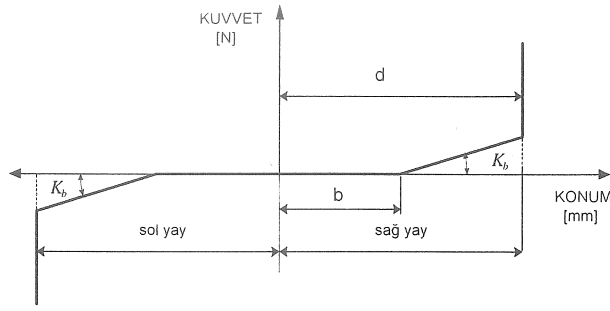
## ETKİN TEMEL YALITIM SİSTEMİ

Şekil 1 etkin bir temel yalıtım sistemini şematik olarak göstermektedir. Burada yapı, bir kütle ( $M_s$ ) ve sistemin yanal rijitliğini gösteren bir yay ( $K_s$ ) ile temsil edilmektedir. Çok serbestlik derecesine sahip bir yapı için,  $M_s$  birinci titreşim biçimi için modal kütleyle ifade edilmektedir. Benzer olarak,  $K_s = M_s \omega_n^2$  olup,  $\omega_n$  sistemin (ilk) doğal frekansını belirtmektedir.

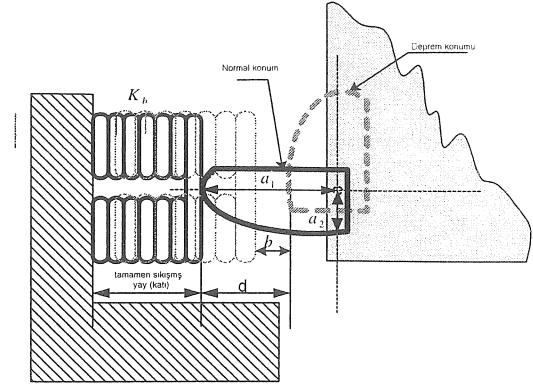
Döndürmeye ve devirmeye yol açan yükleri asgariye indirebilmek için, burada tabanın geometrik merkeziyle, yapının kütle merkezi aynı (etki) çizgisi üzerindedir. Sistemde yer alan her bir bilya iç bükey yüzeyler arasında oturtulmuştur. Böylece, sistemin hareketi sırasında belli bir dönme etkisi de görülse, taban (ağırlığın etkisiyle) otomatik olarak ilk haline dönmeye çalışacaktır. Tabanın yanal hareketini sınırlamak için kullanılan yayların kuvvet konum karakteristiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, taban yere göre (b) kadar hareket ettiği zaman (yanal) yay devreye girmeye başlayacaktır. Bu durumda yay rijitlik değeri olan  $K_b$  tabana etkiyen geri getirici kuvvetin radyal konuma (Şekil 1) göre değişimi ifade etmektedir. Şekil 1'deki yay dizilişi açısından, şok dalgasının geliş yönünün bir önemi yoktur; dolayısıyla  $K_b$  (yay rijitlik) fonksiyonu dalğanın ilerleme doğrultusuna bağımlı değildir. Bu durumda

$$K_b = \sum_{i=1}^5 K(l_i)^2 \quad (1)$$

yazılabilir. Burada  $K$  her bir yayın rijitliği olup  $l_i$  tabanın ilerleme doğrultusuna göre her bir yayın yön kosinüsünü belirtmektedir. Simetriden ötürü  $K_b = 2K$  olacağı açıktır. İstenen geri getirici kuvvet karakteristiğini elde etmek için, geliştirilen yay-yürek mekanizması Şekil 3'te şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2 Yayın kuvvet – konum karakteristiği.



Şekil 3 Yay-yürek mekanizması.

### SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ

Şekil 4 ele alınan sistemde tabanın hareketini göstermektedir. Burada bilyaların kaymadan yuvarlandığı varsayılabilir. Yapının kütlesi yanında bilyaların kütleleri ihmal edilirse, sistemin hareketini belirleyen diferansiyel denklemler şu şekilde yazılır:

- $\max|x_b - \delta(t)| \geq b$  [m] olduğunda

$$M_b \ddot{x}_b + K_s(x_b - x_s) + C_s(\dot{x}_b - \dot{x}_s) + \mu_e((M_s + M_b)(\ddot{y}_b + g)) + K_b(x_b - x_s) = 0 \quad (2)$$

- $\max|x_b - \delta(t)| < b$  [m] olduğunda

$$M_b \ddot{x}_b + K_s(x_b - x_s) + C_s(\dot{x}_b - \dot{x}_s) + \mu_e((M_s + M_b)(\ddot{y}_b + g)) = 0 \quad (3)$$

$$M_s \ddot{x}_s + C_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + K_s(x_s - x_b) = 0 \quad (4)$$

Sönüm etkisi ( $C_s = 0$ ) ihmal edilirse, şu ifadeler elde edilir:

$$M_b = 0.05M_s \quad (5)$$

$$\ddot{y}_b = 2(R - r)[(\ddot{\phi}) \sin(\phi) + (\dot{\phi})^2 \cos(\phi)] \quad (6)$$

**Tabandaki toplam yatay kuvvet**

$$H = \mu_e(M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b) \quad (7)$$

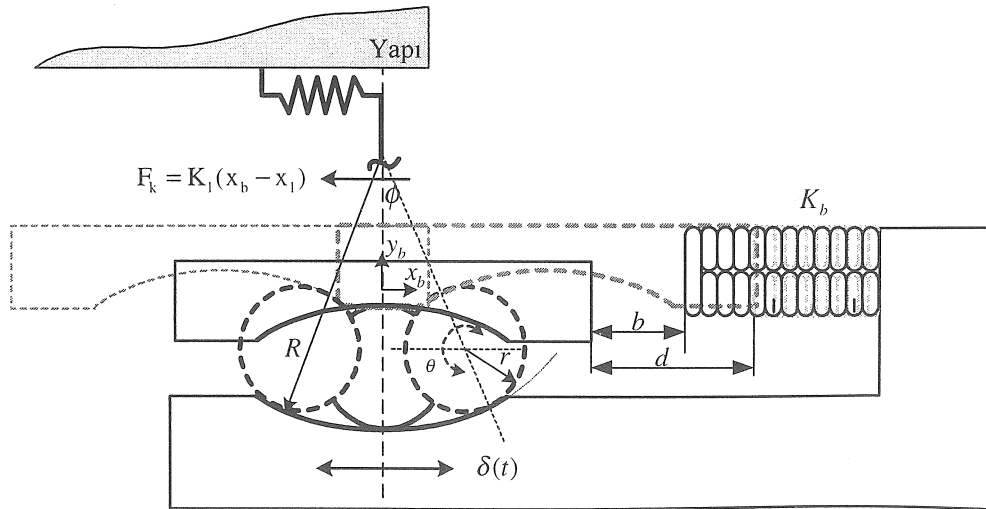
**Olur ve toplam dikey kuvvet**

$$V = (M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b) \quad (8)$$

**şeklini alır. Yukarıdaki denklemlerde**

$$\mu_e = \left\{ \begin{array}{l} \sin[\phi] + \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t)) \cos[\phi] \\ \cos[\phi] - \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t)) \sin[\phi] \end{array} \right\} \quad (9)$$

tabandaki eşdeğer sürtünme katsayısını belirtmektedir. Makalenin bütünlüğü açısından, yukarıdaki verilen sonuçlar ekte detaylı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4 Tabağın hareket modeli.

## BİLGİSAYAR BENZETİMİ

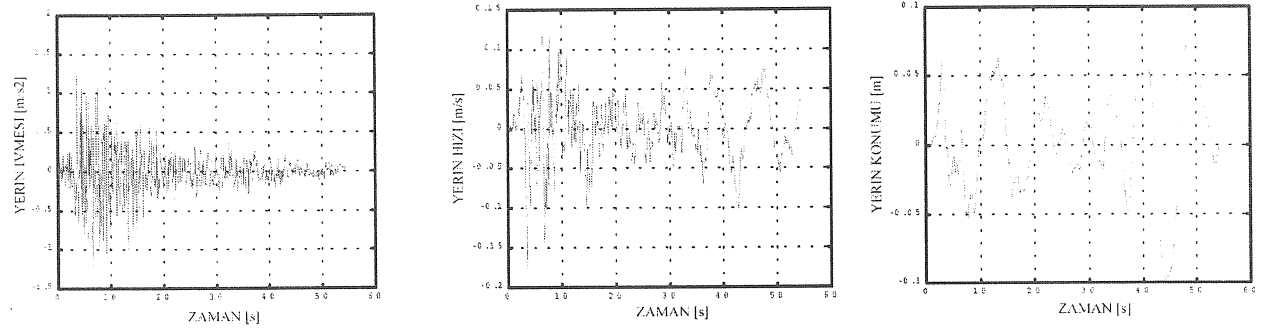
Bir önceki bölümlerde etkin bir temel yalıtım sistemi tanıtılıp, sistemin matematiksel modeli oluşturulmuştu. Verilen differensiyel denklemler doğrusal olmayıp, bunların kapalı analitik çözümünü adı fonksiyonlar cinsinden elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle sistemin dinamik davranışını gerçekçi olarak inceleyebilmek için bilgisayar benzetiminden yararlanılmıştır. Şekil 5 gösterildiği üzere, Taft depreminde toplanan sismik veriler (yerin ivmesi, hızı ve konumu) kullanılarak [1], sistemin bu şekildeki bir etkiye (zorlayıcı fonksiyona) verdiği cevap, 4. mertebeden (değişken zaman adımlı) Runge-Kutta yöntemiyle sayısal olarak değerlendirilmiştir.

Sunulan temel yalıtım sisteminin performansını değerlendirmek amacıyla, dört değişik sistem (durum) göz önüne alınmıştır:

- **Sistem 1:** Tabanı yalıtılmamış ve rijit olarak yere oturtulmuş yapı.
- **Sistem 2:** Bilyalar üzerine oturtulmuş fakat yaylarla hareketi sınırlanmamış yapı ( $b = \infty$ ).
- **Sistem 3:** Bilyalar üzerine oturtulmuş ve sürekli olarak yaylarla hareketi ( $b = 0$ ) sınırlanan yapı.

- **Sistem 4:** Bilyalar üzerine oturtulmuş ve kısmî olarak ( $b = 0.13$  m) yaylarla sınırlanmış yapı.

Bilgisayar benzetimi sırasında kullanılan sistem parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur. Benzer olarak, sayısal sonuçlar Şekil 6 – 12'da gösterilerek, bunlardan derlenen önemli bilgiler Tablo 2'de kısaca özetlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, bilyalı temel yalıtım sistemiyle yapıya iletilen kuvvetler 20 kat (%95) azalmış durumdadır. Ancak sistemin yatay hareketi yaylarla sınırlanmadığı zaman, yapının yere göre önemli ölçüde hareket edebileceği görülmektedir (~12 cm). Diğer taraftan, sistemin hareketini sürekli olarak yaylarla sınırlamak yapıya iletilen kuvvetlerin artmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla gerçek sistemin tasarımında göz önüne alınması gereken noktalar: sistemin ne kadarlık bir sismik kuvvete dayanabileceği ve yapının en çok ne kadar hareket etmesine izin verileceğidir. Dikkat edilirse iç bükey yüzey üzerinde hareket eden bilyaların dikey yönde ilettiği bir kuvvet mevcuttur. Ancak Şekil 10(I), 11(I) ve 12(I)'dan da (boyutsuz dikey kuvvet) görüleceği gibi; bu bileşen yapının ağırlığına göre çok küçük olduğundan, ihmal edilebilir.



Şekil 5 Taft depreminde elde edilen sismik veriler.

Tablo 1 Bilgisayar benzetiminde kullanılan sisteme ait parametreler.

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
b	Tabanla yayalar arasındaki boşluk	0.13	m
d	Tabanla tamamen şıkışmış yaylara arasındaki uzaklık	0.20	m
$K_b$	Tabanı sınırlayan yayların esdeğer rijitliği	$6 \times 10^4$	N/m
$K_s$	Yapının rijitliği	$1.2 \times 10^6$	N/m
$M_b$	Tabanın kütlesi	1925	kg
$M_s$	Yapının kütlesi	38,500	kg
R	İç bükey yüzeyin (yatağın) yarıçapı	2.5	m
r	İçi boş bilyaların yarıçapı	0.5	m
$\mu_0$	Yuvarlanma sürtünmesi katsayısı [18]	0.01	–



Tablo 2 Sayısal sonuçların özeti.

Sistem (i)	1	2	3	4
Tanım	Rijit temel	Sınırlanmamış bilyalı taban	Yayla sınırlı bilyalı taban	Kısmî olarak sınırlı taban
İlgili şekil numarası	6	7	8	9
Yapıya iletilen azami kuvvet $F_i$ [N]	166,290	8,128	10,940	8,128
Kuvvet azaltma oranı ( $F_1/F_i$ )	1	20.46	15.2	20.46
Yapının azami yer değiştirmesi [m]	0.2269	0.1131	0.1216	0.1184
Yapının tabana göre azami yer değiştirmesi ( $x_s - x_b$ ) [m]	0.1386	0.0068	0.0091	0.0068
Tabanın azami yer değiştirmesi [m]	0.0977	0.1123	0.1198	0.1159
Tabanın yere göre azami yer değiştirmesi ( $x_b - \delta$ ) [m]	0	0.0605	0.0619	0.0605

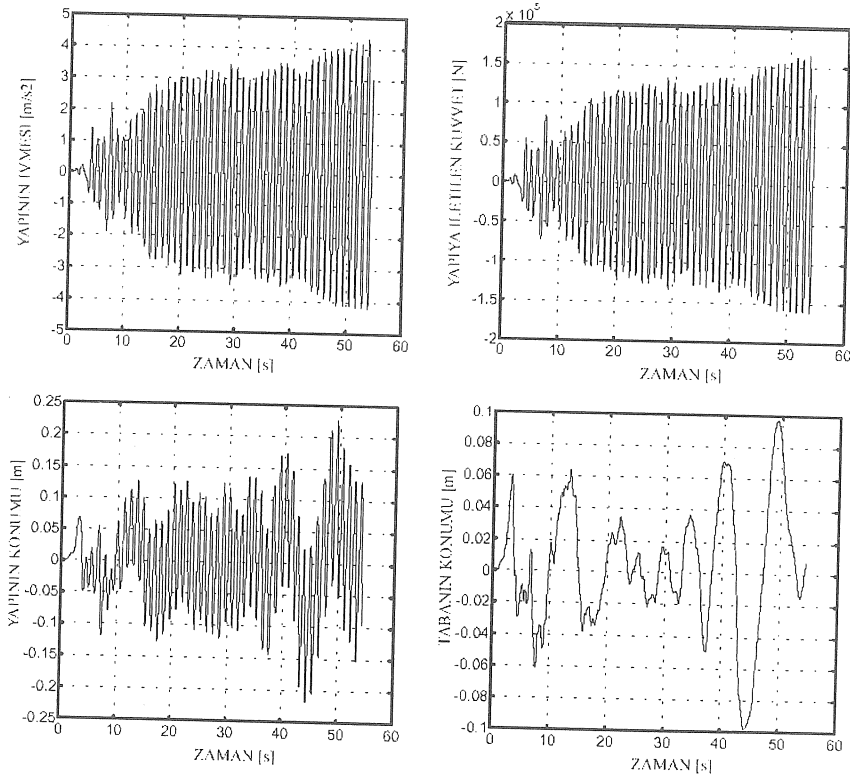
### TEK KATLI BİR SİSTEMİN DENEYSEL ANALİZİ

Bu bölümde, bilgisayar benzetimi yoluyla elde edilen bilgilerin doğrulanması amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneylerin ilk kısmında yapıya iletilen ivmeler ölçülmüş, ikinci kısımda ise dinamik genleme ("strain") analizi yapılmıştır.

#### A. İletilen İvmelerin Ölçümü

Şekil 13 deneyin bu kısmında kullanılan sistemin bir şemasını göstermektedir. Bu sistemde temele (düşük bantlı) rastgele bir hareket uygulanarak; yapıya iletilen ivme, piezo-elektrik ivme ölçerler yardımıyla saptanmaktadır. Burada 4

adet çelik kolon üzerine oturtulmuş kütle, tek katlı bir binayı temsil etmektedir. Deneysel düzenepteki bilyalı tabanın hareketi yaylarla kısıtlanmamıştır. Elektromekanik tahrik elemanı, arzu edilen kuvveti temele uygulayarak istenen ivme profilini oluşturabilmektedir. Uygulanan kuvvetin ("depremin") şiddeti ayarlamak, tahrik elemanını besleyen güçlendiricinin kazancını değiştirerek mümkün olmaktadır. Sistemdeki ivme ölçerlerden gelen işaretler (elektriksel yük), güçlendirilerek filtre edilmektedir. Sonuçta elde edilen elektriksel işaretler (gerilimler) örneklenerek, bilgisayar tabanlı bir veri toplama sistemi yardımıyla kaydedilmektedir.



Şekil 6 Rijit olarak desteklenen yapının (Sistem 1) dinamik cevabı.

Şekil 14, belirli bir tahrik şekli için sistemin yanıtını göstermektedir. Bu şekilden de görüleceği üzere, temeli yalıtılmış binanın ivmesi, yerin ivmesine göre çok düşüktür. Benzer olarak, Şekil 15 temeli yalıtılmamış bir binada ortaya çıkan ivme ile yer ivmesinin frekans spektrumunu (tayfını) ifade etmektedir. Burada 6 Hz civarında belirli bir tepe değeri gözükmemektedir. Aslında, bu harmonik bileşen yapının birinci titreşim biçimini temsil etmektedir. Yer ivmesi ile karşılaştırıldığında, bu frekansta yapıda ortaya çıkan ivme çok belirgin olmasına rağmen; yer ivmesinin yüksek frekanslı harmonik bileşenlerinin sistem üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir.

Durumu kantitatif olarak değerlendirmek amacıyla, yapının ivmesinin yer (giriş) ivmesine oranı, iletim (veya “geçirgenlik”) oranı olarak tanımlanmıştır. Şekil 16 bu oranı temeli yalıtılmış ve yalıtılmamış sistemler için göstermektedir. Burada “kazanç” yer ivmesinin şiddetini ifade etmektedir. Sözü edilen “yalıtılmamış” sistemse bilyaları çıkartılarak tabana rijit olarak bağlanmış yapıyı vurgulamaktadır. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere, tabanı yalıtılmış sistemde iletilen kuvvetin (ivmenin) yaklaşık olarak 20 kat (%95) azaldığı görülmektedir. Rijit temelli yapı için, yer ivmesinin %65’inin yapıya iletildiği anlaşılmaktadır. Buradaki %35’lik azalma sistemde kullanılan çelik kolonların düşük eğilme rijitliğinden kaynaklanmaktadır.

## B. Dinamik Genleme Ölçümü

Deneylerin bu kısmında kullanılan deneysel sistem Şekil 17’de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, en büyük eğilme gerilmesinin her bir kolonun en alt kısmında ortaya çıkacağı tahmin edilmiştir. Bu durumda, yapının temeli yatay rastgele bir hareketle tahrik edilmiştir. Deneyler sırasında üç değişik tahrik şiddeti ve onlara karşılık gelen üç değişik güçlendirici kazancı ( $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$ ) kullanılmış olup, kolonlarda ortaya çıkan en büyük genlemeler, genleme ölçerler (“strain-gage”) yardımıyla saptanmaktadır. Burada gösterilen genleme ölçüm sistemi, sıcaklık farkı giderimli bir Wheatstone köprüsü ve ilgili güçlendirici devre sistemlerinden oluşan bir ekipmandır. Böylece, genleme ölçerde oluşan küçük direnç değişimleri, bu cihaz aracılığıyla (genlemeyle orantılı) gerilim değişimlerine dönüştürülmüş olur. Ardından, bu gerilimler programlanabilir bir güçlendirici yardımıyla yükseltip, 12 bitlik bir analog/dijital (A/D) çevirici yoluyla sayısal hale getirilir. Son olarak, kişisel bilgisayar tabanlı veri toplama sistemiyle bu işaretler kaydedilerek saklanır. Eğilme genlemesi ölçüldükten sonra, ona karşı gelen gerilme ( $S_y$ ) Hooke kanunu aracılığıyla elde edilebilir.

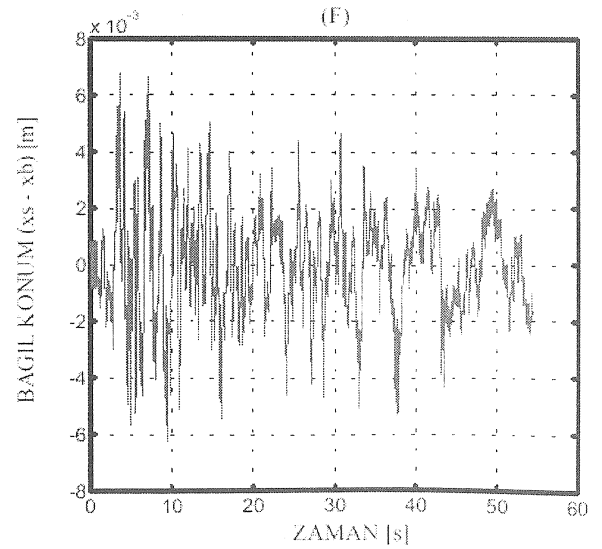
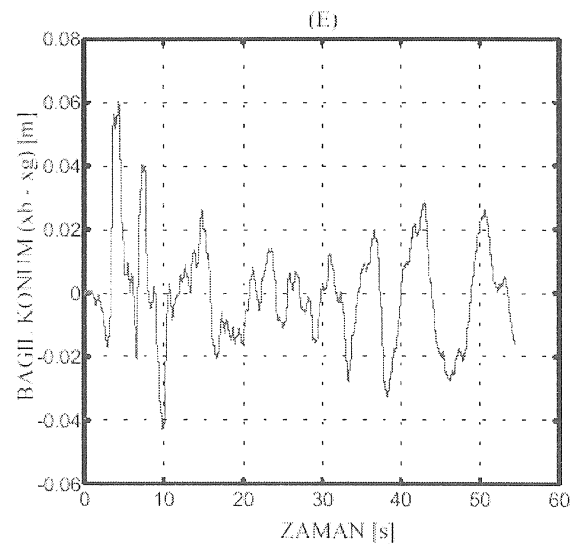
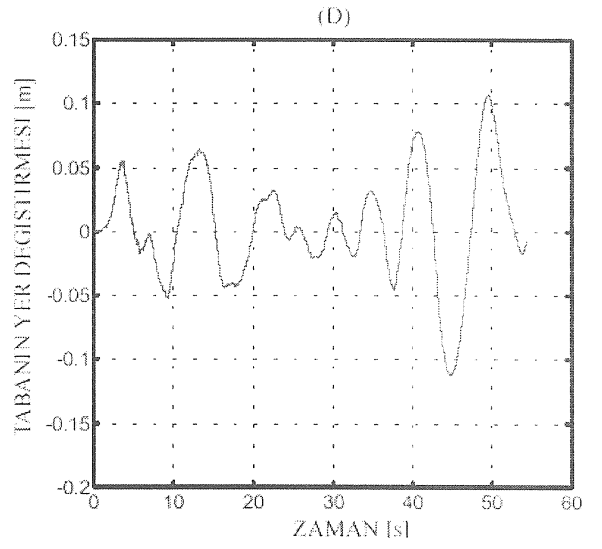
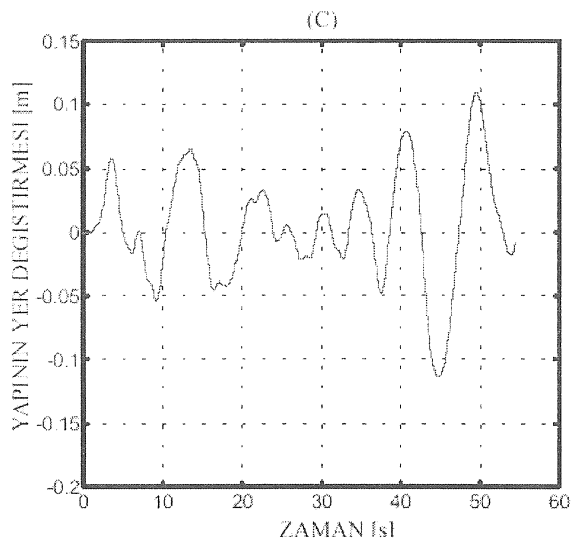
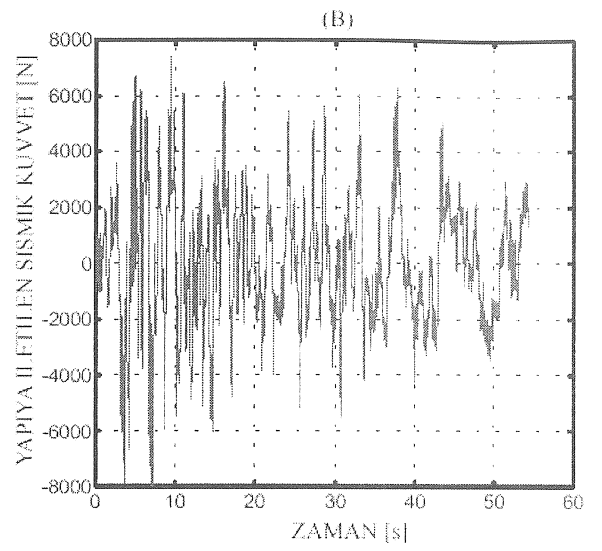
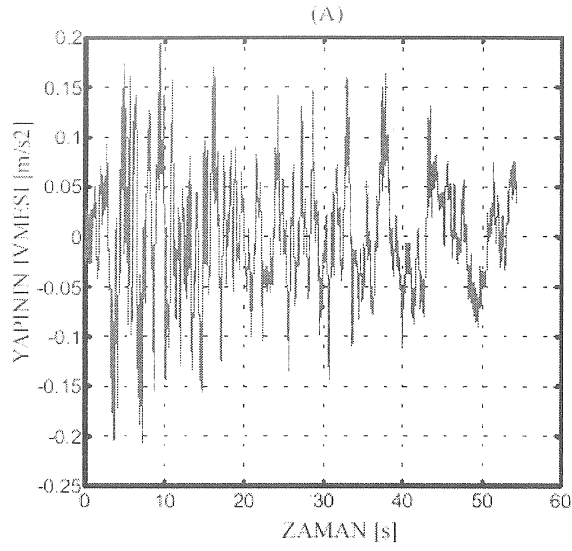
Gerilmeler  $S_o$  gerilmesi kullanılarak normalleştirilmiştir:

$$S_o = \frac{F_o}{A} = \frac{m_s a_b}{b_c t_c} \quad (10)$$

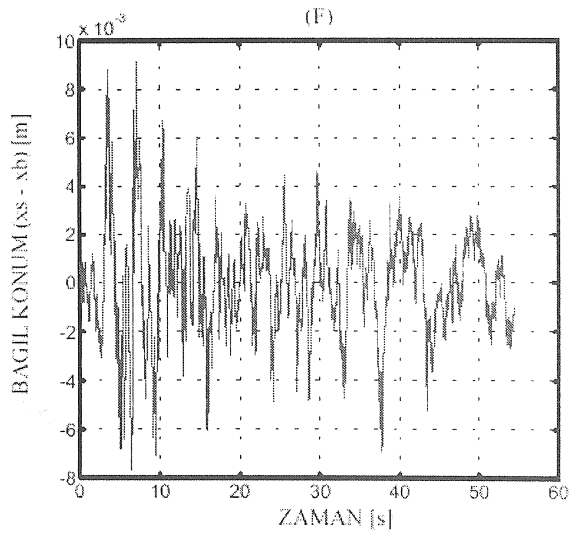
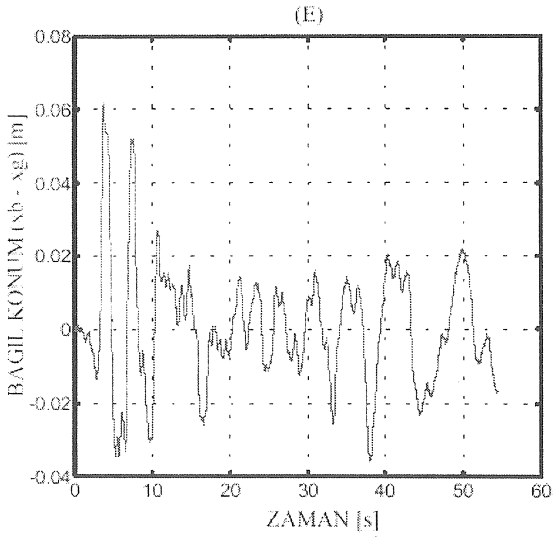
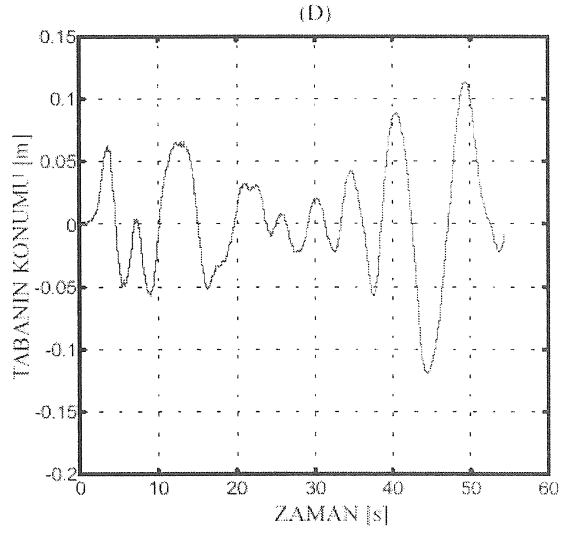
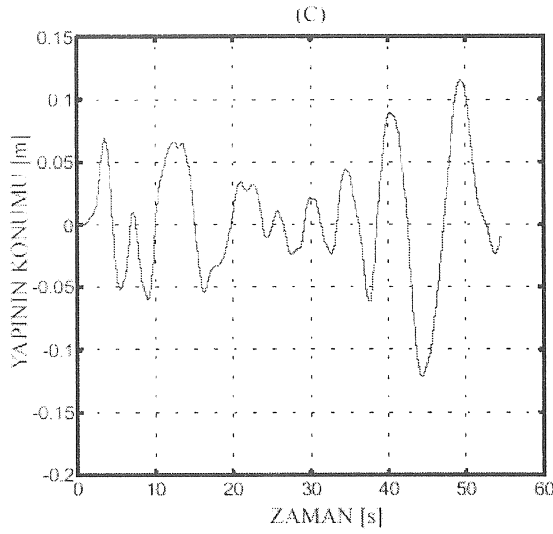
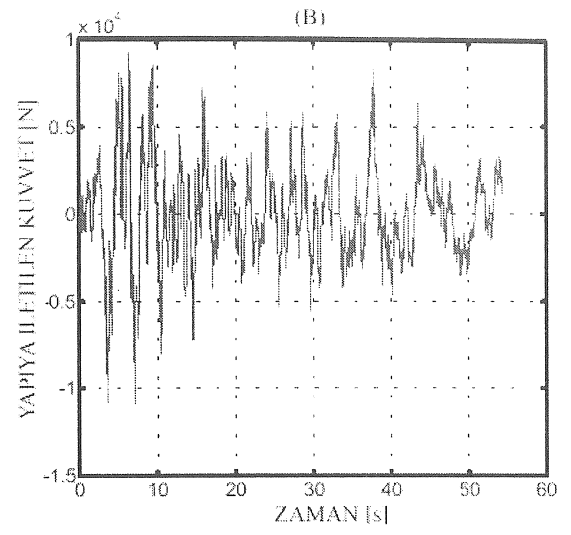
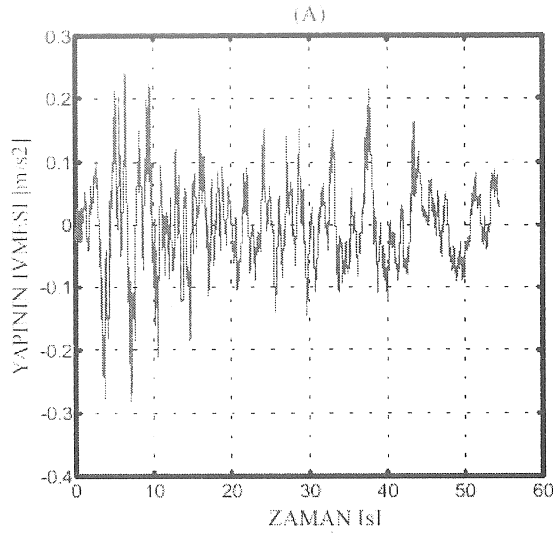
Burada  $a_b$  temel ivmesinin *rms* (karelerin ortalamasının karekökü) değerini;  $b_c$  kolonun en-kesit genişliğini;  $t_c$  kolonun en-kesit kalınlığını belirtmektedir. Deneyler hem rijit sistem hem de temeli yalıtılmış yapı için gerçekleştirilmiştir. Şekil 18  $g_3$  kazancı kullanılarak oluşturulan temel ivme profilini göstermektedir. Temeli yalıtılmış yapıda meydana gelen (normalleştirilmiş) dinamik eğilme gerilmeleri Şekil 19’da verilmiştir. Benzer olarak, Şekil 20’de rijit temelli yapıdaki en büyük dinamik eğilme gerilmelerini zamanın fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu deneylerde Şekil 18’deki yer ivme profili kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı üzere, verilmiş zaman diliminde ortaya çıkan en büyük dinamik gerilme oranı ( $S/S_o$ ) 900 civarındadır. Bu durum temeli yalıtılmış sistemde gözlemlenen en büyük gerilmenin 6 katı kadardır. Böylece, temeli yalıtılmış binaların kolonlarında ortaya çıkan en büyük gerilmeler önemli ölçüde azaltılarak; deprem sırasında hasar oluşma ihtimali en aza indirgenmiş olur [1].

## SONUÇ

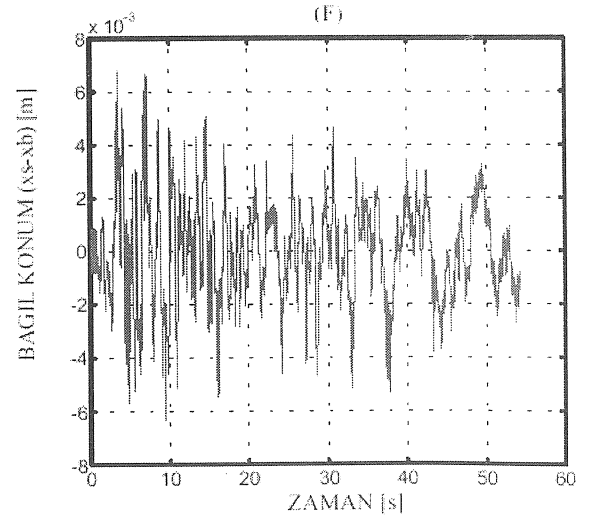
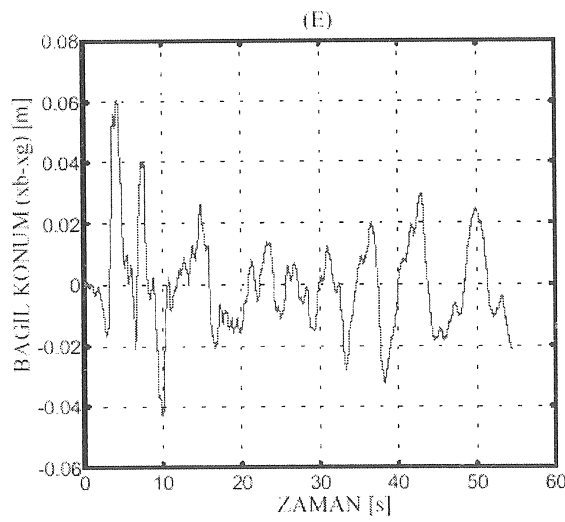
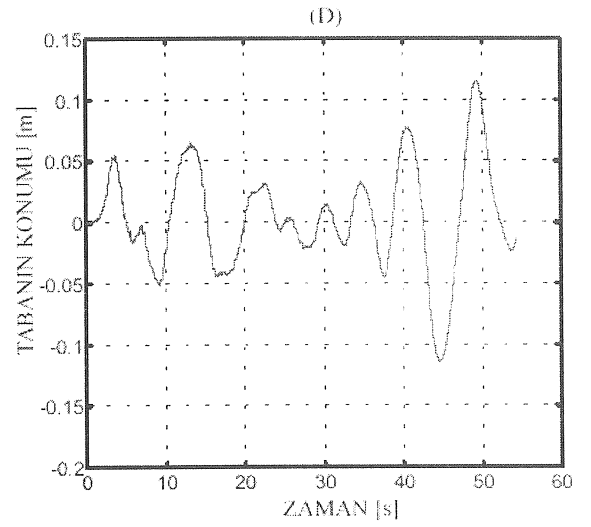
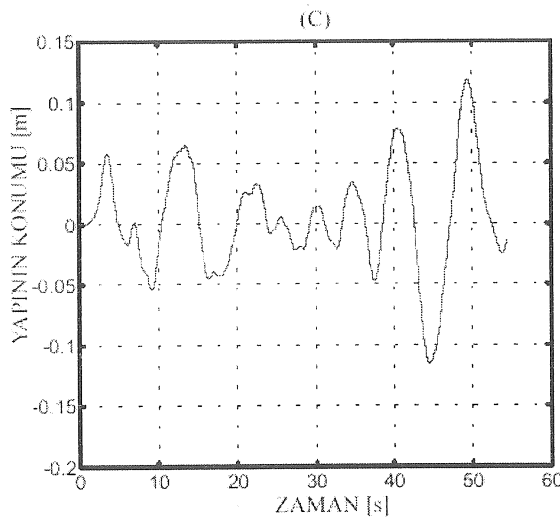
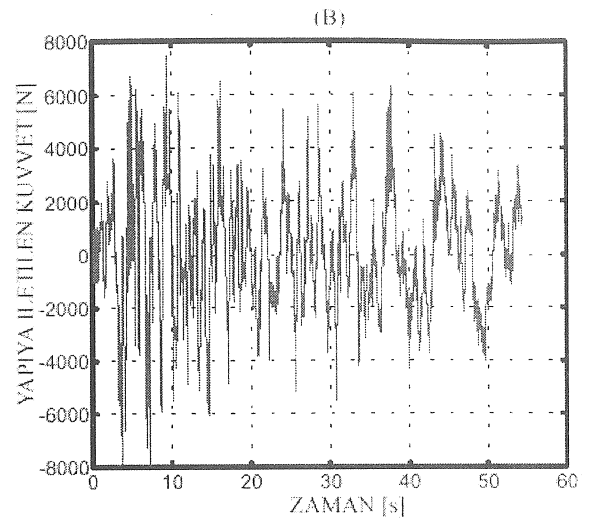
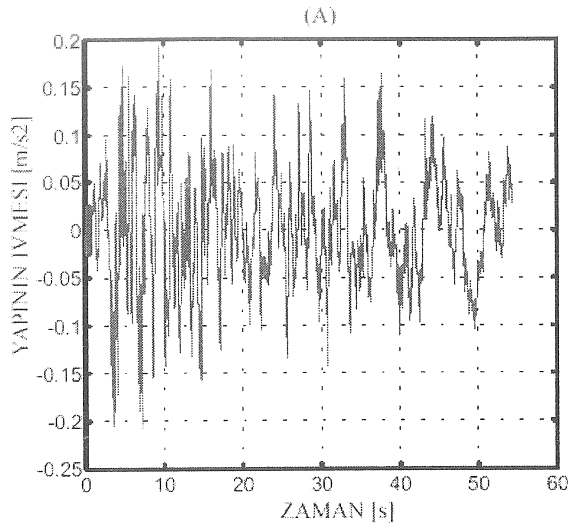
Bu makalede tabanı yalıtılmış tek katlı bir binanın olası bir deprem sırasındaki dinamik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Söz konusu araştırmanın deneysel bulguları, [1]’de sunulan teorik sonuçları doğrular niteliktedir. Tabanı yalıtılmış ve etkin olarak temeli denetlenen binaların büyük ölçekli depremlerin yıkımından korunmasının mümkün olduğu görülmektedir. Bilgisayar denetimli yürek mekanizmaları aracılığıyla, binaya normal koşullarda rijit bir destek sağlanabilir. Böylece rüzgar kuvvetlerinin bina üzerinde sürekli olarak oluşturduğu yatay kuvvetlere ve çeşitli momentlere karşı etkin biçimde karşı konmuş olur. Deprem sırasında yürek mekanizması açılarak, binanın bilyalı yataklar üzerinde (belirli bir zaman çerçevesinde) serbestçe hareketine izin verilebilir. Bu esnada, binaya tabandan iletilen sismik kuvvetlerin %95 oranında azaltılması mümkün olur. Sistemde öngörülen yaylar (depremin özellikle sonuna doğru) binanın temelle temâs etmesini sağlar. Ayrıca, yine bu çalışmada tabanı yalıtılmış bina kolonların kritik noktalarında ortaya çıkan en büyük eğilme gerilmelerinin önemli ölçüde azaltıldığı da gözlemlenmiştir.



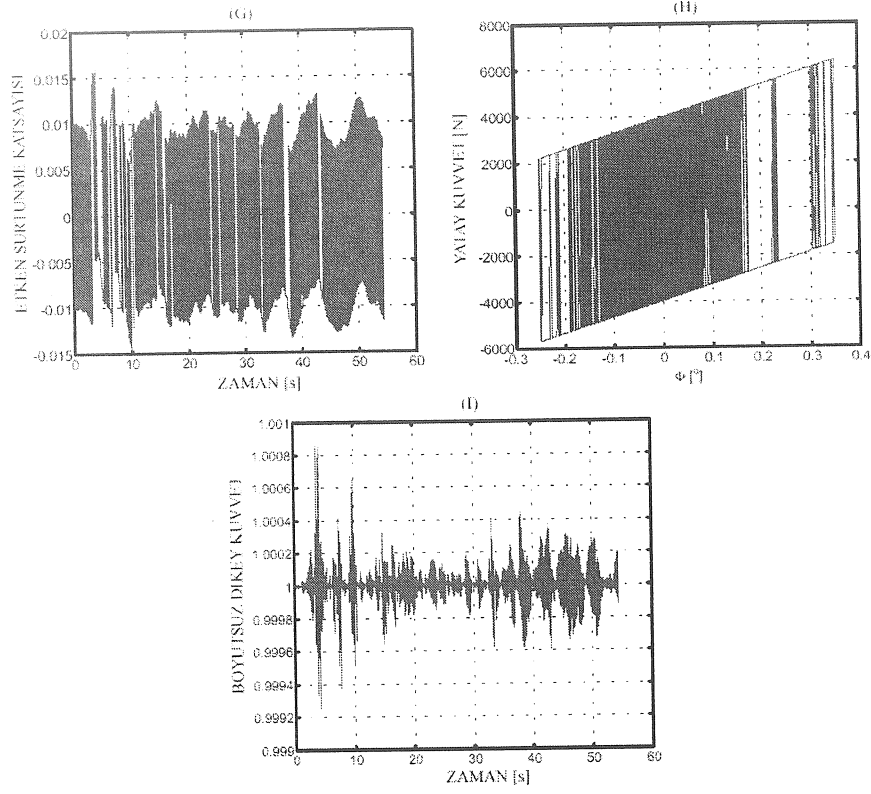
Şekil 7 Yayılarla sınırlanmamış bilyalı tabanın (Sistem 2) dinamik cevabı.



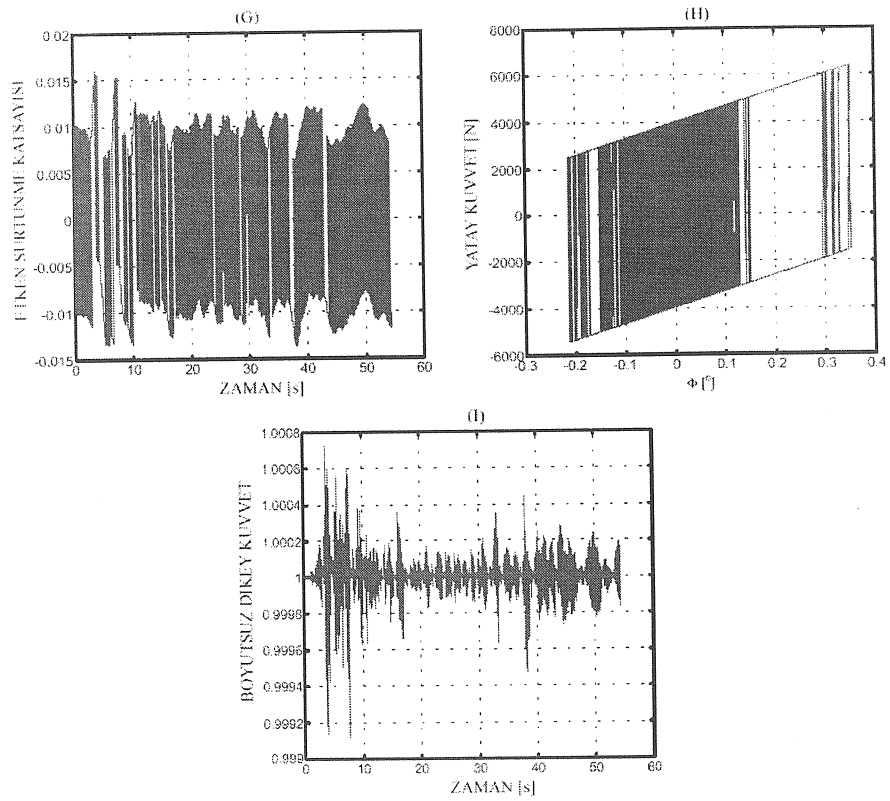
Şekil 8 Sürekli olarak yaylarla sınırlanmamış bilyalı tabanının (Sistem 3) dinamik cevabı.



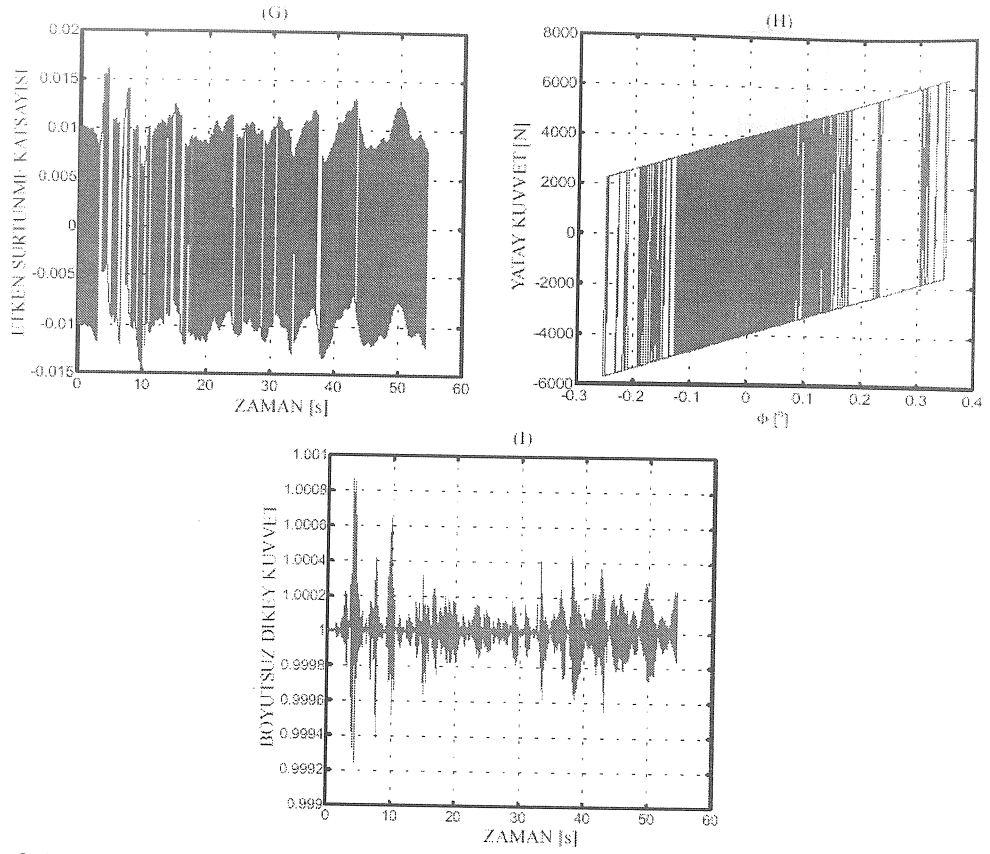
Şekil 9 Kısmî olarak yaylarla sınırlanmamış bilyalı tabanın (Sistem 4) dinamik cevabı.



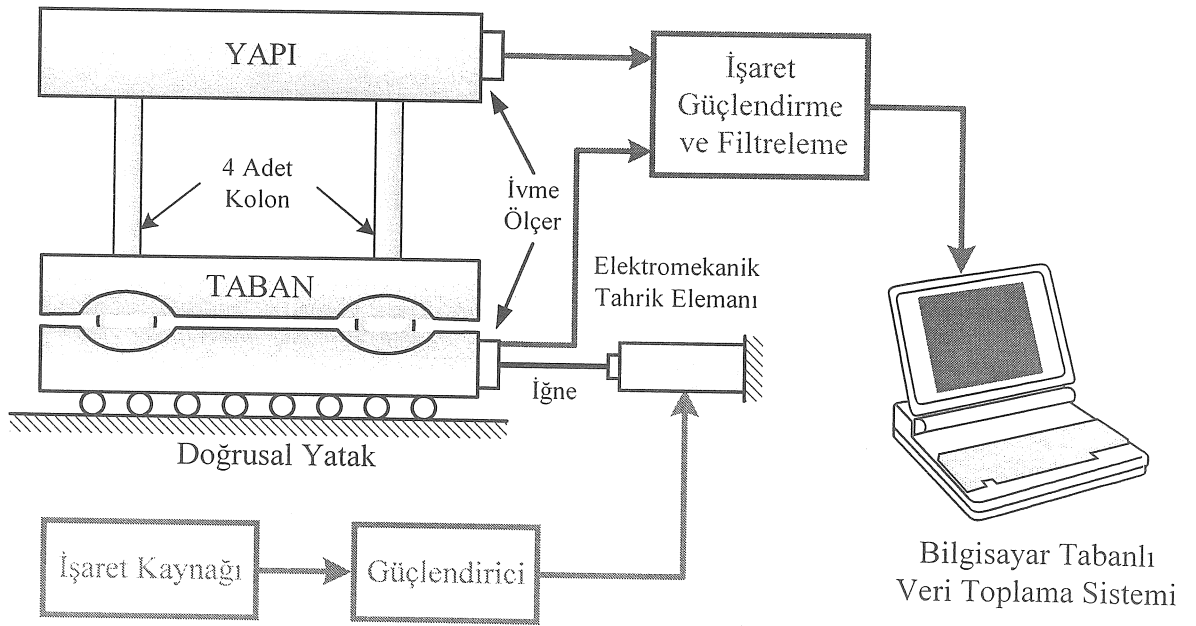
Şekil 10 Sistem 2'deki eşdeğer sürtünme katsayısı ve yapıya iletilen yatay/dikey kuvvetler.



Şekil 11 Sistem 3'teki eşdeğer sürtünme katsayısı ve yapıya iletilen yatay/dikey kuvvetler.

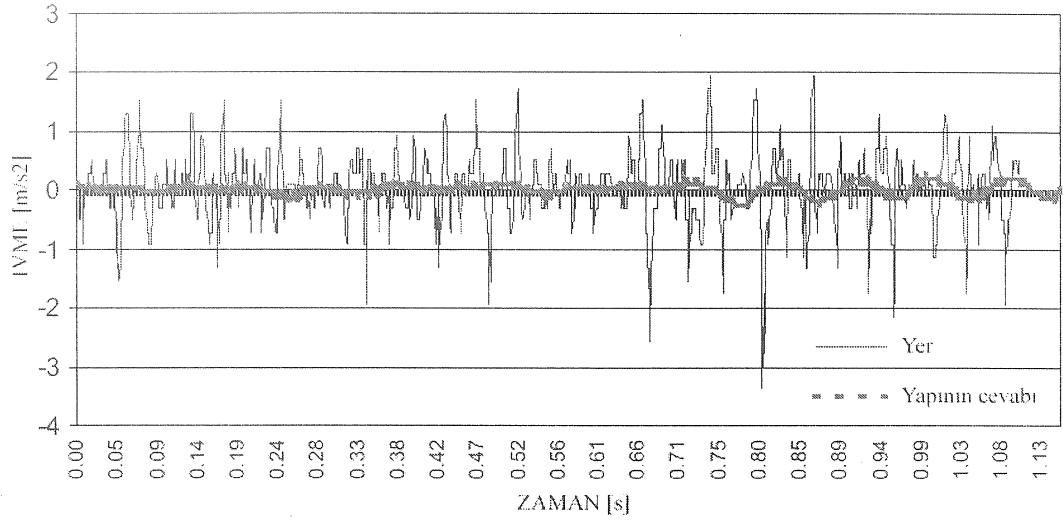


Şekil 12 Sistem 4'teki eşdeğer sürtünme katsayısı ve yapıya iletilen yatay/dikey kuvvetler.

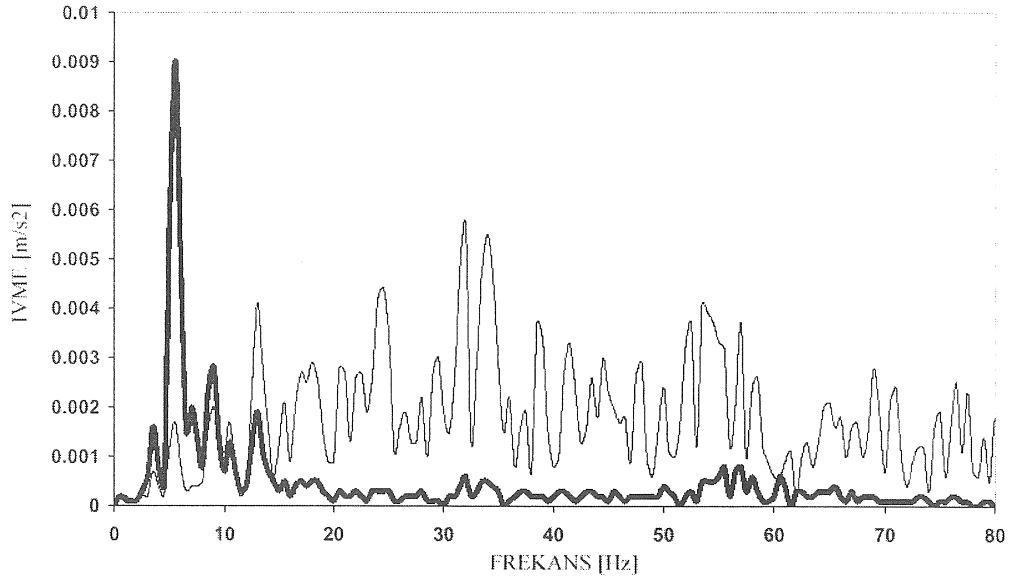


Şekil 13 Yapıya iletilen ivmenin ölçüldüğü deneysel düzenek.

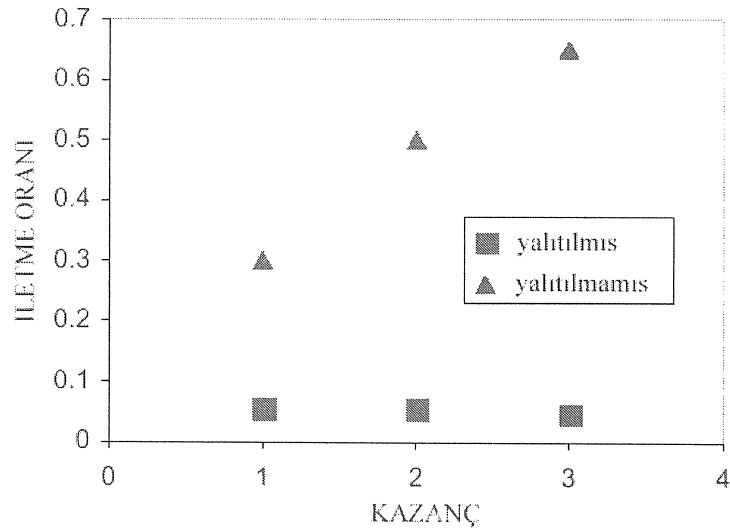




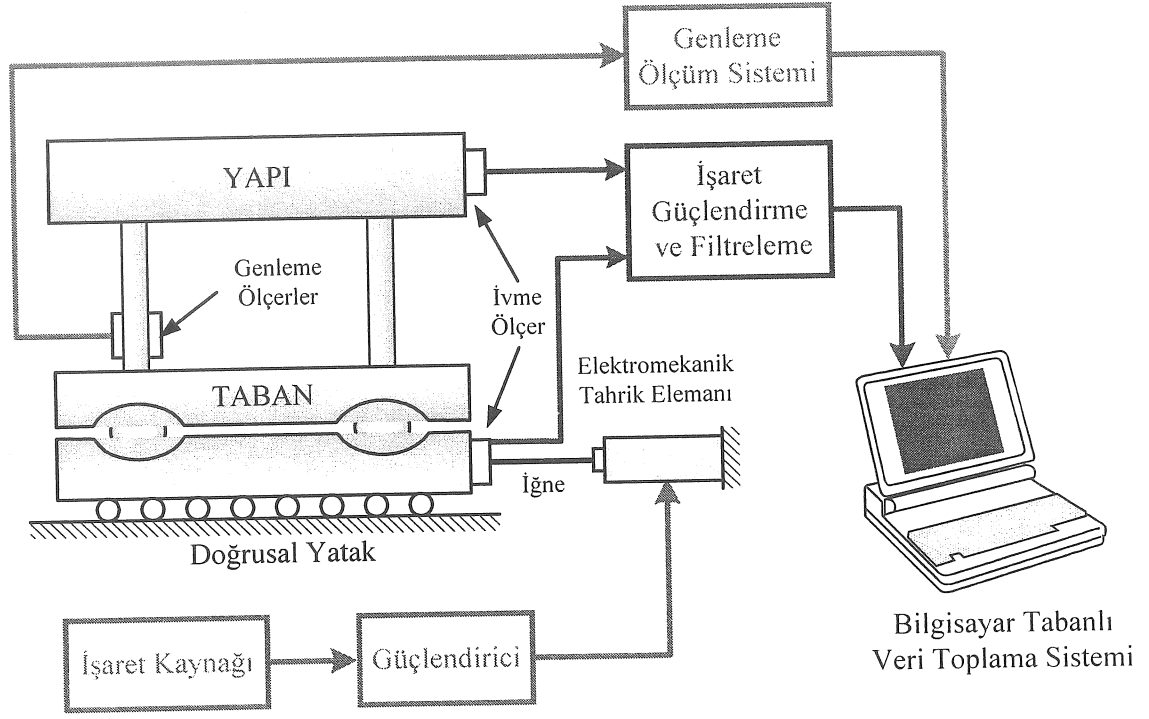
Şekil 14 Tabanı yalıtılmış yapıda ortaya çıkan ivme.



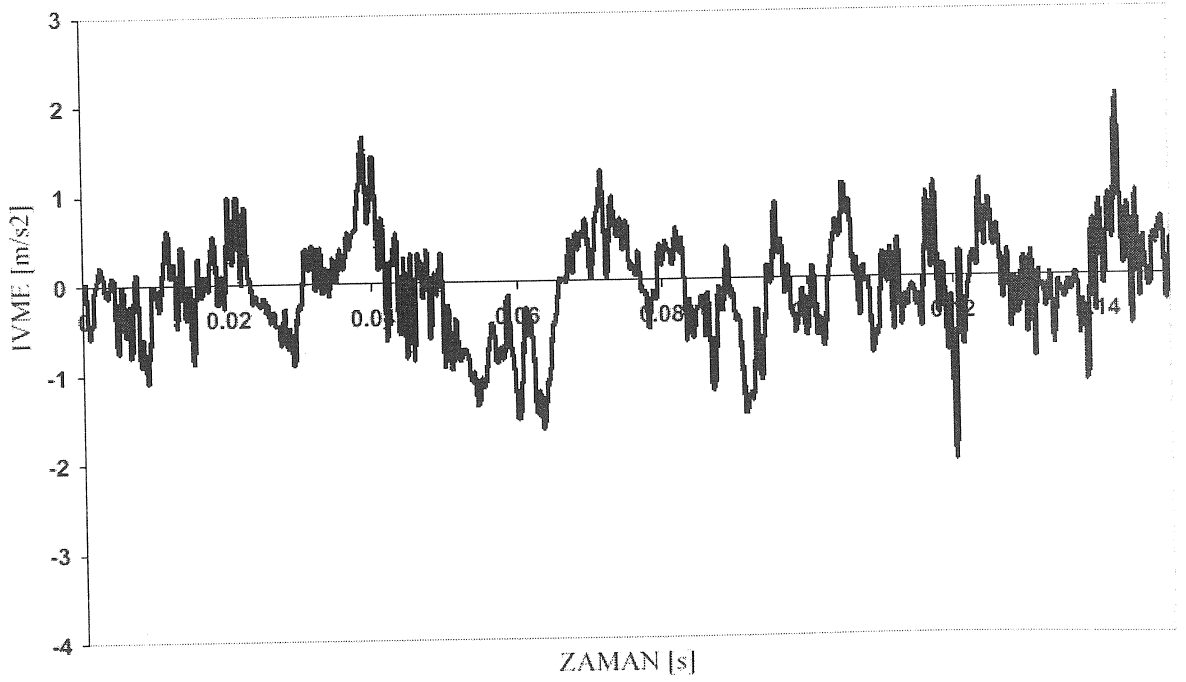
Şekil 15 Rijit tabanlı sistemde ortaya çıkan ivme ile (koyu çizgi) uygulanan yer ivmesinin (ince çizgi) frekans tayfları.



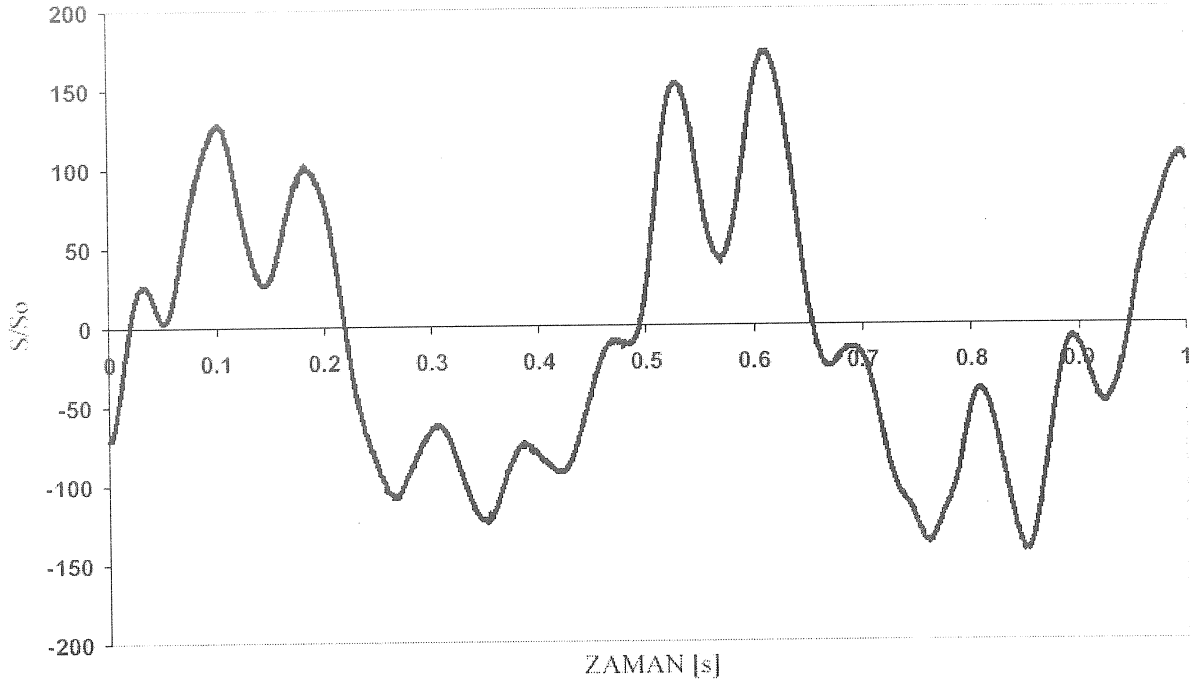
Şekil 16 Çeşitli kazanç değerleri için, deney sistemlerinde gözlenen ivme iletim oranları.



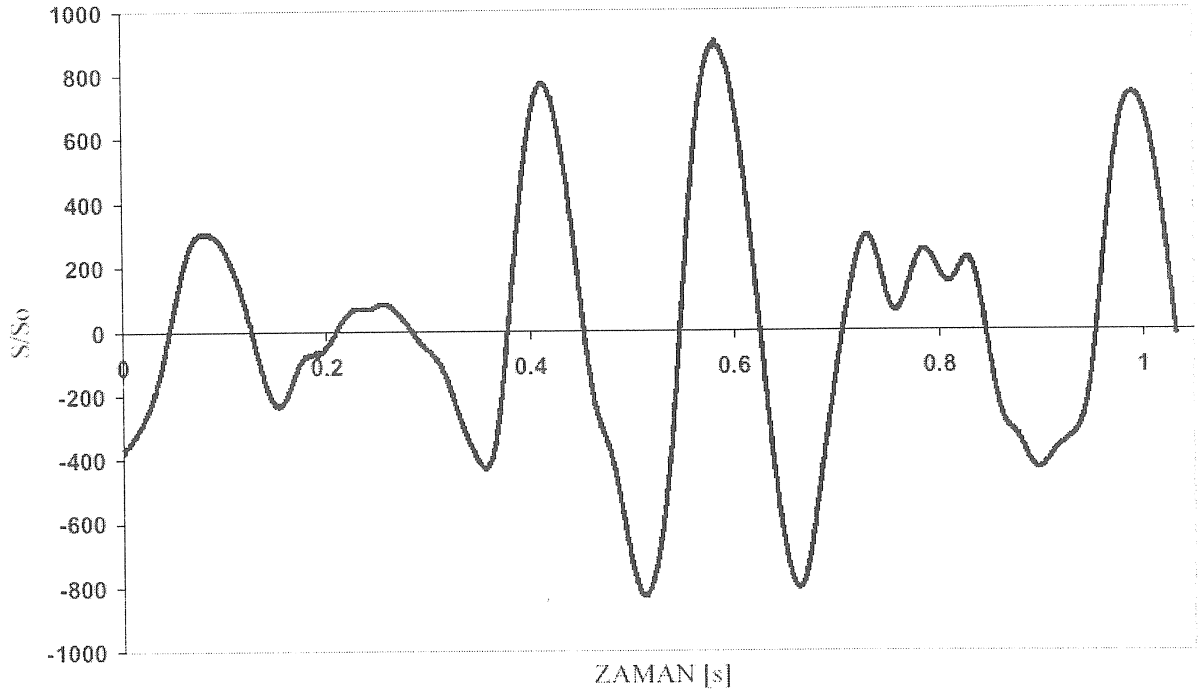
Şekil 17 Kolonlardaki dinamik genlemeyi ölçmek için kullanılan deneysel düzenek.



Şekil 18 Dinamik genleme ölçümü yapılırken kullanılan yer ivme profili (Kazanç:  $g_3$ ).



Şekil 19 Tabanı yalıtılmış sistemin kolonlarında ortaya çıkan en büyük eğilme gerilmesi.



Şekil 20 Rijit sistemin kolonlarında ortaya çıkan en büyük eğilme gerilmesi.

## TEŞEKKÜR

Bu makalede sözü edilen deneysel çalışmalar, Riyad Üniversitesi, Makina Mühendisliği bölümünün mekanik titreşimler laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, çalışmaya verdikleri teknik destekten ötürü ilgili bölüme içtenlikle teşekkür ederler.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A BASE-ISOLATED STRUCTURE AGAINST EARTHQUAKE SHOCK DISTURBANCES USING A MECHANICAL CONCAVE-BALL SUPPORT WITH ACTIVE CAM-SPRING SYSTEM

This paper experimentally investigates the dynamic behaviour of a novel base isolation system for the earthquake protection of structures. A single-story experimental model is constructed to investigate the feasibility of the concept. The active base isolation system considered in this paper incorporates concave-ball supports for the base and a specially designed spring-cam system to keep the base rigidly supported under normal condition while allowing it to move for the duration of the earthquake under the constraint of a spring with optimized nonlinear characteristics. Numerical- and experimental results show that the transmitted force to such structures reduces by 95%.

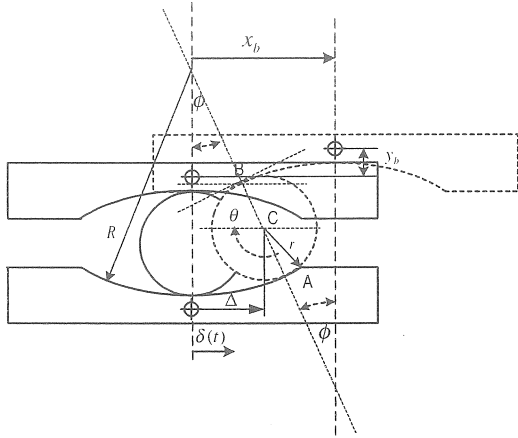
Keywords: Seismic protection, mechanical system design, active base isolation, earthquake shock disturbances, dynamic stresses, acceleration measurements, concave base supports, hollow balls.

## KAYNAKÇA

- [1] H. Kaplan ve A. Seireg, "A Computer Controlled System for Earthquake Protection of Structures," *Int. Journal of Computer Applications in Technology*, Cilt.13, No.1/2, 2000.
- [2] B. Palazzo ve L. Petti "Seismic Response Control in Base Isolation Systems Using Tuned Mass Dampers," *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Ağustos 1994.
- [3] A. Kareem, "The Next Generation of Tuned Liquid Dampers," *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Ağustos 1994.
- [4] Y. P. Wang, and C. J. Liu "Active Control of Sliding Structures under Strong Earthquakes," FP1-23, *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Ağustos 1994.
- [5] Y. P. Wang ve A. M. Reinhorn, "Motion Control of sliding Isolated Structures." *Seismic, Shock and Vibration Isolation* (editörler: H. Chung ve T. Fujita), cilt 181, ASME Press, 1989.
- [6] P. Jahilal ve S. Utku, "Active Control In Passively Base Isolated Buildings Subjected to Lower Power Excitations." *Computer & Structures*, Cilt 66.
- [7] N. Mostaghel ve T. Davis, "Representations of Coloumb Friction for Dynamic Analysis." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, cilt 26, 541-548, 1997.
- [8] A. S. Mokha, N. Amin, M. C. Constantinou ve V. Zayas "Seismic Isolation Retrofit of Large Historic Building", *Journal of Structural Engineering*, 298-308, Mart 1996.
- [9] J. L. Almazan ve J. C. De la llera, "Modelling Aspects of Structures Isolated With the Frictional Pendulum System." *Earthquake Engineering And Structural Dynamics*, Cilt 27, 845- 867, 1998.
- [10] Q. Zhou ve X. Lu, "Dynamic Analysis on Structures Base Isolated by A Ball System with restoring property." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt 27, 773- 791, 1998.
- [11] O. Moroni Maria, Sarrazin-Mauricio, ve Boroschek-Ruben, "Experimentalon a Base Isolated Building in Santiago-Chile," *Engineering-Structures*, cilt 20:8, 720-725, Ağustos 1998.
- [12] T. Kuroda ve M. Saruta, "Verification Studies on Base Isolation Systems by Full scale Buildings," *Seismic, Shock and Vibration Isolation*, (editörler: H. Chung ve T. Fujita), cilt 181, ASME Press, 1989.
- [13] P. K. Malhotra, "Method for Seismic Base Isolation of Liquid Storage Tanks," *Journal of Structural Engineering*, 113-116, Ocak 1997.
- [14] H. W. Shenton ve F. P. Hampton, "Seismic Response of Elevated Water Tanks," *Journal of Structural Engineering*, 965-975, Eylül 1999.
- [15] N. Youssef, B.Nuttall, A Rahman ve O. Hata, "Passive control of The Los Angeles City Hall," FP2-54, *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Ağustos 1994.
- [16] A. Bakhshi, Araki ve Suzuki, "Suspension Isolation System," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Cilt 26, 215-231, 1997.
- [17] H. Kaplan ve A. Seireg, "Optimal Design of a Base Isolated System for a High Rise Steel Structure," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, cilt 30, 287- 302, 2001.
- [18] A. Seireg. *Friction and Lubrication in Mechanical Design*, Mercel Dekker, N.Y, 1998.

EK

Bu bölümde yapının tabanının hareketine dair önemli geometrik ve kinematik bağıntılar çıkartılacaktır. Şekil E.1 basitleştirilmiş olarak tabanın hareketi ve önemli geometrik parametreleri göstermektedir.



Şekil E.1 Tabanın hareketi ve bazı önemli geometrik bağıntılar.

Euclid geometrisini kullanarak, sistemle ilgili şu bağıntılar kolaylıkla bulunabilir:

$$x_b = \delta(t) + 2(R-r)\sin\phi \quad (E.1)$$

$$\Delta = \left[ \frac{(x_b - \delta(t))}{2} \right] \quad (E.2)$$

$$\phi \cong \left[ \frac{(x_b - \delta(t))}{2(R-r)} \right] \quad (E.3)$$

$$\theta \cong \left[ \frac{(x_b - \delta(t))R}{2(R-r)r} \right] \quad (E.4)$$

Burada  $x_b$  : Tabanın yer değiştirmesi

$\delta(t)$  : Yerin konumu

$\phi$  : Sarkaç açısını

belirtmektedir. Sistemin dikey ivmesi

$$\ddot{y}_b = 2(R-r)\left\{\ddot{\phi}\sin\phi + (\dot{\phi})^2\cos\phi\right\} \quad (E.5)$$

olarak verilebilir. Şekil E.2 temel elemanlara etkileyen kuvvetleri göstermektedir. Tabandaki ortaya çıkan toplam yatay kuvvet

$$H = \{nF_{N1}\sin\phi\}_p + \{nF_{\mu1}\operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))\cos\phi\}_f \quad (E.6)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer olarak, tabandaki toplam dikey kuvvet

$$V = nF_{N1}\cos\phi - nF_{\mu1}\operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t)) \quad (E.7)$$

$$\sin\phi = (M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b)$$

olarak yazılabilir. Burada n bilya sayısını belirtmektedir. Ayrıca

$$F_{\mu1} = \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))F_{N1} \quad (E.8)$$

$$F_{N1} = \left\{ \frac{(M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b)}{\cos\phi - \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))\sin\phi} \right\} \quad (E.9)$$

Bu denklem (E.5) de yerine konursa

$$H = (M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b) \left\{ \frac{\sin[\phi] + \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))\cos[\phi]}{\cos[\phi] - \mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))\sin[\phi]} \right\} \quad (E.10)$$

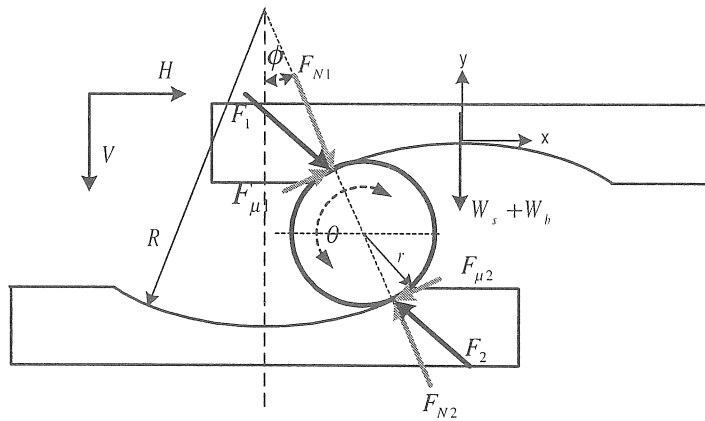
elde edilir. (E.10) yaklaşık olarak

$$H \cong (M_s + M_b)(g + \ddot{y}_b) \left\{ (\sin[\phi])_p + (\mu_0 \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{\delta}(t))\cos[\phi])_f \right\} \quad (E.11)$$

yazılabilir. Burada ilk terim (p) geri getirici sarkaç kuvvetini diğeriyse (f) sürtünme kuvvetini belirtmektedir. Sistemin doğal frekansı olarak

$$w_n = \sqrt{\frac{g}{2(R-r)}} \quad (E.12)$$

verilebilir.



Şekil E.2 Bilya ve iç bükey yatak üzerine etkileyen sarkaç- ve sürtünme kuvvetleri.