Katları Arasında İzolatör Kullanılan Betonarme Binalarda Sismik Yalıtım Etkinliğinin Belirlenmesi

Zeynel Abidin MİRKELAM[1] ve Mehmet K. DERDİMAN[2]

[1]Süleyman Demirel Üniversitesi (Emekli), ISPARTA
[2]Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ISPARTA
zam1959@hotmail.com

(Geliş/Received: 15.02.2016; Kabul/Accepted: 01.03.2016)

Özet: Taban yalıtımlı binalarda yalıtım düzeyinde meydana gelen büyük yer değiştirmelerden dolayı stabilite problemi ortaya çıkmaktadır. Deprem yönetmeliklerinde yer alan kısıtlayıcı hükümlerden dolayı taban yalıtımı tekniği, düşük ve orta yükseklikteki binalarda kullanılabilmekte, yüksek binalarda ise uygulanamamaktadır. Bu çalışmada taban yalıtımı tekniğinin yüksek binalarda da uygulanabilmesi için yapı esnekliğinin tabanda toplandığı klasik taban yalıtımı yerine, hem tabana hem de üstyapının bazı katları arasına yerleştirilen izolatörler sayesinde bina yüksekliği boyunca dağıtılmış olan esnekliğin, binanın depremsel yalıtım performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı yalıtım parametrelerine ve mesnet koşullarına sahip, kat adetleri bir ile yirmi arasında değişen, planda düzenli ve düzensiz betonarme bina modelleri oluşturulmuştur. Yeni yalıtım kavramına göre tasarlanan bina modellerinin, 1999 Gölcük Depremi'nin Yarımca-Petkim istasyonunda kaydedilen Kuzey – Güney bileşen deprem kaydına göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik çözümlemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ankastre tabanlı ve geleneksel taban yalıtımlı modellerle karşılaştırılmıştır. Üstyapı katları arasında izolatör kullanılan planda düzenli 12 katlı model ile planda düzensiz 12 ve 16 katlı modellerde depremsel davranışın olumlu etkilendiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Katlar Arası Yalıtım, Kauçuk Yatak, Pasif Yapı Kontrolü, Taban Yalıtımı.

An Investigation on the Effectiveness of Seismic Isolation in Reinforced Concrete Buildings in Which Isolators Are Used Between Stories

Abstract: Because of the large displacements at isolation level of a base isolated building, the stability problem arises. Seismic code provisions limit the base isolation technique, in practice, to buildings in the low – to medium rise range. In this study, an earthquake resistant design concept is suggested which enable the base isolation technique is used in low – to medium rise buildings as well as high rise ones. Instead of classical base isolation technique in which the structural flexibility is concentrated in the isolation level at the base of the building, the distributed flexibility along the height of the building is proposed. How the distributed structural flexibility affects the seismic isolation performance of the building is investigated. Reinforced concrete building models which are regular and irregular in plan, and have various isolation parameters, supporting conditions, number of stories (varying 1 to 20) is prepared. The seismic response of new isolation concept building models subjected to N – S component of 1999 Golcuk Earthquake (Yarımca-Petkim) input is evaluated and compared with the responses of the corresponding fixed base and conventional base isolated models. The results demonstrate that using isolators between storeys of superstructure improves seismic response in 12 storey model which is regular in plan and in 12 and 16 storey model which are irregular in plan.

Keywords: Isolation between Stories, Rubber Bearing, Passive Structural Control, Base Isolation.

1. Giriş

Depreme dayanıklı yapı tasarımındaki geleneksel yaklaşıma göre; yapının inşa edileceği bölgede zemin koşulları uygun özellikler göstermeli, yapı mümkün olduğu kadar hafif, temel ise olabildiğince ağır ve tek parça olmalıdır. Dayanım, rijitlik ve süneklik hareketleri sırasında yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olmalıdır. Bu gereklilikler istenen düzeyde sağlanmalı, yapının doğal periyotları beklenen depremin hâkim, periyodundan farklı olmalı ve yapı, deprem bir yapının Newton'un 2. Kanunu'na göre hesaplanan deprem veya eylemsizlik

kuvvetlerini taşımak için yeterli dayanıma sahip olması gerektiği kabulüne dayanmaktadır.

Meydana gelen şiddetli depremlerde çok sayıda modern mühendislik yapısında oluşan hasarlar, yapıların depreme karşı olan güvenliğinde niteliksel bir iyileştirmeye ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Depreme dayanıklı yapı tasarımı ve yapımında, yapıya gelen deprem kuvvetlerine karşı koyabilmek için ona daha yüksek dayanım sağlamak yerine, yapıları azaltılmış depremsel kuvvetlere göre tasarlamanın daha akılcı bir yol olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yaklaşımda, yapıya gelen deprem kuvvetlerinin etkisi, titreşimleri deprem yalıtımı ve enerji sönümlemesi yoluyla kontrol eden özel yapı elemanları yardımıyla azaltılır. Çoğu kez temel yapısının üstüne yerleştirilen bu elemanlar, enerji yutma veya enerjiyi azaltarak iletme özellikleri ile üstyapıdaki deprem enerji girdisini azalttıklarından dolayı, depreme göre tasarlanmış bu tip yapılara "taban yalıtımlı yapılar" ve yalıtımın kendisine "taban yalıtımı" adı verilmektedir.

Yapısal kontrol ve taban yalıtımı; yeni olmasına karşılık, her geçen gün gelişen bir konudur. Yalıtım sistemlerinin donanım mekaniği ve malzeme deneyleri, doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik analiz, sarsma masası deneyleri, inşaatlarda kurulması ve performansı gibi çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu alanda yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenerek sunulmuştur:

Matsagar ve Jangid [1], taban yalıtımı donanımları kullanılarak iyileştirilen yapıların depremsel davranışlarını analitik olarak araştırmış, yalıtım düzenlerine örnekler vermiş, iyileştirme çalışmalarında elastomerik yataklar ve kayıcı sistemler gibi yalıtım donanımlarının farklı türlerini iyileştirme çalışmalarındaki performansları bakımından değerlendirmişlerdir.

Sharma ve Jangid [2], taban yalıtım sistemi kullanılan çok katlı yapıların sismik davranışını gerçek deprem hareketi altında analitik olarak araştırmışlardır. Yalıtım sistemindeki yüksek başlangıç rijitliğinin yapının yüksek salınım modlarını etkileyerek kat ivmelerinde ve kat ötelenmelerinde önemli miktarda artışa; yalıtım yataklarındaki yer değiştirmelerde ve taban kesme kuvvetinde ise hafifçe azalmaya yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Lakshmanan vd. [3], tek eksenli deprem hareketi etkisinde olan, doğal kauçuktan yapılmış taban yalıtımı sistemine monte edilmiş, yumuşak birinci katlı 1/3 ölçekli betonarme bir yapı modelinin analitik ve deneysel araştırmalar yapmışlardır. Geniş bir frekans aralığını içeren dört farklı yapay yapay ivme-zaman geçmişi etkisi altında modelin ötelenme ve salınım davranışlarını ölçmüşler; taban yalıtımlı modelde yatay modun spektrum pik bölgesinden çok uzakta olmasına rağmen, salınım modlarının pik bölgenin tam içine düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bundan dolayı, devrilmeye karşı koruyacak basitleştirilmiş bir güvenlik sistemi üzerinde çalışmışlardır.

Warn vd. [4], elastomerik ve kurşun-kauçuk sismik yalıtım yataklarındaki yanal yer değiştirmenin, yatakların düşey rijitliği üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel çalışma yapmışlardır. Bu ilişkiyi bulabilmek amacıyla biri düşük sönümlü kauçuktan, diğeri kurşun-kauçuktan inşa edilmiş olan iki özdeş yalıtım yatağını, değerleri değişen yanal yer değiştirme ve eksenel basma kuvvetlerinin bir kombinasyonuna maruz bırakmışlardır. Test sonuçları, her iki tür yatakta da yanal yer değiştirme arttıkça düşey rijitliğin azaldığını göstermiştir.

Kaab ve Ounis [5], taban yalıtımı sistemindeki etkili sönüm üzerine parametrik bir çalışma yapmışlardır. Sismik taban yalıtım sistemindeki sönümün, yer değiştirme, ivme, katlar arası ötelenme ve yutulan enerji gibi depremsel davranışlar üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir.

Ryan ve Earl [6], yerleştirildikleri konumların bir fonksiyonu olarak katlar arası yalıtım sistemlerinin etkinliğini sistematik olarak inceleyerek, yalıtım sistemlerinin özelliklerini seçme hususunda alternatif bir yaklaşım getirmişlerdir. Tekli yalıtım sisteminin, yalıtım düzeyinin üst kısmındaki kuvvet talebini azaltmada etkili olduğunu, ancak yalıtım düzeyinin altı için az etkili olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yenidoğan ve Uçkan [7], orta iki kolonunun altında yüksek sönümlü kauçuk yataklar, dört köşe kolonunun altında ise düz tip kayıcı yatak bulunan hibrit-pasif taban yalıtımlı üç katlı ¼ ölçekli çelik bir yapı modeli üzerinde deneysel çalışma yaparak taban yalıtım sisteminin

etkinliğini araştırmışlardır. Dinamik benzeşimi muhafaza etmek amacıyla, her bir deprem kaydını 2 çarpanıyla küçültmüşlerdir. Taban yalıtımlı ve ankastre tabanlı model sonuçlarını karşılaştırarak, hibrit-pasif taban yalıtımının etkinliğini doğrulamışlardır.

Ni vd. [8], taban yalıtım sistemlerinin davranışları ve ilkeleri üzerinde çalışarak, taban yalıtımının türlerini ve karakteristiklerini tartışmışlardır. Geleneksel depreme dayanıklı yapılar ile taban yalıtımlı yapıların depremsel davranışlarını karşılaştırarak, taban yalıtımı uygulanan binalarda genel depremsel davranışın 1/4 ila 1/32, üstyapıdaki depremsel kayma gerilmelerinin ise 1/14 ila 1/23 düzeyine kadar azaldığını ifade etmişlerdir.

Sesigur ve Cili [9], İstanbul-Türkiye'de bulunan Sabiha Gökçen Havalimanının hangar projesinde kolonların üstünde yer alan sismik yalıtım sistemini incelemişlerdir. Yalıtım sisteminin etkinliğini göstermek amacıyla doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler yapmışlardır. Analiz sonuçları, yalıtımlı olmayan duruma göre yalıtımlı yapıdaki taban kesme kuvvetinin dörtte bire düştüğünü göstermiştir.

Taban yalıtımı genellikle binanın temeli ile üstyapısı arasına yerleştirilen düşey rijitliği yüksek, yatay rijitliği düşük olan kauçuk yataklar veya kayıcı tipteki sistemler kullanılarak sağlanır. Böylece yatay deprem kuvvetlerinin üstyapıya azaltılarak aktarılmasıyla, taşıyıcı sisteme ait olan ve olmayan elemanların hasar görmesi büyük ölçüde önlenir. Ancak yapının yatay ötelenmesinin büyük bir kısmı temel düzeyinde yığılmış olduğundan; üstyapının katları arasındaki göreli yer değiştirmeler oldukça küçük kalırken, temel düzeyindeki yer değiştirmeler büyük ölçüde artmaktadır. Taban yalıtım düzeyinde meydana gelen büyük yer değiştirmelerden dolayı yapının yanal stabilitesinin bozulma tehlikesine karşı önlem olarak yapı yönetmeliklerine konulan birçok kısıtlama, taban yalıtımının uygulanabilirlik alanını düşük ile orta yükseklikli yapılar arasında sınırlamaktadır.

Bu çalışmada, taban yalıtımının yüksek binalarda da uygulanabilmesine imkân sağlayacak bir yaklaşım ele alınmıştır. Çok katlı binalarda, yalıtım elemanlarının binanın sadece temel düzeyinde değil, üstyapısının bazı katları arasında da bulunması durumu göz önüne alınıp, değişik sistem parametreleri için yapısal çözümlemeler yapılarak sonuçlar irdelenmiştir. Böylece, esnekliğin sadece temel düzeyinde kaldığı geleneksel taban yalıtımı tekniğinden farklı olarak; üstyapıdaki bazı katlar arasına da dağıtılmış olan bina esnekliğinin yapısal davranışı ne şekilde etkilediği ve üstyapı katları arasında da yalıtım elemanları kullanma düşüncesinin, uygulamada kullanılabilir bir yalıtım kavramı olup olamayacağı sorusunun cevabı araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sayısal çözümlemede kullanılan bina modelleri

Planda düzenli ve düzensiz olan iki durum için kat adetleri 1, 4, 8, 12, 16 ve 20 olan betonarme bina modelleri hazırlanmıştır (Şekil 1).

Tüm bina modellerinde kiriş boyutları 25cm/60cm olup, kolon boyutları binaların kat adetlerine göre değişiklik göstermektedir. 12 cm kalınlığındaki döşemelerin rijit diyafram olarak çalıştığı kabul edilmiştir. Kat yükseklikleri 3 m olarak alınmıştır. Modellerin kat adetlerine göre kolon boyutları Tablo1'de verilmiştir.

2.2. Kullanılan Yalıtım Elemanlarının ve Betonun Malzeme Özellikleri

Uygulamada yalıtım yatakları Şekil 2'de görülen üç parametre (K_1, K_2 ve Q) esas alınarak iki-doğrusal davranışa sahip olan malzeme olarak modellenmiştir. Modellerde kullanılan yüksek sönümlü kauçuk yatağın elastik yanal rijitliğini ifade eden K_1 ve karakteristik yanal dayanımını ifade eden *Q*, malzeme deneylerine ait mevcut çevrim halkalarından (hysteresis loops) yararlanılarak tahmin edilmiştir.

K_2 ise kauçuk malzemenin akma sonrası rijitliğidir ve doğrulukla belirlenebilir. Etkili rijitlik K_{eff} ile gösterilir ve diyagramda pik değerlere karşılık gelen nokta ile orijini birleştiren doğrunun eğimi olarak tanımlanır ve

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \ (D \geq D_y) \qquad (1)$$

eşitliğiyle verilir. Burada D_y akma yer değiştirmesidir. Akma yer değiştirmesi ise ana parametreler cinsinden

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \qquad (2)$$

şeklinde yazılabilir.

Çevrim halkasının alanı, her çevrimde sönümlenen enerjiye eşittir ve W_D ile gösterilen bu değer;

$$W_D = 4Q\left(D - D_y\right) \qquad (3)$$

ile verilir. Etkili sönüm olan β_{eff} ise

$$\beta_{eff} = \frac{4Q\left(D - D_y\right)}{2\pi K_{eff} D^2} \qquad (4)$$

formülüyle tanımlanır. Boyutsuz yer değiştirmeyi $y = \frac{D}{D_y}$ ve boyutsuz karakteristik dayanımı $a = \frac{Q}{K_2 D_y}$ olarak tanımlayarak; etkili sönümün boyutsuz büyüklükler cinsinden ifadesi,

$$\beta_{eff} = \frac{2a}{\pi} \frac{y-1}{(y+a)y} \qquad (y \geq 1) \qquad (5)$$

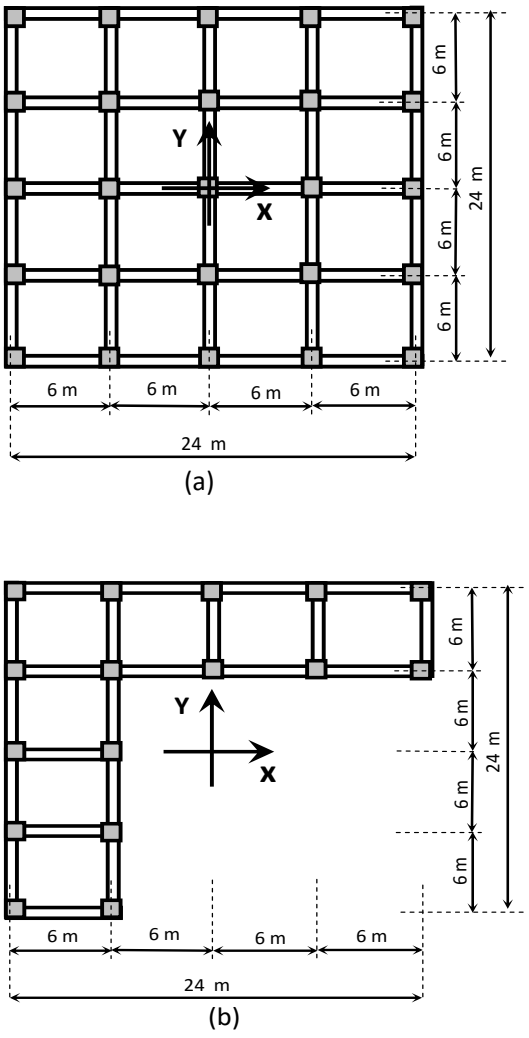
olarak elde edilir. a nın sabit olması durumunda, y=1 için β=0 dır ve $y \to \infty$ iken sıfıra gider. β'nın maksimum değeri $d\beta / dy = 0$ olan $y = 1 + (1+a)^{1/2}$ değerine karşılık gelir ve

$$\beta_{max} = \frac{2a}{\pi} \frac{1}{2(1+a)^{1/2} + (2+a)} \qquad (6)$$

olarak bulunur.

$$a = \frac{Q}{K_2 D_y} = \frac{K_1 - K_2}{K_2} \qquad (7)$$

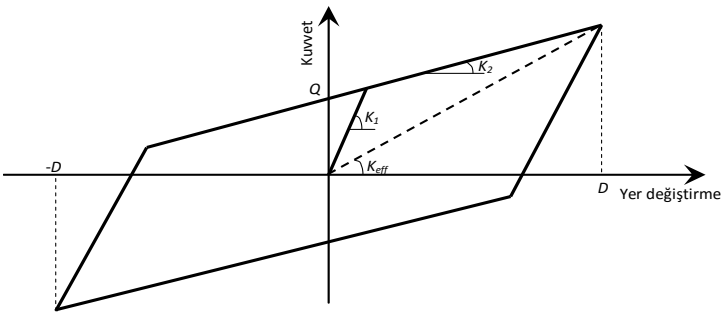
elde edilir. Buradan etkili sönümün maksimum değerinin sadece K_1 / K_2 oranına bağlı olduğu sonucu çıkar. İkinci eğim K_2 nin kolayca ve doğrulukla belirlenebilmesine karşılık, birinci eğim K_1 in doğrulukla belirlenebilmesi zordur ve bu değer geniş bir aralıkta değişir. Karakteristik dayanım olan Q da doğrulukla belirlenebildiğinden K_1 değerinin etkili rijitlik üzerinde bir etkisi yoktur. Ancak K_1 değerinin sönüm, özellikle de maksimum sönüm üzerinde büyük etkisi vardır [10]. Sayısal çözümlemede üç tip kauçuk yatak kullanılmış ve bu malzemelere ait mekanik özellikler Tablo 2'de, betonarme bina modellerinde kullanılan betonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 1. Betonarme bina planları: (a) Planda düzenli bina, (b) Planda düzensiz bina

Tablo 1. 12 katlı bina modellerindeki kolon boyutları

Kolonun bulunduğu kat	Kolon boyutu (cm)
9, 10, 11, 12	40/40
5, 6, 7, 8	50/50
1, 2, 3, 4	60/60



Şekil 2. Kauçuk yatakta çevrim halkası ve malzeme parametreleri

Tablo 2. Modellerde kullanılan kauçuk yatakların mekanik karakteristik değerleri (Naeim ve Kelly [10] ve Karabörk [11] 'den esinlenerek düzenlenmiştir)

Kauçuk yatak tipi	Eksenel rijitlik (kN/m)	Etkili kayma rijitliği (K_{eff}) (kN/m)	Başlangıç kayma rijitliği(K_1) (kN/m)	Kayma akma kuvveti (kN)	Akma sonrası / Akma öncesi kayma rijitlik oranı (K_2/K_1)	Yatak kütlesi (10^3 kg)
Yumuşa	$0{,}5.10^6$	500	1750	22,5	0,20	0,150
Orta	$1{,}1.10^6$	1100	7900	79,0	0,04	0,150
Sert	$2{,}8.10^6$	1900	12500	125,0	0,06	0,150

Tablo 3. Bina modellerinde kullanılan betonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Betonun	Birimi	Değeri
Birim hacim	kg/m^3	2400
Birim hacim	kN/m^3	23,54
Elastisite	GPa	25,00
Poisson oranı	-	0,2

2.3. Deprem hareketi

Dinamik çözümlemede, 17 Ağustos 1999 Gölcük Depremi'nin, Yarımca-Petkim istasyonunda ölçülen ve pik değeri 0,33g olan Kuzey-Güney bileşeninin, hazırlanan bina modellerine X ekseni doğrultusunda etkidiği düşünülmüştür (Şekil 3). 135 s süren deprem kaydına ait 0,005 s (örnekleme aralıklı ivme değerleri (9) denklemindeki $\ddot{u}_g(t)$ olarak kullanılıp, binaların hareket denklemleri zaman tanım alanında (time-history) 27000 adımda çözülmüştür.

2.4. Hazırlanan bina modellerinin yalıtım ve mesnet koşulları

Oluşturulan yapı modellerinin kat adetleri; 1, 4, 8, 12, 16 ve 20 dir. 1 ve 4 katlı olanlar dışındaki yapı modelleri, her biri dört kattan oluşan ve kolon rijitlikleri aynı olan parçalardan oluşmaktadır. İlave yalıtımlı modellerde; bina tabanında taban yalıtımı, parçalar arasında ise ilave yalıtım elemanları bulunmaktadır. Yalıtım elemanı olarak hem tabanda hem de parçalar arasında yumuşak, orta sert ve sert tip kauçuk yataklar kullanılmıştır. Her kat adedi için betonarme bina modelleri; ankastre tabanlı, sadece taban yalıtımlı ve hem tabanda hem de üstyapı parçaları arasında yalıtımlı olmak üzere üç ayrı mesnet koşuluna sahip olarak hazırlanmış ve değişik mesnet ve yalıtım tipi kombinasyonları için çözümlemeler yapılmıştır. Üstyapı katları arasına yerleştirilen yalıtım elemanlarının, yüksek yapı (10 kattan daha yüksek) kategorisine giren binalardaki etkinliği araştırılmıştır. 1, 4 ve 8 katlı modeller ise sadece karşılaştırma yapmak ve çalışmada bütünlük sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Hazırlanan bina modellerinden 12 katlı olanlar

Şekil 4'te görülmektedir. Mesnet koşullarının ve yalıtım elemanlarının değişik her durumu için farklı bir model elde edildiğinden, başvuru kolaylığı amacıyla her farklı modele kısa adlar verilmiştir. A modeli ankastre tabanlı binayı, Y, O ve S modelleri sırasıyla yumuşak, orta sert ve sert tip kauçuk yatak kullanılan taban yalıtımlı binaları göstermektedir. YİO ve YİS modelleri ise tabanda yumuşak tip, üstyapı parçaları arasında ise sırasıyla orta sert ve sert tipte kauçuk yatak kullanılan binaları ifade etmektedir.

2.5. Metot

Çelik ve betondan yapılmış olan tipik mühendislik yapılarında büyük şekil değiştirmeler çok seyrek olarak meydana gelir.

Kauçuk izolatörlerin kullanıldığı taban yalıtımlı yapılarda ise büyük şekil ve yer değiştirmeler oluşur ve bu davranışların önemli bir kısmı izolatörlerde toplanır.

Bu gibi yapılarda sadece izolatörlerin doğrusal olmayan davranış gösterdiği, diğer elemanların doğrusal davrandığı kabulüyle yapılan çözümlemeye "Doğrusal Olmayan Hızlı Çözümleme" adı verilmekte ve doğrusal olmayan eleman sayısı az olan bu gibi yapıların dinamik çözümlemesi, hemen hemen doğrusal bir çözümleme kadar hızlı yapılabilmektedir. Yapısal Çözümleme, Prof. Wilson tarafından geliştirilen "Doğrusal Olmayan Hızlı Çözümleme" yöntemiyle yapılmıştır. Dinamik çözümlemede "SAP 2000 Nonlinear (Sürüm 8.12)" kullanılmıştır [12].

Hazırlanan yapı modellerinde kolon ve kirişler çubuk eleman, döşemeler ince plak eleman olarak göz önüne alınmıştır. Binanın diğer statik yüklerini de göz önüne almak amacıyla, döşemelerin öz ağırlıkları 1,5 ve kirişlerin öz ağırlıkları 2 ile çarpılmıştır. Binaların tabanında ve katlar arasında bulunan kauçuk izolatörler ise Şekil 2'de görülen iki-doğrusal kuvvet-yer değiştirme bağıntısına sahip elemanlar olarak düşünülmüş ve Tablo 3'te verilen mekanik karakteristikleriyle tanımlanmıştır.

Bazı katları arasında ilave yalıtım elemanları bulunan çok serbestlik dereceli sistemler, ilave yalıtım elemanları arasında kalan bölümleri kayma kirişlerinden oluşan binalardır.

Döşemelerin rijit diyafram olarak çalıştığı ve kolonlardaki eksenel deformasyonların ihmal edilebilecek düzeyde küçük olduğu kabul edilmiştir.

Bu yüzden, her bir döşeme için olası tek yer değiştirmenin yanal doğrultuda olduğu açıktır. Bu durumda *i*. kat için yanal rijitlik k_i

$$k_i = \frac{12EI_i}{h_i^3} \qquad (8)$$

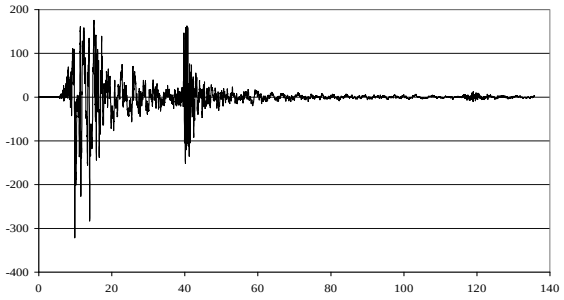
şeklinde belirlenir. Burada E kolon malzemesinin elastisite modülünü, I_i *i*. kattaki tüm kolon enkesit alanlarının eylemsizlik momentleri toplamını ve h_i *i*. katın yüksekliğini gösterir. İlave yalıtımlı bir binanın dinamik çözümlemesinde; tabandaki ve üstyapı parçaları arasındaki yalıtım sistemleri, yanal rijitliği (k_{bi})

ve kat yüksekliği sıfır olan katlar olarak göz önüne alınabilir. Sistemin hareket denklemi D'Alembert ilkesi kullanılarak yazılabilir. $v_i(t)$ i. katın göreli yanal yer değiştirmesi olmak üzere sistemin hareket denklemi matris biçiminde,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{v}(t) = -\mathbf{M}\{\mathbf{1}\}\ddot{u}_g(t) \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Burada **M**, **C** ve **K** sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrisleridir. $\{\mathbf{1}\}$ ise birim vektördür ve her bir yanal serbestlik derecesini $\ddot{u}_g(t)$ yatay yer ivmesine bağlar. Rijitlik matrisi (10) eşitliğiyle verildiği gibidir. Yalıtım sistemlerinin bulunduğu katlarda kat rijitliği olan k_i yerine yalıtım sisteminin yanal rijitliği olan k_{bi} kullanılmıştır. Her katın kütlesi toplu kütle olarak düşünülerek i. katın kütlesi m_i ile gösterilmiştir. Kütle matrisi **M**, m_i (i=1, 2, …..,n) lerden oluşan köşegen matristir. Yalıtım sistemlerinin bulunduğu katlarda katın toplu kütlesi m_i yerine yalıtım elemanlarının toplam kütlesi olan m_{bi} konulmuştur. Sistemin viskoz sönümü ise modal sönüm oranları cinsinden ifade edilmiştir [13].

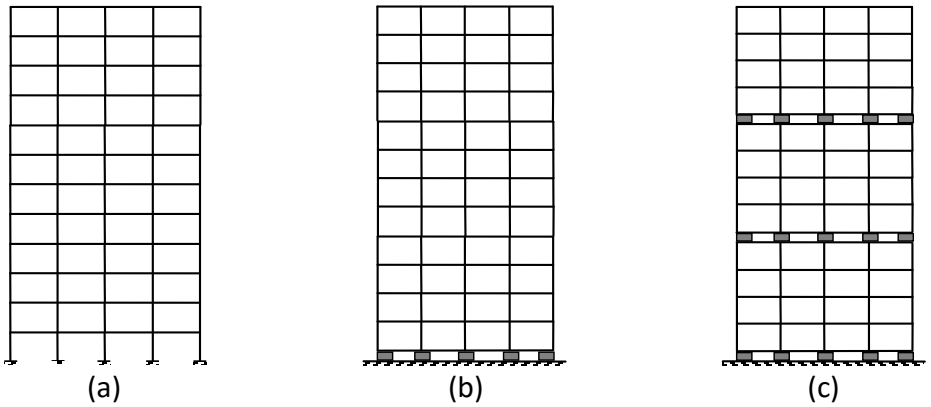
$$K = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & ..... & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & ..... & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & 0 & 0 & ..... & 0 \\ ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... \\ 0 & 0 & 0 & ..... & -k_i & k_i+k_{i+1} & -k_{i+1} & 0 \\ ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... & ..... \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & k_n \end{bmatrix} \quad (10)$$



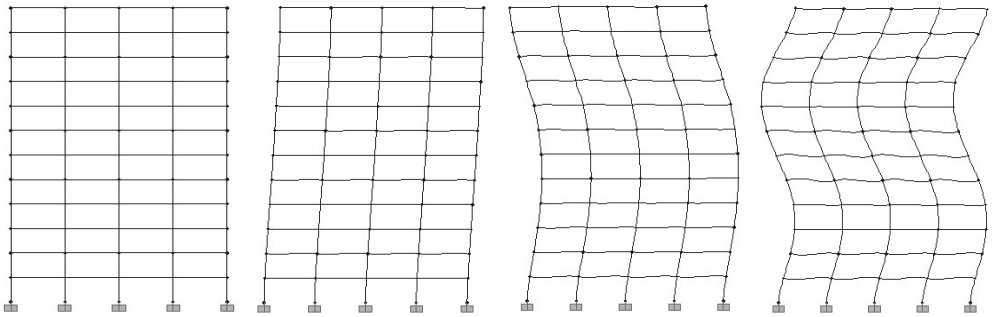
Şekil 3. Gölcük Depremi'nde Yarımca-Petkim'de ölçülen ivme değerleri

3. Bulgular

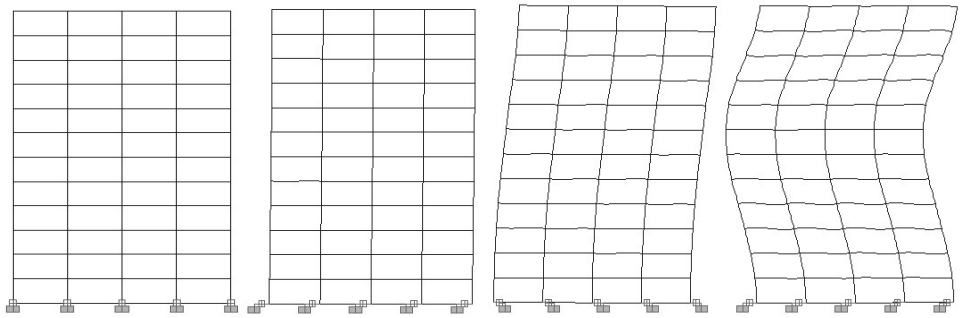
Oniki katlı planda düzenli binaya ait 13 değişik yapı modeli tasarlanarak yapı analizi yapılmıştır. Yapı analizi sonuçları Şekil 5 -10 ile Tablo 4 - 7'de özetlenmiştir.



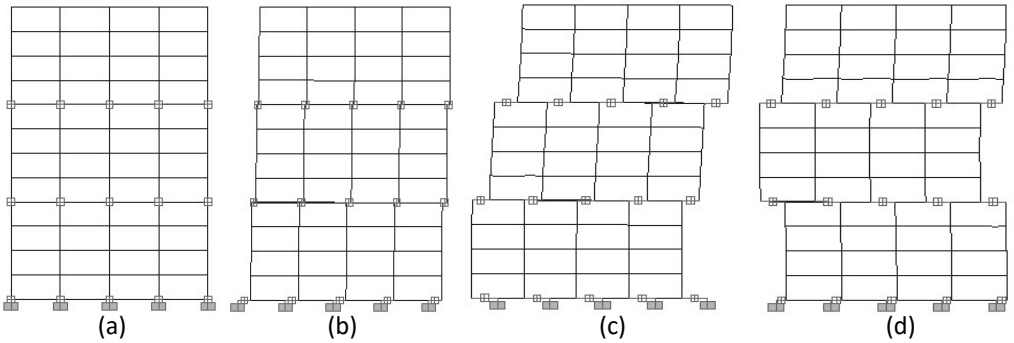
Şekil 4. Oniki katlı bina modelleri: (a) Ankastre tabanlı, (b) Taban yalıtımlı, (c) Hem tabanda hem üstyapı katları arasında yalıtımlı



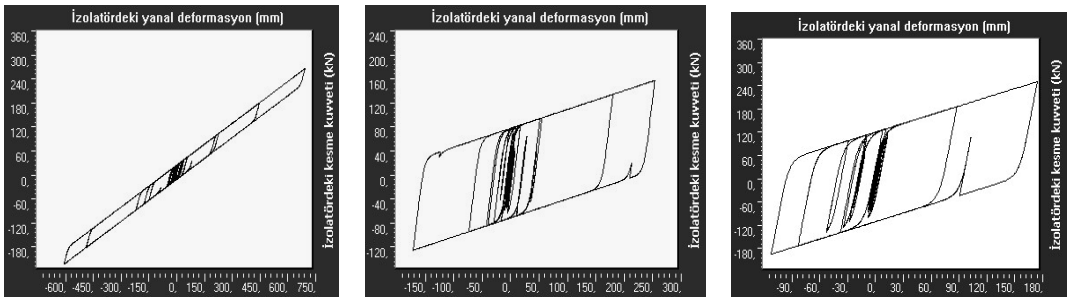
Şekil 5. Ankastre temelli (Model A) oniki katlı yapının: (a) şekil değiştirmemiş hali, (b) birinci, (c) ikinci, (d) üçüncü mod şekilleri (x-z düzlemindeki görünüş)



Şekil 6. Taban yalıtımlı (Model Y- Yumuşak tip kauçuk yatak kullanılmış) oniki katlı yapının: (a) şekil değiştirmemiş hali, (b) birinci, (c) ikinci, (d) üçüncü mod şekilleri (x-z düzlemindeki görünüş)

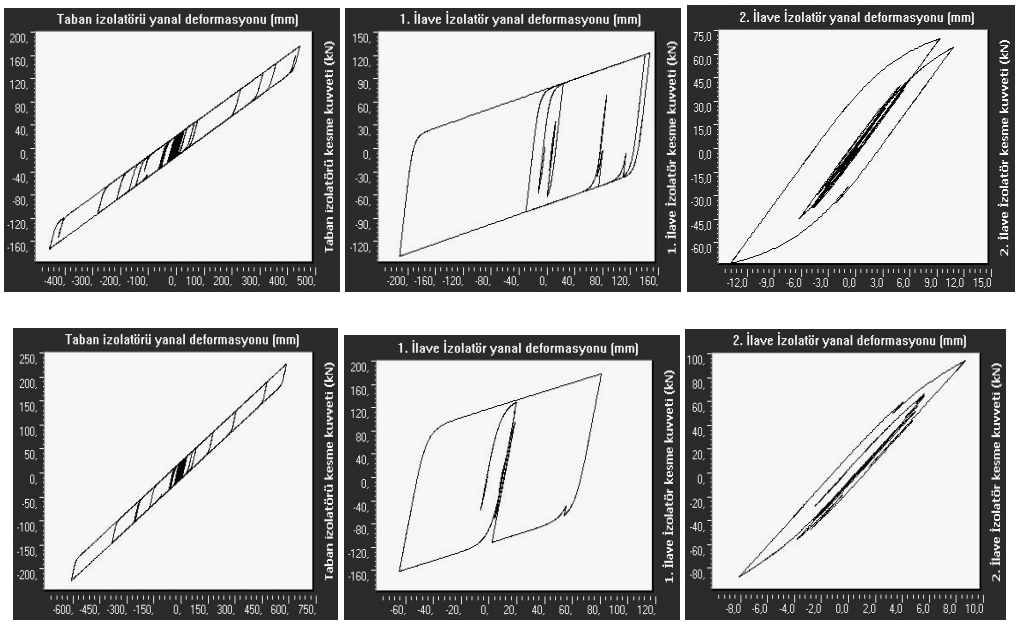


Şekil 7. İlave yalıtımlı (Model YİO- Tabanda yumuşak, üstyapı katları arasında orta sert kauçuk yatak kullanılmış) oniki katlı yapının: (a) şekil değiştirmemiş hali, (b) birinci, (c) ikinci, (d) üçüncü mod şekilleri (x-z düzlemindeki görünüş



(a) (b) (c)

Şekil 8. Oniki katlı taban yalıtımlı yapının orta kolon altındaki taban izolatörlerinde kesme kuvveti-yanal deformasyon diyagramları: (a)Model Y (Taban yalıtımlı-Yumuşak tip kauçuk yatak kullanılmış), (b) Model O (Taban yalıtımlı-Orta sert tip kauçuk yatak kullanılmış), (c) Model S (Taban yalıtımlı-Sert tip kauçuk yatak kullanılmış)



(a)

(b)

Şekil 9. Oniki katlı ilave yalıtımlı yapının orta kolon altındaki taban izolatöründe ve orta kolondaki izolatörlerinde kesme kuvveti-yanal deformasyon diyagramları: (a) Model YİO (İlave yalıtımlı-Tabanda yumuşak, üstyapı katları arasında orta sert kauçuk yatak), (b) Model YİS (İlave yalıtımlı-Tabanda yumuşak, üstyapı katları arasında sert kauçuk yatak)

Tablo 4. Oniki katlı binada ötelenme ve taban reaksiyonlarının maksimum değerleri

Model tipi	Davranış cinsi				
	Δ_t (mm)	Δ_b (mm)	Δ_t-Δ_b (mm)	C_{bs} (%)	C_{he} (%)
A	211,5	-	211,5	20,6	63,5
Y	818,9	711,1	107,8	11,3	53,5
O	320,2	259,3	60,9	6,7	58,1
S	247,9	178,0	69,9	10,6	49,9
YİO	704,0	456,3	247,7	6,9	54,4
YİS	757,2	607,3	149,9	9,0	55,2

Tablo 5. Oniki katlı binada orta izolatörlerde enerji bileşenleri ile kesme kuvveti ve yatay deformasyonun maksimum değerleri

	U_T (kN.m)	U_{MD}/U_T (%)	U_{his}/U_T (%)	δ_b (mm)	δ_i (mm)	δ_2 (mm)	F_b (kN)	F_i (kN)	F_2 (kN)
Y	6894	51	45	711,1	-	-	267	-	-
O	4257	27	73	259,3	-	-	158	-	-
S	4140	34	66	178,0	-	-	251	-	-
YİO	7123	36	64	456,3	211,3	13,8	178	143	74,9
YİS	7520	45	53	607,3	82,9	8,9	231	180	94,9

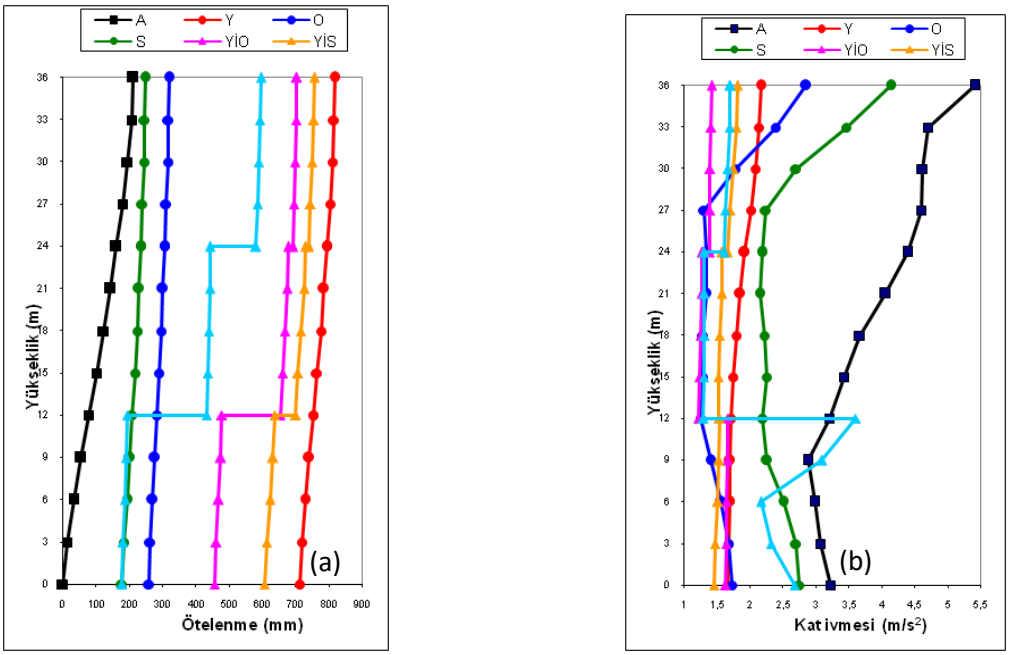
Tablo 6. Oniki katlı binada ilk beş moda ait doğal titreşim periyotları

Model tipi	Davranış cinsi				
	T(s)	T_2(s)	T_3(s)	T_4(s)	T_5(s)
A	1,270	0,458	0,265	0,184	0,138
Y	3,658	0,734	0,363	0,230	0,170
O	2,604	0,700	0,359	0,228	0,170
S	2,118	0,667	0,355	0,227	0,169
YİO	4,330	1,394	0,856	0,304	0,243
YİS	4,129	1,173	0,678	0,295	0,234

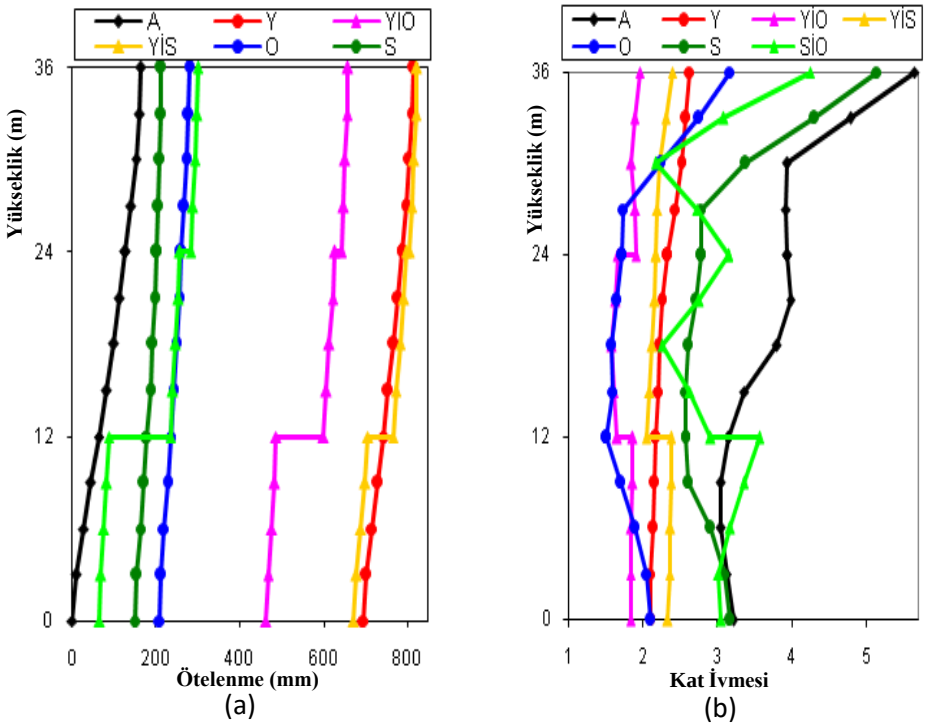
Tablo 7. Oniki katlı binada alt ve üst kattaki orta kolonlarda oluşan maksimum iç kuvvetler

Model tipi	Davranış cinsi			
	V_{cb} (kN)	V_{ct} (kN)	M_{cb} (kN.m)	M_{ct} (kN.m)
A	500	80,1	1168	134
Y	293	35,8	667	59,7
O	187	40,4	415	67,2
S	262	58,9	584	97,9
YİO	184	18,1	416	30,6
YİS	247	23,2	563	39,2

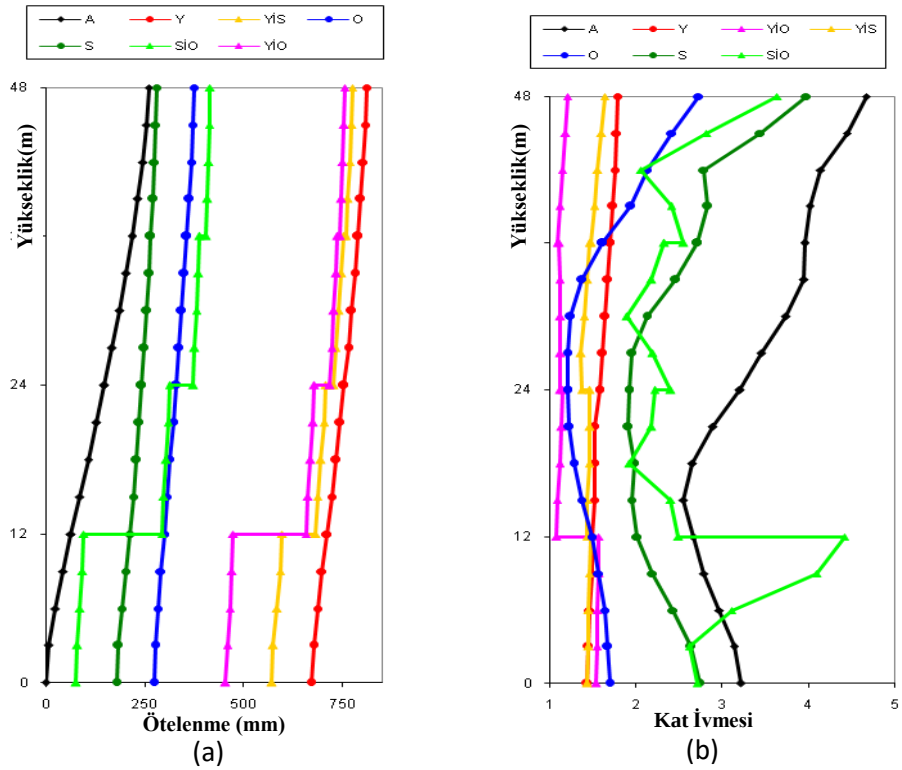
İlgili taban yalıtımlı modele göre yapı davranışını her yönüyle iyileştiren beş tane ilave yalıtımlı model olduğu ortaya çıkmıştır: Düzenli yapı modellerinden 12 katlı YİO ve YİS ile düzensiz yapı modellerinden 12 katlı YİO modeli ile 16 katlı YİO ve YİS modelleri. Bu yapı modellerinin, ankastre tabanlı ve taban yalıtımı aynı olan taban yalıtımlı modellere göre sağladığı iyileştirmeler Tablo 8'de, ortalama kat ivmesinin yapı yüksekliğine göre değişimi ise Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 10. 12 katlı düzenli binada değişik modellere ait: (a) ötelenme, (b) ivme profilleri



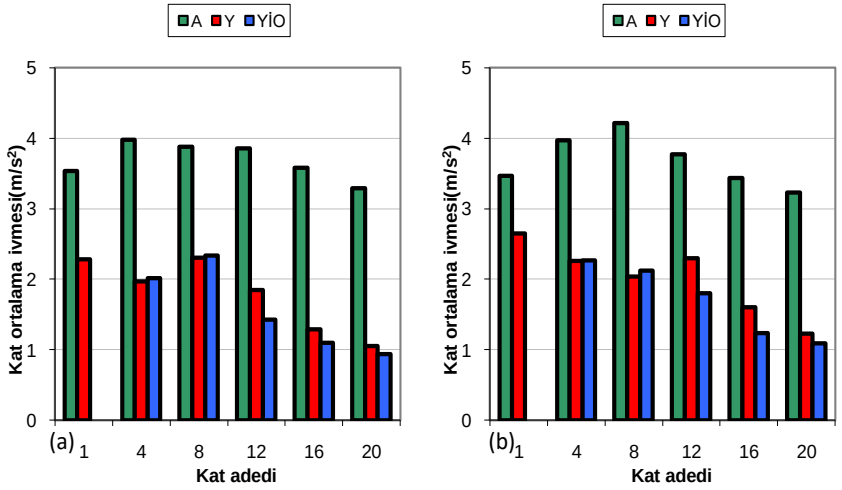
Şekil 11. 12 katlı düzensiz bina modellerinde; (a) ötelenme, (b) ivme profili



Şekil 12. 16 katlı düzensiz bina modellerinde; (a) ötelenme profili, (b) ivme profili

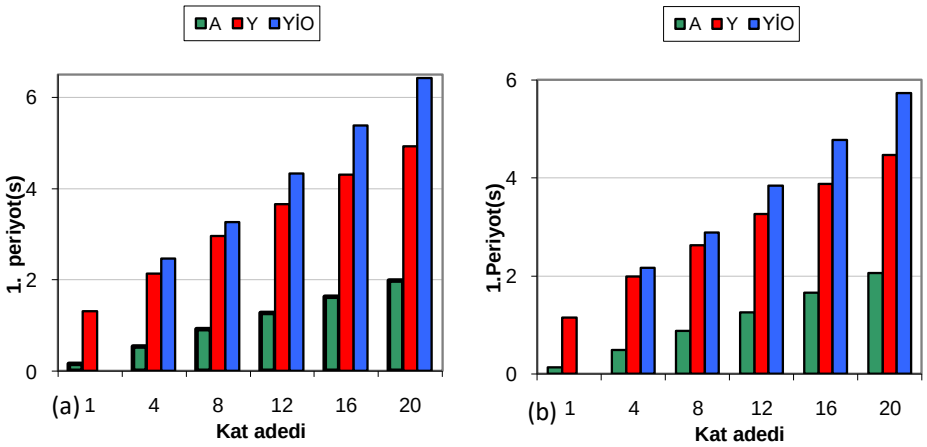
Tablo 8. Etkili iyileştirme sağlayan ilave yalıtımlı modellerin ankastre tabanlı ve taban yalıtımlı modellerle karşılaştırılması

Plan durumu	Kat adedi	Model adı	Taban kesme kuvveti katsayısı (%)	Taban izolatöründeki deform. (mm)	Üst kattaki toplam ötelenme (mm)	Göreli ötelenme topl. (mm)	Ortalama kat ivmesi (m/s^2)
Düzenli	12	A	20,6	-	211,5	211,5	3,86
	12	Y	11,3	711,1	818,9	107,8	1,85
	12	YİO	6,9	456,3	704,0	57,5	1,43
	12	YİS	9,0	607,3	757,2	77,1	1,60
-	12	A	19,4	-	164,6	164,6	3,77
	12	Y	14,1	695,1	814,1	119,0	2,30
	12	YİO	9,0	462,1	657,7	66,3	1,80
	16	A	16,0		260,8	260,8	3,44
	16	Y	10,1	670,8	810,1	139,3	1,60
	16	YİO	6,5	455,1	754,9	77,2	1,24
	16	YİS	8,0	570,7	774,7	96,0	1,47

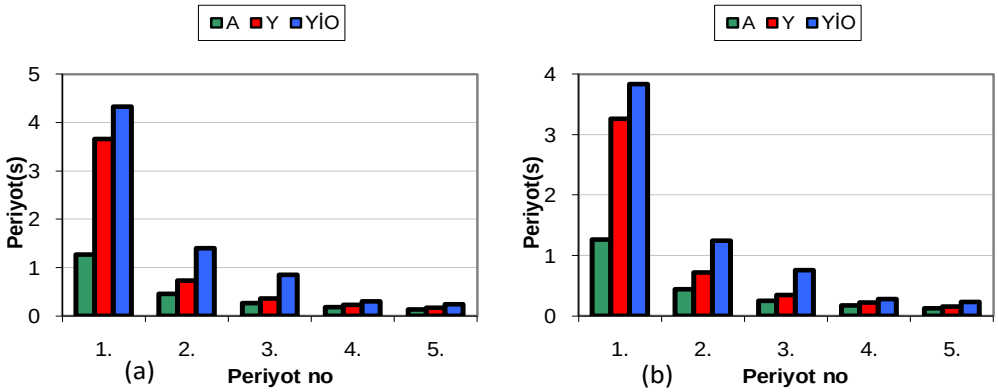


Şekil 13. Ortalama kat ivmesinin bina yüksekliğine göre değişimi: (a) düzenli modeller, (b) düzensiz modeller

Ankastre tabanlı (model A), taban yalıtımlı (model Y) ve ilave yalıtımlı (model YİO) düzenli ve düzensiz modellere ait bina yüksekliğine bağlı olarak 1. periyot değişimleri Şekil 14'te, ilk beş periyot değerleri Şekil 15'te, yapı yüksekliğine göre "taban kesme kuvveti katsayısı" ve "etkili kütle yüksekliği" değerlerinin değişimi ise Şekil 16 ve Şekil 17'de görülmektedir.



Şekil 14. Ana periyotların bina yüksekliğine göre değişimi: (a) düzenli modeller, (b) düzensiz modeller



Şekil 15. 12 katlı modellerde ilk beş periyot değerleri: (a) düzenli modeller, (b) düzensiz modeller

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, kat adetleri 1 ile 20 arasında değişen, planda düzenli ve düzensiz olan betonarme binaların, tabanı ankastre, tabanı kauçuk yalıtımlı ve hem tabanı hem de üstyapının bazı katları arası kauçuk yalıtımlı olan üç değişik modeller hazırlanmış ve tek doğrultulu yatay bir deprem hareketinin etkisi altındaki performansları inceleniştir. Binanın deprem anındaki davranışını büyük ölçüde belirleyen periyot, en küçük değerini ankastre tabanlı modelde almakta, taban yalıtımlı modelde büyük ölçüde artan bu değer, ilave yalıtımlı modelde daha da büyümektedir. Yalıtımlı modellerde yalıtım sisteminin rijitliği azaldıkça ve bina yüksekliği arttıkça periyot değeri artmaktadır.

Yapıların deprem sırasındaki en önemli davranış karakteristiklerinden biri, yapının taban reaksiyonları olan taban kesme kuvveti, diğeri ise devrilme momentidir. Taban kesme kuvveti yapının ağırlığına bölünerek normalize edilmekte ve bu değere "taban kesme kuvveti katsayısı" adı verilmektedir. Taban kesme kuvveti katsayısının ankastre modele göre azaldığı yalıtımlı modelin, ötelenme dışındaki tüm yapısal davranışlarının iyileştiği görülmüştür. Bu nedenle bir yapıda depremsel taban kesme kuvvetinin azaltılması büyük önem taşımaktadır. Devrilme momentinin taban kesme kuvvetine oranı ise yapının "etkili kütle yüksekliği" adını almaktadır. Etkili kütle yüksekliğinin yapının toplam yüksekliğine bölünerek normalize edilmiş değerine de yapının "etkili yükseklik katsayısı" adı verilmektedir. Etkili yükseklik katsayısı, bir yapıya etki eden depremsel eylemsizlik kuvvetlerinin uzaysal dağılımını belirtmektedir. Ankastre tabanlı modellerde %60 ile %72 arasında olan bu değer, yatay kuvvet dağılımının üçgene yakın olduğu bir durumu simgelemekteyken, yalıtımlı modellerde taban kesme kuvvetinin büyük ölçüde azalmasıyla genellikle %50 ile %60 arasında bir değer almaktadır. Bu da yatay kuvvet dağılımının üniform ile trapez arasında olduğu bir durumu göstermektedir.

Düzenli bina modellerinde sıfır mertebesinde olan taban burulma momenti, düzensiz modellerde büyük değerlere ulaşmaktadır. Kat adetleri birbirinden farklı olan düzensiz modellerdeki bu davranışı birbirleriyle karşılaştırabilmek için, taban burulma momentinin binanın ağırlığına bölünerek normalize edilmiş haline "taban burulma momenti katsayısı" adı verilmiştir. Taban yalıtımlı Y modelleri, taban burulma momenti katsayısını tüm binalarda ankastre tabanlı A modellerine göre etkili bir biçimde azaltmış, ilave yalıtımlı YİO modelleri ise 8 kat dışındaki tüm binalarda taban yalıtımlı Y modelinden daha ileri bir iyileştirme getirmiştir.

Bir binada taban yalıtımı ya da ilave yalıtım kullanmanın başlıca amaçları; ankastre tabanlı binaya göre taban reaksiyonlarının ve buna bağlı olarak binanın taşıyıcı sistemindeki iç kuvvetlerin, binanın tabanındaki, katlar arasındaki ve üst katındaki ötelenmelerin ve ivmelerin azaltılmasıdır. Bu çalışmada; 4, 8, 12, 16 ve 20 katlı düzenli ve düzensiz betonarme bina modellerinin her biri için üç değişik taban yalıtımlı, dokuz değişik ilave yalıtımlı model hazırlanarak davranışları araştırılmıştır. İlgili taban yalıtımlı modele göre yapı davranışını her yönüyle iyileştiren beş tane ilave yalıtımlı model olduğu ortaya çıkmıştır: Düzenli 12 katlı YİO ve YİS ile düzensiz 12 katlı YİO ile 16 katlı YİO ve YİS modelleri.

Yalıtım düzeyinde yüksek deformasyon oluşması, taban yalıtımının en önemli sakıncalarından biridir. Katlar arasında uygun konumlara yerleştirilen ilave yalıtım elemanları sayesinde hem tabandaki yüksek deformasyonların düşürülebileceği, hem de yapı esnekliğinin sadece tabandaki yalıtım düzeyinde toplanmayıp üstyapı katları arasına dağıtılması durumunda çatı düzeyindeki toplam ötelenmenin ve kat ivmelerinin de azaltılarak yapı davranışının daha ileri düzeyde kontrol edilebileceği ortaya çıkmıştır. Yalıtım parametreleri seçilirken, tabandaki yalıtım rijitliğinin katlar arasındaki rijitlik değerlerine göre çok düşük tutulması gerekmektedir.

Düzenli ilave yalıtımlı modellerden 12 katlı YİO ve YİS modelleri, düzensiz modellerden 12 katlı YİO ile 16 katlı YİO ve YİS modelleri başarılı olmuştur. Yatay geometrinin dışındaki tüm sistem parametreleri aynı olmasına karşılık elde edilen bu değişik sonuçlar, ilave yalıtımlı binalardaki depremsel yalıtım performansının, binanın planda düzenli olup olmaması

biçimindeki bir parametreye de bağlı olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada planda düzenli ve düzensiz betonarme binalar göz önüne alınarak yalıtım elemanı olarak farklı rijitliklere sahip kauçuk izolatörler kullanılmıştır. Yapısal çözümlemede ise 1999 Gölcük Depremi'nde Yarımca-Petkim'de ölçülen ivme değerlerinin Kuzey-Güney bileşeni kullanılmıştır. Bu konuda bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda; planda ve düşeyde düzensizlik, farklı bina malzemeleri, farklı yalıtım elemanları (örneğin sürtünmeli tip) ve farklı deprem hareketleri söz konusu olduğunda, ilave yalıtımlı binaların depremsel yalıtım performansının nasıl etkilendiği sorularına yanıt aranması uygun olacaktır.

Kaynaklar

1. Matsagar, V.A., Jangid, R.S., 2008. Base Isolation for Seismic Retrofitting of Structures, Practice Periodical on Structural Design & Construction, 13, 175-185.
2. Sharma, A., Jangid, R. S., 2009. Behaviour of Base-Isolated Structures with High Initial Isolator Stiffness, International Journal of Applied Science, Engineering & Technology, 5, 199-204.
3. Lakshmanan, N., Kumar, K. S., Sreekala, R., Muthumani, K., Guru, J., Gopalakrishnan, N., 2008. Experimental Investigations On The Seismic Response Of A Base-Isolated Reinforced Concrete Frame Model, Journal of Performance of Constructed Facilities, 22, 289-296.
4. Warn, G. P., Whittaker, A. S., Constantinou, M. C., 2007. Vertical Stiffness of Elastomeric and Lead–Rubber Seismic Isolation Bearings, Journal of Structural Engineering, Sep2007, 133, 1227-1236.
5. Kaab, M. Z., Ounis, A., 2011. Influence of the Damping of the Seismic Base Isolation System LRB on the Dynamic Response of the Isolated Structures, International Journal of Civil & Structural Engineering, 1, 817-826.
6. Ryan, K. L., Earl, C. L., 2010. Analysis and Design of Inter-Story Isolation Systems with Nonlinear Devices, Journal of Earthquake Engineering, 14, 1044-1062.
7. Yenidoğan, C., Uçkan, E., 2008. Seismic Performance of a Base Isolated Structure by Shake Table Tests, AIP Conference Proceedings, 1020, 1493-1502.
8. Ni, G.W., Zhang, Y.M., Jiang, D.L., Chen, J. N., Liu, B.,2010. Study of Base-Isolation Building System, World Academy of Science, Engineering & Technology, 70, 334-338.
9. Sesigur, H., Cili, F., 2008. A Seismic Isolation Application Using Rubber Bearings; Hangar Project in Turkey, AIP Conference Proceedings, 1020, 1475-1482.
10. Naeim, F., Kelly, J.M., 1999. Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice, John Wiley & Sons Inc., New York.
11. Karabörk, T., 2001. Titreşim Kontrol Sistemleri ve Yüksek Sönümlü Kauçuk Yatak Uygulamaları, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
12. Wilson, L.E., 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
13. Pan, T.C., Ling, S.F., Cui, W., 1995. Seismic Response of Segmental Buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1039-1048.
14. Atımtay, E., 2000. Betonarme Sistemlerin Tasarımı, ODTÜ Yayını, Ankara.
15. Celep, Z., Kumbasar,N., 2000. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
16. Chaudhary, M.T.A., Abe, M., Fujino, Y., 2001. Performance Evaluation of Base-Isolated Yama-Age Bridge with High Damping Rubber Bearings Using Recorded Seismic Data, Engineering Structures, 23, 902-910.
17. Chopra, A.K., 2000. Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
18. Colunga, A.T., Soberon, L.G., 2002. Torsional Response of Base-İsolated Structures due to Asymmetries in the Superstructure, Engineering Structures, 24, 1587-1599.
19. Kulkarni, J.A., Jangid, R.S., 2002. Rigid Body Response of Base-Isolated Structures, Journal of Structural Control, 9, 171-188.
20. Lee, D.G., Hong J.M., Kim, J., 2001. Vertical Distribution of Eqivalent Static Loads for Base Isolated Building Structures, Engineering Structures, 23, 1293-1306.
21. Mazzolani, F.M., 2001. Passive Control Technologies for Seismic-Resistant Buildings in Europe, Prog. Struct. Engng. Mater., 3, 277-287.
22. Pınarbaşı, S., Akyüz, U., 2005. Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyleri, İMO Teknik Dergi, 3581-3598.