Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 27(3), 303-311, 2021

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Sismik izolatörlerin betonarme konut binasının performansı üzerindeki etkileri

The effect of seismic isolation on performance of a residence building

Esra ÖZER[1*], *Mehmet İNEL*[2]

[1,2]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
esrao@pau.edu.tr, minel@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 26.02.2020 Düzeltme Tarihi/Revision: 08.05.2020 doi: 10.5505/pajes.2020.36825
Kabul Tarihi/Accepted: 14.05.2020 Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Çerçeve veya çerçeve ve perde sistemlerin birlikte kullanılması esasına dayanan geleneksel sismik tasarım genellikle yüksek ivmelenmelere ve yüksek göreli kat ötelenmelerine sebep olur. Bunun sonucunda, yapının kendisi temel olarak bozulmadan kalsa bile, yapı içindeki cihazlar zarar görebilir. Binanın kendisinden daha pahalı ekipman içeren binalar için bu durum, tolere edilemez. Bu tür binalarda, yapıyla temeli arasına yerleştirilen izolatörler iyi bir seçim olabilir. Çalışma sismik izolatörler kullanımın tipik bir betonarme konut binasının performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre tasarlanmış binanın tabanda izolatör bulunması ve bulunmaması durumu göz önüne alınmıştır. Ayrıca farklı tip izolatörlerin talepler üzerindeki etkisinin incelenmesi için ankastre mesnetli geleneksel model ile kurşun çekirdekli kauçuk izolatör veya sürtünmeli sarkaç izolatörlerin farklı kombinasyonlarıyla toplam 5 farklı model oluşturulmuştur. Deprem etkisi altında doğrusal elastik olmayan davranış için, kiriş ve kolon elemanların her iki ucunda plastik mafsallar ile doğrusal elastik olmayan özelliğe sahip izolatörler kullanılmıştır. Yapı modellerinin sismik performansının değerlendirilmesinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır. İzolatörlü bina modellerinin konvansiyonel modele kıyasla yapı davranışında meydana getirdiği değişiklikler incelenmiştir. Performans değerlendirmesinde periyot değerleri, sismik talepler ve hasar dağılımları göz önüne alınmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, izolatörlü binalarda periyot değerindeki artışa bağlı olarak, sismik performans üzerindeki olumlu etkiler açıkça ortaya koyulmuştur. Ayrıca farklı tipteki izolatörlerin birlikte kullanıldığı tasarımların bu sonuçları daha da iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Türkiye bina deprem yönetmeliği (2018), Performans analizi, Zaman tanım alanında dinamik analiz, Sismik izolatör.

Abstract

Traditional seismic design, based on use of moment frames and shear walls together to increase seismic resistance of structures, often leads to high acceleration or high interstory displacement demands. Although the structure itself remains fundamentally intact, the devices inside the structure can be damaged. This may not be tolerable for buildings with expensive equipment. Seismic isolation may be a good choice for such buildings. This study aims to evaluate the effect of seismic isolation on the performance of a typical residential building designed per 2018 Turkey Building Code. Five different models have been created with traditional model and different combinations of lead core rubber isolator or friction isolators. Beam and column elements are modeled as nonlinear frame elements with lumped plasticity by defining plastic hinges at both ends of beams and columns. Nonlinear behavior of seismic isolators has also been considered. Nonlinear time history analyses are used for performance evaluation of the building with and without seismic isolation. Seismic behavior of conventional and base-isolated buildings was examined. Period values, seismic demands and damage distribution are considered for performance evaluation. The outcomes show that seismic isolation has positive effects to decrease seismic demands. In addition, the improvements in seismic behavior are more obvious when designs different types of isolators are used together.

Keywords: Turkish building earthquake code (2018), Performance evaluation, Seismic isolation, Time history analysis.

1 Giriş

Ülkemizde yaşanan orta ve büyük ölçekteki birçok depremin yol açtığı can ve mal kayıpları, özellikle değerli ekipman içeren ve depremden hemen sonra kullanılmaya devam etmeleri gereken tesislerin (hastaneler, polis ve telsiz istasyonları ile telekomünikasyon merkezleri vb.) sismik performansının iyileştirilmesindeki önemi arttırmıştır. Deprem yalıtımlı binalarda yapısal hareketlerin kontrolü, yapısal temelde veya yapı içinde özel olarak tasarlanmış bir ara yüz ile, yani zeminden iletilen kuvvetleri azaltabilecek şekilde, izolatör ekipmanları ile gerçekleştirilir. Dünyada oldukça yaygın olarak kullanılan, ülkemizde ise 2018 Türk Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ile ayrı bir bölüm olarak değerlendirilen deprem izolatörlerinin, 100 yatak üstü hastanelerin tasarımında kullanımı zorunlu kılınarak ülkemizde de yaygınlığının artacağı düşünülmektedir.

İzolatör tipinin bir fonksiyonu olarak bina tepkisi üzerine yapılan önceki araştırmalar, elastomerik izolatörlerin (lead rubber bearing-LRB) daha büyük taban yer değiştirmeleri aldığını, ancak sürtünmeli izolatörlere (friction pendulum isolator-FPS) kıyasla üst yapıya daha düşük ivmeler ilettiğini ortaya koymuştur [1]-[4]. Geleneksel FPS esasen basınç altında rijittir ve gerilme yükü kapasitesine sahip değildir, LRB nispeten daha az basınç rijitliğine sahiptir ve sınırlı miktarda gerilme yüküne dayanabilir [5]. Önceki araştırmalar genellikle tek bir tip izolatör ile temel izolasyon sistemlerinin araştırılmasına odaklanmıştır [6]-[8]. Wu ve diğ. tarafından

*Yazışılan yazar/Corresponding author

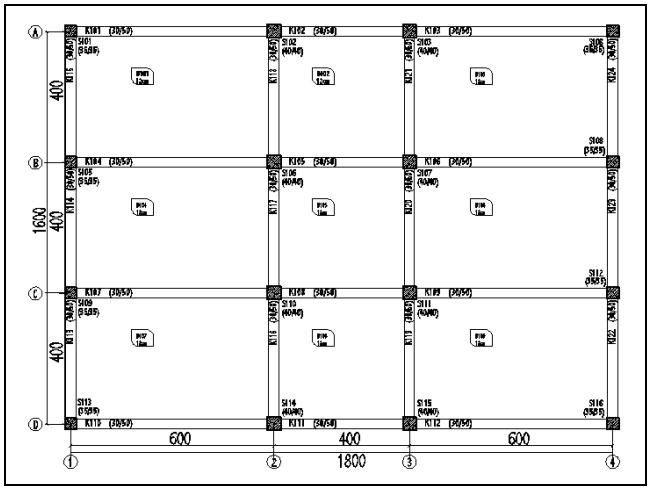
2002 yılında yapılan çalışmada; elastomer mesnetli, beş katlı yapı modelinin sarsma tablası deneyleri ile sismik karakteristiği belirlenmiştir. Bu çalışmayla; sismik izolatörlü modelin, tüm deprem kayıtlarında ankastre mesnetli modele göre kat ivmelerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür [9]. Vaez ve diğ. farklı tip izolatörlerin sayıca değişken kullanımlarında, yüzde olarak talepler üzerindeki etkisini incelemiştir. En iyi sonuçlar; %25 FPS ve %75 LRB oranında izolatörün kullanımıyla elde edilmiştir [4]. Ismail tarafından yapılan çalışmada ise, çok özellikli bir sismik izolasyon sisteminin, taban izolatörlü asimetrik yapıların burulma tepkilerini ortadan kaldırmaya yönelik bir araştırma yapılmıştır. Çalışma, SAP2000'de bulunan doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Taban izolatörlü asimetrik yapılarda, farklı elastik rijitliğe sahip dört izolatör seti kullanarak yapıların yapısal burulma tepkilerinin teorik olarak önlenebildiği görülmüştür [10].

Bu çalışmada, geleneksel yöntemle modellenen herhangi bir düzensizlik içermeyen, 3 katlı orta yükseklikli betonarme bir konut binası ile aynı binanın kurşun çekirdekli kauçuk izolatör (LRB) ve eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörlerin (FPS) ayrı ayrı ve birlikte farklı konfigürasyonlarda kullanıldığı toplam 5 farklı model için, izolatör sistemlerinin sismik talepler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaç kapsamında kullanılan ankastre mesnetli geleneksel bina modeli, TBDY-2018'e uygun olacak şekilde, tipik kolon ve kiriş elemanlardan oluşan çerçeve sisteme sahiptir. Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, sismik izolatörlü binalarda yapı elastik kalır kabulü yapılmamıştır. Bu nedenle, binada doğrusal olmayan davranış, taşıyıcı sistem elemanlarının her iki ucuna tanımlanan plastik mafsallar aracılığıyla sağlanmıştır. Doğrusal olmayan davranışa sahip izolatör sistemi ise, aynı şartnameye uygun olarak modellenmiştir. Sismik performans açısından izolatörlü bina modellerinde, Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi hedeflenmiştir. Yapıların sismik davranışı, 110 adet doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz ile değerlendirilmiştir. Modellere ait periyot değerleri, deplasman talepleri, göreli kat ötelenme oranları, maksimum kat ivmeleri taban kesme kuvvetleri ve kalıcı deformasyonlar kullanılarak, ankastre mesnetli ve sismik izolatörlü modeller karşılaştırılmıştır.

Binalara etkitilmek üzere; geçmiş depremlerden spektrum uyumlu 11 adet ivme kayıt takımı (11x2=22 adet ivme kaydı) seçilmiştir. Ankastre mesnetli ve izolatörlü modellere, seçilen her bir deprem takımına ait yatay bileşenler, birbirine dik yatay iki doğrultuda, aynı anda birlikte etki ettirilerek, doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ivme kayıtlarının eksenleri 90° döndürülerek hesap tekrarlanmıştır [11]. Elde edilen sonuçlar ile izolatörlü modellerin, ankastre mesnetli modellere göre ve farklı konfigürasyonlar için kendi içlerinde sismik performans üzerindeki etkileri konusunda bir fikir oluşturulması amaçlanmıştır.

2 Binaların tanımlanması ve modellenmesi

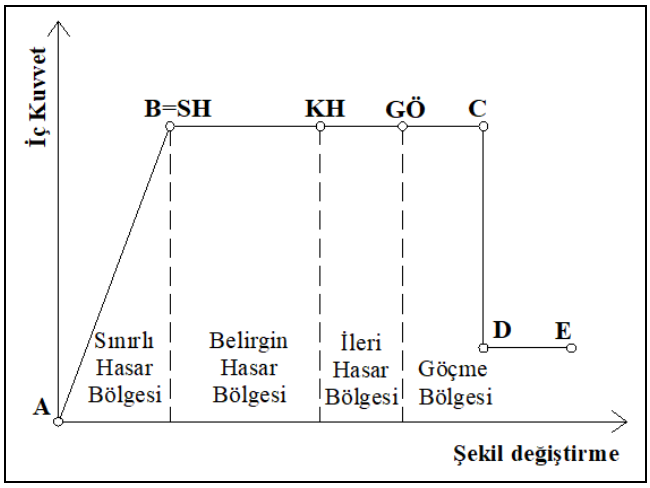
Yapılan çalışmada orta yükseklikteki betonarme bir binanın ankastre mesnetli ve izolatörlü modelleri kullanılarak, binaların şekil değiştirme davranışları üzerinde etkisi olduğu düşünülen bazı yapısal parametrelerin, modeller üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bina modeli tipik kiriş-kolon çerçeve sisteminden oluşmaktadır. 3B modellere ait kalıp planı görünümleri Şekil 1'de verilmiştir. Tüm katlarda kalıp planı aynı olup; kat yüksekliği 3.2 m'dir. Taşıyıcı sistem elemanı boyutları, kolonlarda 35x35 ve 40x40, kirişlerde ise 30x50 olarak belirlenmiştir. Beton sınıfı ve donatı sınıfı sırasıyla C30 ve S420 olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Modele ait kalıp planı.

Figure 1. Plan view of the considered buildings.

Sismik davranış ve performans açısından değerlendirme yapılırken, TBDY-2018 dikkate alınmıştır (DD-2 deprem seviyesi ve ZD zemin sınıfı). Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, sismik izolatörlü binalarda, yapının da elastik olmayan davranışta bulunabileceği göz önüne alınmıştır. Doğrusal elastik olmayan davranış binada, eleman uçlarına yerleştirilen plastik mafsallar ile modele yansıtılmıştır. Plastik mafsalın tipik dayanım-deformasyon ilişkisi Şekil 2'de verilmiştir. Plastik mafsalların tanımlanmasında, her elemanın kritik kesitine ait plastik mafsal boyu TBDY-2018'de belirtildiği gibi ilgili yöndeki kesit yüksekliğinin yarısı (h/2) olarak hesaplanmıştır [12],[13]. Kolonlar için SAP2000 programında otomatik mafsal ataması yapılmıştır. Kirişlerin kritik kesitlerinde ise Mander sargılı beton modeli için Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı'nda [14] elemanın boyutları, boyuna ve enine donatı içerikleri ve eksenel yük seviyeleri dikkate alınarak moment-eğrilik analizleri yapılmıştır.



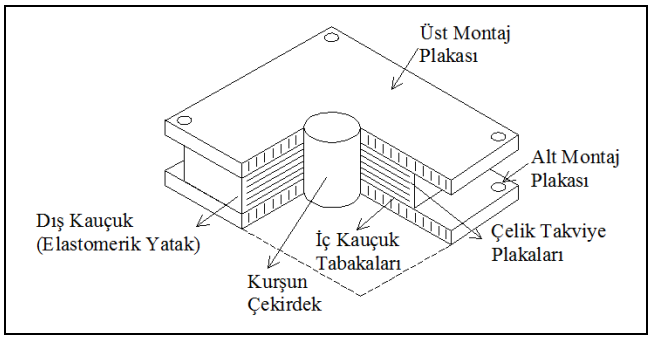
Şekil 2. Tipik dayanım-deformasyon ilişkisi.

Figure 2. Typical strength-deformation relation.

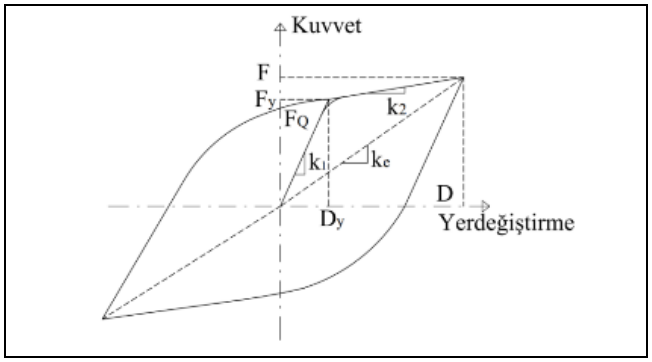
Yapılan moment-eğrilik analizlerine bağlı olarak; Şekil 2'de verilen plastik mafsalın kuvvet deformasyon ilişkisini tanımlayan eğri üzerindeki A, B, C, D ve E noktaları

tanımlanmıştır [15]. Elde edilen eğrilik değerlerinden ilgili nokta için hesaplanan dönme değerleri, modelleme ve analiz aşamasında kullanılan SAP2000 programında tanımlanmıştır [16]. Ayrıca, her bir model için etkin kesit rijitlik çarpanları; kirişler için 0.35, kolonlar için 0.70 olarak dikkate alınmıştır [11].

Sismik izolatörlü binalarda kullanılacak olan, LRB ve FPS tip ekipmanlara, yapı ve temeli arasında nispeten düşük yatay rijitlikli, ancak yüksek düşey rijitlikli bazı davranışları yüklemek gerekmektedir [17],[18]. Böylelikle yapının doğal periyodu, büyük ölçüde uzayacak ve depremlerin baskın yüksek frekans aralıklarından uzaklaşacaktır. Ayrıca yatay olarak deforme olma özelliği, kauçuk yatağın deprem kuvvetleri ile etkiyen kesme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltmış olacaktır [19]. Sismik izolatörlerin ana işlevi, tüm sistemin titreşim periyodunun uzatılmasıyla kesme kuvvetlerinin üst yapıya iletilmesini azaltmak iken, rüzgâr ve küçük depremler için servis yükü seviyelerinde yeterli rijitlik sağlamasıdır [20]. İzolasyon sistemine önemli ölçüde sönümleme uygulanabilirse, bu sistemlerin büyük yer değiştirme problemleri ortadan kaldırılmış olur [21]. Bu nedenle, Şekil 3(a)'da gösterildiği gibi, bir merkezi kurşun dolgu içeren lamine kauçuk yatak (LRB) tasarlanmıştır [22]. LRB izolatörün histeretik davranışı ise Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi iki doğrulu olarak idealize edilebilir. Akma dayanımı (F_y) ve akma sonrası rijitlik değeri (k_2) bu davranışı karakterize etmek için kullanılan iki önemli parametredir.



(a)



Şekil 3. Kurşun çekirdekli lamine kauçuk yatak kısımları ve çevrim modeli [11].

Figure 3. Lead core laminated rubber bearing parts and its hysteresis model [11].

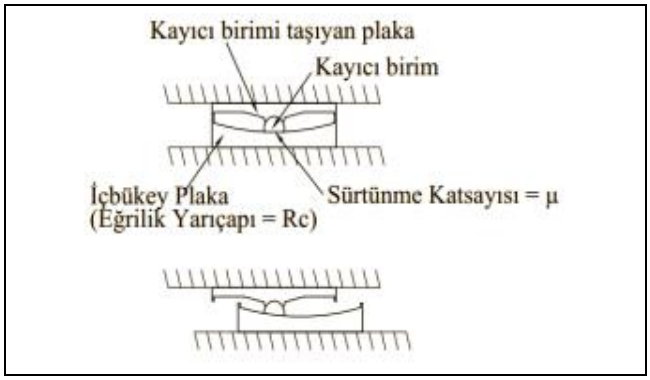
Çalışmada kullanılan bir başka sismik izolasyon tekniği ise, eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörlerin (FPS) kullanıldığı uygulamalardır. Bu sistemlerde, kayma ve sürtünme ile izolasyon sağlanır. Kayıcı izolatör sistemlerinin elastomerik izolatör ile karşılaştırılmasının başlıca avantajları şunlardır:

i. Sürtünmeli taban izolasyon sistemi geniş bir frekans giriş aralığı için etkilidir,

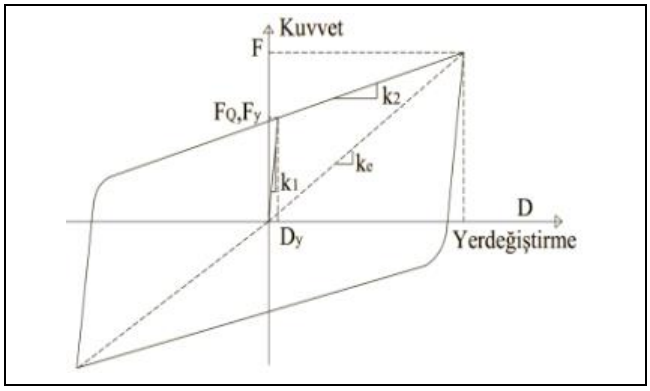
ii. Sürtünme kuvveti, yapının kütlesi ile orantılıdır ve kayıcı izolatörün kütle merkezi ve rijitlik merkezi çakışır. Bu nedenle asimetrik yapılar tarafından üretilen burulma etkileri azalır.

FPS sistemleri bir sigorta görevi görür ve deprem kuvvetleri statik sürtünme değerini aştığında devreye girer. Oluşan dinamik sürtünme ile enerji absorbe edilerek, sistem sönümlenir. Bu tür kayıcı izolatörler tarafından geliştirilen yanal kuvvet, sürtünme kuvveti ve binanın küresel yüzeye çıkması nedeniyle ortaya çıkan geri yükleme kuvvetinin bir kombinasyonudur.

Statik sürtünmeden ötürü, bu tür izolatörler, oldukça istenen bir özellik olan servis rüzgar yükleri altında rijitlik sergiler. Ayrıca, belirli bir yataktaki yanal kuvvet, bu yatak tarafından desteklenen yapı ağırlığına orantılıdır ve bu nedenle binanın kütle merkezi, izolatör sisteminin rijitlik merkezi ile çakışır ve bu da burulma etkilerini ortadan kaldırır. Şekil 4'te FPS izolatörü ve histeretik davranışı görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4. Eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatör kısımları ve çevrim modeli [11].

Figure 4. Curved surface friction pendulum isolator parts and its hysteresis model [11].

Çalışma kapsamında kullanılan izolatöre ait, SAP2000 programında kullanılan tasarım parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. Tüm bu parametreler izolatörlü yapının 0.4 m deplasman serbestliğine ve %20 enerji sönüm kapasitesine sahip olduğu kabulü ile elde edilmiştir. LRB ve FPS tip izolatörlerin birlikte kullanıldığı Combo-1 modelinde, Şekil 1'de görülen kalıp planı için, 1 ve 4 numaralı akslarda LRB

tip izolatör, 2 ve 3 numaralı akslarda ise FPS tip izolatör kullanılmıştır. Combo-2 modelinde ise durum tam tersidir. Bina modellerine ait periyot değerleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan izolatörlere ait tasarım parametreleri.

Table 1. Design parameters of the used isolators.

Parametre	LRB	Parametre	FPS
F_y (kN)	14.7	□ (-)	0.03
K_e (kN/m)	143.1	R (m)	2.24
K_2(kN/m)	98	K_e (kN/m)	99
K_v (kN/m)	98399	K_2 (kN/m)	76
D (m)	0.4	K_v (kN/m)	9.9E+9
ξ_{eff} (-)	0.20	β_M (-)	0.20

Tablo 2. Modeller için hakim titreşim periyot değerleri.

Table 2. Dominant vibration period values for the models.

Periyot (sn.)	Ankastre Model	LRB Model	FPS Model	Combo-1 Model	Combo-2 Model
T_1	0.51	3.53	3.87	3.70	3.72
T_2	0.48	3.52	2.84	3.16	2.95
T_3	0.47	3.31	2.49	2.77	2.74

3 İvme kaydi seçimi ve analiz yöntemi

Çalışma kapsamında toplam 11 adet ivme kaydı takımı Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanından (PEER Ground Motion Database) seçilmiştir [23]. Bu kayıtların her iki bileşeni (H_1 ve H_2), %5 elastik sönüm oranı için elastik ivme spektrumuna göre aynı ölçek katsayısı kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi, sismik kodlarla en çok önerilen deprem kayıt seçim yöntemi olan Spektral Eşleştirme kullanılmıştır [24].

Spektrum eşleştirmesini kullanmanın avantajı, analizler arasındaki dağılımın azaltılması ve daha az yer hareketi kullanarak ortalama tepkinin gerçekçi bir tahminini mümkün kılmasıdır [25],[26].

2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre tehlike haritaları revize edilmiştir [27]. Buna bağlı olarak tasarım yelpazesi, binanın bulunduğu lokasyona göre değişkenlik göstermektedir. Çalışmada kullanılan binaların, DD-2 için ZD zemin sınıfı üzerinde bir lokasyonda olduğu kabul edilmiştir. Bu lokasyona ait kullanılan zemin parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bina lokasyonu için zemin parametreleri.

Table 3. Ground parameters for building location.

Parametre	Değer
S_1	0.261
S_S	1.135
S_{D1}	0.658
S_{DS}	1.135

İzolatörlü binaların deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi için dikkat edilen ve TBDY-2018'de yer alan kurallar aşağıda maddeler halinde verilmiştir [11].

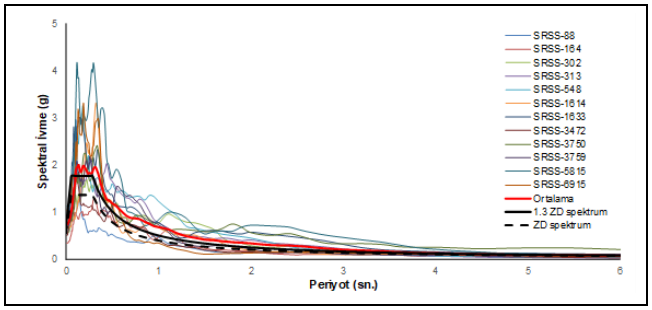
- Üç boyutlu hesap için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmiştir. Seçilen tüm kayıtlara ait bileşke spektrumların ortalamasının $0.2T_p$ ve $1.5T_p$ periyotları arasındaki genliklerinin (izolatörlü modeller için T_M, en büyük yer değiştirme altında sismik izolatörlü binanın üst sınır değerleri ile hesaplanmış etkin titreşim periyodu olmak üzere $0.5T_M$-$1.25T_M$ aralığında), tasarım spektrumunun aynı periyot aralığındaki genliklerine oranının 1.3'ten daha küçük olmaması kuralına göre deprem yer hareketi bileşenlerinin genlikleri ölçeklendirilmiştir. Her iki yatay bileşenin ölçeklendirilmesi aynı ölçek katsayıları ile yapılmıştır.
- Sahaya özel deprem yer hareketi spektrumlarının ordinatları, hiçbir zaman tasarım spektrumu (yatay ve düşey elastik spektrum) ordinatlarının %90' ından daha küçük değildir.
- Doğrusal olmayan hesap, her deprem yer hareketi seviyesinde ve her doğrultuda on bir kayıt çifti için tekrarlanmış, ilgili deprem seviyesinde ve doğrultuda yapılan hesaplarda elde edilen en büyük değerlerin ortalamaları tasarıma esas değer olarak dikkate alınmıştır.

Seçilen ivme kayıtlarına ait %5 sönüm oranı için elastik ivme spektrumları Şekil 5'te verilmiştir. Ayrıca TBDY-2018'in 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ZD sınıfı zemin üzerindeki spektrumu ile ivme kayıtlarının ortalaması eklenmiştir. Seçilen kayıtların saçılımı fazla olmasına rağmen TBDY-2018'e göre çizilen spektruma oldukça yakın olduğu görülmektedir. Kullanılan deprem kayıtlarına ait özellikler ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan deprem ivme kayıtları ve özellikleri [23].

Table 4. Earthquake acceleration records and properties used in the study [23].

No	RSN	Deprem Adı	Yıl	İstasyon	Mw	Bileşen H_1-H_2	PGA (g)	Vs30 (m/s)	Scale Factor
1	88	San Fernando	1971	Santa Felita Dam	6.6	000-090	0.387	389.0	2.5
2	164	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.5	000-090	0.252	471.5	1.5
3	302	Irpinia_ Italy-02	1980	Rionero In Vulture	6.2	000-270	0.399	574.9	4.0
4	313	Corinth_ Greece	1981	Corinth	6.6	000-090	0.592	361.4	2.0
5	548	Chalfant Valley-02	1986	Benton	6.2	270-360	0.733	370.9	3.5
6	1614	Duzce_ Turkey	1999	Lamont 1061	7.1	E-N	0.525	481.0	4.0
7	1633	Manjil_ Iran	1990	Abbar	7.4	000-090	0.617	724.0	1.2
8	3750	Cape Mendocino	1992	Loleta Fire Station	7.0	270-360	0.531	515.7	2.0
9	3759	Landers	1992	Whitewater T.Farm	7.3	180-270	0.494	425.0	4.0
10	5815	Iwate_ Japan	2008	Yuzawa	6.9	EW-NS	0.791	655.5	4.0
11	6915	Darfield_ N.Zealand	2010	Heathcote V. PS	7.0	000-090	0.930	422.0	1.2



Şekil 5. Kullanılan deprem ivme kayıtlarının %5 sönüm için elastik ivme spektrumları.

Figure 5. Elastic acceleration spectrum for 5% damping of earthquake acceleration records used in the study.

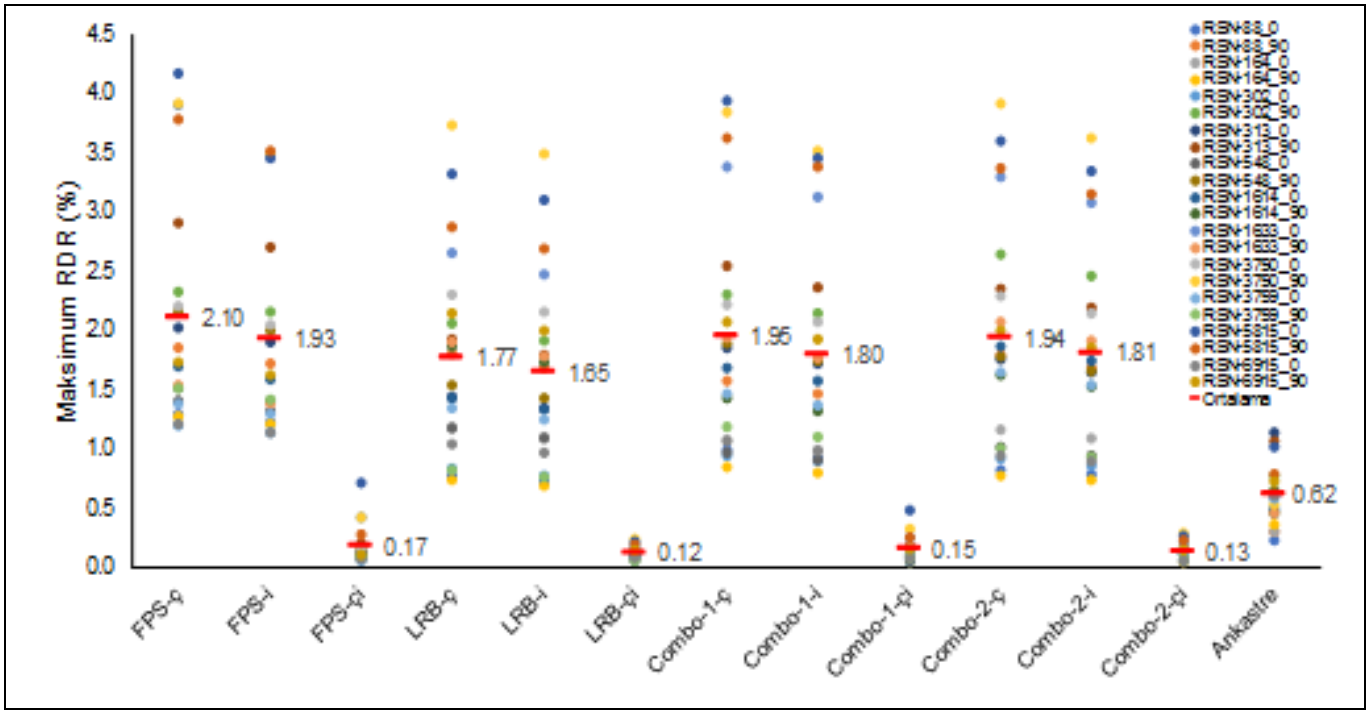
4 Sismik talep değerlendirmesi

Çalışma kapsamında dikkate alınan 3 katlı 3B ankastre mesnetli bina ile bu binanın LRB ve FPS izolatörlerinin ayrı ayrı ve birlikte kullanıldığı 4 farklı izolatörlü modelinin, 11 adet ivme kayıt takımı altında sismik talepleri, doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen deplasman talepleri binada deprem etkisi ile oluşabilecek hasarın bir göstergesidir [28]. Bu yüzden maksimum deplasman talepleri ile göreli ötelenme oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin daha anlaşılır olması için çatı deplasmanları bina yüksekliğiyle normalize edilerek "Tepe Noktası Ötelenme Oranı-RDR" elde edilmiştir (Şekil 6). Göreli kat ötelenme değerleri ise kat yüksekliği ile normalize edilerek "Göreli Kat Ötelenme Oranı-IDR" hesaplanmıştır (Şekil 7). Tepe noktası ötelenme oranı ile göreli kat ötelenme oranı arasındaki ilişki ise Şekil 8'de verilmiştir. Literatürdekilerden farklı olarak hem binanın hem de izolasyon sisteminin doğrusal elastik olmayan davranışa göre modellenmesi ile bina performansı en gerçekçi şekilde değerlendirilmiştir.

Yapısal elemanların, ankastre mesnetli ve izolatörlü modellerde, kuvvetli ivme kayıtları için hasar dağılımlarına bakıldığında, ankastre mesnetli modeller göçme durumuna ulaşırken, izolatörlü modellerde sınırlı hasar (SH) performans düzeyinin sağlandığı görülmüştür. Bu açıdan daha önce yapılan birçok çalışma ile karşılaştırma yapıldığında, taban izole bir binada üst yapının elastik kaldığı kabulünün yanlış olduğu görülmüştür [10]-[11].

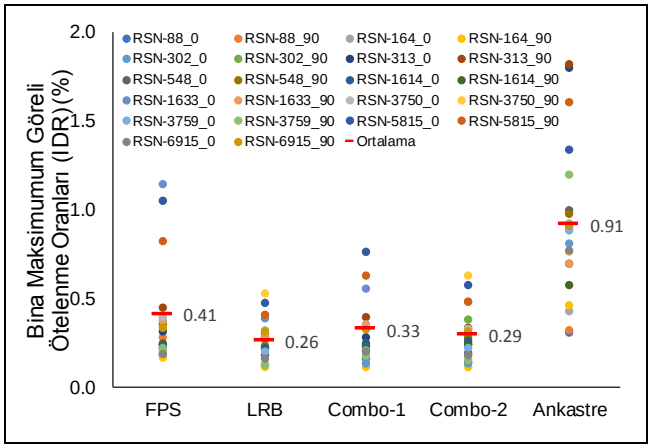
Şekil 6 irdelendiğinde, izolatörlü modelin yere göre çatı ötelenme oranı; "-ç", izolatörün yere göre ötelenme oranı; "-i", çatı katının izolatör ara yüzüne göre ötelenme oranı ise; "-çi" ile ifade edilmiştir. Ortalama maksimum çatı ötelenme oranları büyükten küçüğe sırasıyla; "FPS-ç", "Combo-1-ç", "Combo-2-ç", "LRB-ç" ve "Ankastre" modelleri için hesaplanmıştır. Hem izolatöre göre hem de yere göre en büyük deplasman talepleri sadece FPS tip izolatörün kullanıldığı modelde hesaplanmıştır. Literatüre göre farklılık gösteren bu sonuç, aslında sadece yere göre veya sadece izolatöre göre bir değerlendirme yapmanın doğru olmadığını, çatı katının izolatör ara yüzüne göre de bir değerlendirmenin yapılmasının önemini ortaya çıkarmıştır [1]-[4].

Göreli kat ötelenme oranları Şekil 7'den incelendiğinde ise, izolatörlü modellerde ankastre mesnetli modele göre dikkate değer bir düşüş görülmektedir. Sismik izolatörlü modellerde en düşük göreli ötelenme oranı, deplasman taleplerine benzer şekilde LRB ve Combo-2 modellerinde sırasıyla %0.26 ve %0.29 olarak hesaplanmıştır.



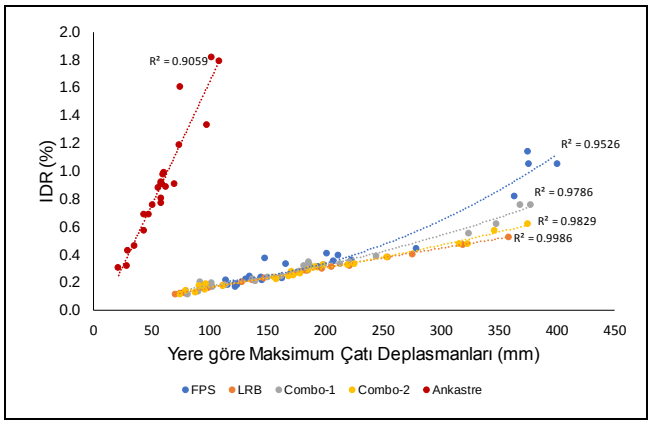
Şekil 6. Maksimum çatı ötelenme oranları.

Figure 6. Maximum roof drift ratios.



Şekil 7. Binalar için maksimum katlar arası göreli ötelenme oranları.

Figure 7. Maximum interstory drift ratios for the buildings.



Şekil 8. IDR ve maksimum çatı deplasmanı arasındaki ilişki.

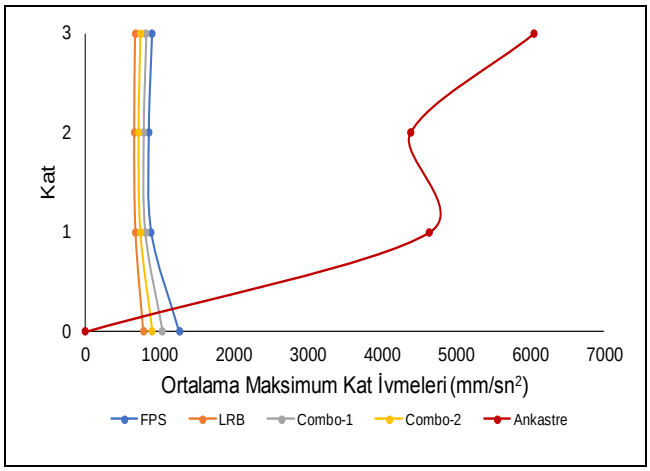
Figure 8. The relationship between IDR and maximum roof displacement.

Göreli kat ötelenme oranı ve çatı katı maksimum deplasmanları arasındaki ilişkiye bakıldığında; ankastre mesnetli modelde, izolatörlü modellere kıyasla daha küçük çatı ötelenme oranlarında, daha fazla göreli kat ötelenme oranlarının hesaplandığı görülmüştür. En küçük IDR oranına karşılık en büyük RDR talepleri ise LRB ve Combo-2 modellerinde hesaplanmıştır. Bu modeller için korelasyon değerleri ise oldukça yüksek olup sırasıyla 0.99 ve 0.98 olarak belirlenmiştir (Şekil 8).

İzolatörlü model için hesaplanan ivme taleplerinin katlara göre değişimi yok denilecek kadar az iken, ankastre mesnetli modelde farkın oldukça büyük olduğu görülmüştür (Şekil 9). Elde edilen bu fark yapılan önceki çalışmalarla benzerlik göstermiştir [9].

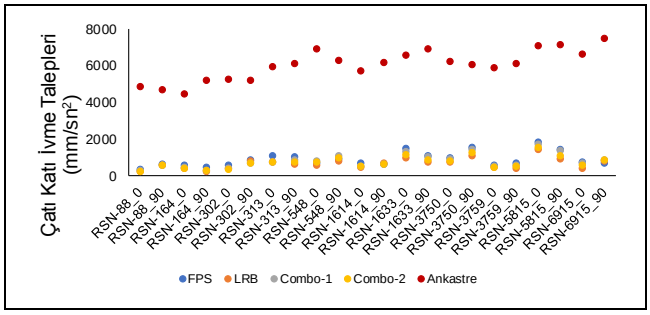
Kullanılan deprem kayıtları için modellere göre ivme talepleri ise Şekil 10'da verilmiştir. Ankastre mesnetli modellerde daha büyük ivme talepleri ve standart sapmalar söz konusudur. İzolatörlü modellerde ise maksimum ivme talepleri açısından çok büyük farklılıklar görülmemiştir. Ancak en küçük ivme talepleri LRB ve Combo-2 modeli için hesaplanmıştır.

Taban kesme kuvvetleri incelendiğinde, ivme taleplerine benzer bir durum söz konusudur. İzolatörlü modellerde bina tabanına etkiyen kesme kuvvetinde, ankastre mesnetli modele göre %75-85 bandında bir düşüş olduğu görülmüştür (Şekil 11). En düşük taban kesme kuvveti LRB ve Combo-2 modellerinde hesaplanmıştır.



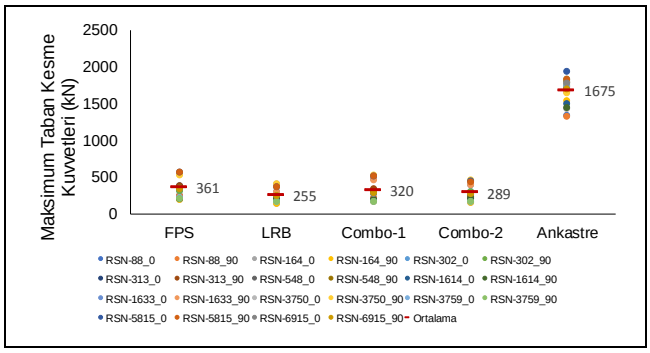
Şekil 9. Katlara göre ortalama maksimum ivme talepleri.

Figure 9. Average maximum acceleration demands of the floors.



Şekil 10. İvme kayıtlarına göre maksimum ivme talepleri.

Figure 10. Maximum acceleration demands fort he used ground motion records.

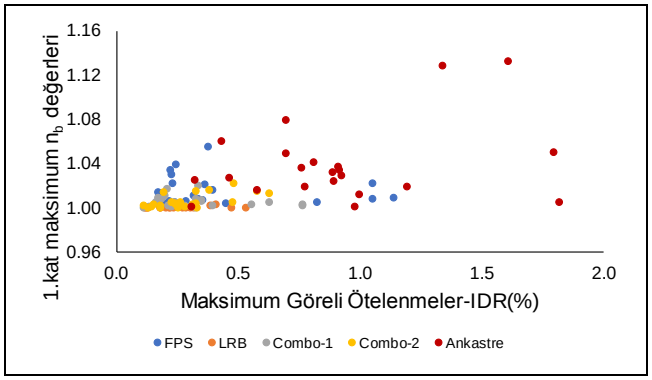


Şekil 11. Modellere etkiyen taban kesme kuvveti.

Figure 11. Base shear force acting on the models.

Maksimum katlar arası göreli ötelenme oranının hesaplandığı her an için, binaya ait burulma katsayıları da hesaplanmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi hiçbir düzensizliği olmayan ankastre mesnetli model için burulma katsayısı 1.133 değerlerine ulaşırken, izolatörlü modellerde en fazla 1.008 olarak, sadece FPS tip izolatörün kullanıldığı modelde hesaplanmıştır. İzolatörlerin binanın burulma davranışı üzerindeki bu olumlu etkisi, önceki yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermektedir[11]. Ankastre mesnetli modelde saçılım oldukça fazlayken, özellikle sadece LRB tip izolatörün

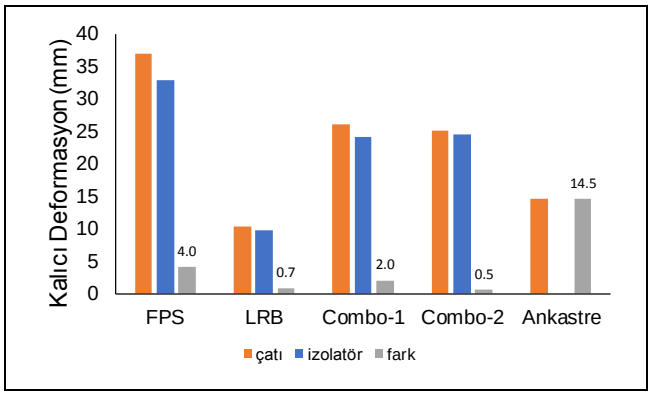
kullanıldığı modellerde hem n_b katsayısı hem de IDR oranları oldukça stabildir. Sadece FPS tip izolatörün kullanıldığı modelde, izolatörlü tüm modeller arasında hem burulma hem de göreli ötelenmeler açısından en istenmeyen sonuçlar elde edilmiştir. Tüm burulma katsayıları, göreli ötelenme oranlarıyla birlikte değerlendirildiğinde, izolatör ekipmanının yapının burulma davranışı üzerindeki olumlu etkileri açıkça görülmektedir.



Şekil 12. Maksimum IDR'ın hesaplandığı katta burulma katsayısı.

Figure 12. Torsional coefficient on the floor where the maximum IDR is calculated.

Kalıcı deformasyonlara bakıldığında çatı katında izolatör ara yüzüne göre en az deformasyon her iki tip izolatörün birlikte kullanıldığı Combo-2 modelinde 0.5 mm (%0.005) olarak belirlenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Kalıcı deformasyonların modellere göre dağılımı.

Figure 13. Distribution of permanent deformations for the used models.

FPS tip izolatörün kendini yeniden merkezleme özelliği ve LRB tip izolatörün kurşun dolgu ile sağlanan yüksek sönüm özelliği, en efektif şekilde Combo-2 modelinde gözlenmiştir. Tüm bu açılardan genel olarak bir değerlendirme yapıldığında; sadece FPS tip ya da sadece LRB tip izolatörlerin kullanılması yerine, bu izolatörlerin farklı kombinasyonlarının birlikte kullanıldığı tasarımların tercih edilmesi gerektiği açıkça ortaya çıkmıştır. Farklı izolatör kombinasyonları kullanılırken de izolatör yerleşiminin sonuçlar üzerindeki etkili olacağı unutulmamalıdır. Böylece tasarlanan yapıda, depremlerin tekrarlı yüklemelerinin sonrasında bile talep/performans açısından en iyi sonuçları elde edebiliriz.

5 Sonuç ve bulgular

Gerçekleştirilen çalışmada orta yükseklikteki 3 katlı 3 boyutlu ankastre mesnetli geleneksel model ile sadece LRB tip izolatörlü, sadece FPS tip izolatörlü ve LRB ile FPS tip izolatörün farklı konfigürasyonlarda birlikte kullanıldığı toplam 5 farklı model oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm modellerin, her iki asal eksenleri doğrultusunda, geçmiş deprem kayıtlarından seçilen ve ölçeklendirilen 11 adet ivme kayıt takımı ile zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan 110 adet analizin sonucunda elde edilen deplasman talepleri, göreli kat ötelenmeleri, ivme talepleri, taban kesme kuvvetleri, burulma katsayıları ve kalıcı deformasyonlar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

- Yere göre en büyük tepe noktası ötelenme oranları, izolatörlü modellerde hesaplanmıştır,
- Modellere göre maksimum RDR değerlerinin ortalaması dikkate alındığında; ankastre mesnetli model, izolatörlü modellerin yere göre ortalama deplasman değerinden en az %65.3 daha az deplasman yapmıştır. Ancak izolatörlü modelin izolatör ara yüzünde yapmış olduğu deplasman dikkate alınmadığında bu oranın %20.3 daha büyük olduğu hesaplanmıştır,
- Deplasman talepleri üzerinde izolatörün etkisi değerlendirildiğinde, izolatör ara yüzünde meydana gelen deplasmanın burada sönümlenmesi ile binanın çatı katındaki ötelenme, ankastre mesnetli modele göre %79.7 azalmıştır,
- İzolatör ara yüzüne göre en az deplasman yapan modeller LRB ve Combo-2 modeli olarak belirlenmiştir,
- Göreli kat ötelenme oranları ortalama olarak ankastre mesnetli modelde %0.91, izolatörlü modeller içinde ise en fazla FPS tip izolatörde %0.41 olarak hesaplanmıştır. İzolatörün ortalama göreli kat ötelenmeleri üzerinde %54.9'luk düşüş sağladığı görülmüştür,
- Göreli kat ötelenme oranı ve maksimum çatı deplasmanı arasındaki ilişki ankastre mesnetli model için R^2 değeri 0.91 iken, izolatörlü modellerin yere göre en fazla LRB ve Combo-2 modelleri için sırasıyla 0.99 ve 0.98 olarak bulunmuştur,
- En küçük göreli kat ötelenme oranlarının LRB ve Combo-2 modellerinde oluştuğu görülmüştür,
- İzolatörlü modellerin maksimum ivme talebi ortalamasını, ankastre mesnetli modele göre en az %85.2 oranında (sadece FPS izolatörün kullanıldığı modelde) azalttığı hesaplanmıştır,
- En küçük kat ivmeleri LRB ve Combo-2 modelinde oluşmuştur,
- Taban kesme kuvveti için kıyaslama yapıldığında ise, izolatörlü bir sistemin ortalama kesme kuvvetini %75-85 bandında azalttığı görülmüştür,
- En küçük taban kesme kuvveti LRB ve Combo-2 modelinde oluşmuştur,
- Maksimum göreli ötelenmenin hesaplandığı an için hesaplanan burulma katsayıları dikkate alındığında en küçük IDR ve en küçük burulma katsayıları yine LRB ve Combo-2 modellerinde hesaplanmıştır,

- Kalıcı deformasyon dışında irdelenen tüm parametrelerde, en iyi ve birbirine oldukça yakın sonuçlar LRB ve Combo-2 modelleri için elde edilmiştir. Ancak izolatörlü sistemlerde kendini yeniden merkezleme özelliği bu deformasyonların azaltılması için oldukça önemlidir,
- Kalıcı deformasyonlara bakıldığında ise, başlangıç konumuna en çok yaklaşan modelin 0.5 mm ile Combo-2 modeli olduğu görülmüştür. LRB modelde ise aynı değer 0.7 mm olarak hesaplanmıştır,
- FPS tip izolatörün kendini yeniden merkezleme, LRB tip izolatörün yüksek sönüm özelliği, en efektif şekilde Combo-2 modelinde ortaya çıkmıştır,
- İzolatör tiplerinin kalıp planı üzerinde sayıca aynı olmasına rağmen, farklı dağılımının sonuçlar üzerinde etkili olacağı unutulmamalıdır,
- Yapısal elemanların, kuvvetli ivme kayıtları için hasar dağılımlarına bakıldığında, ankastre mesnetli modeller göçme durumuna ulaşırken, izolatörlü modellerde SH performans düzeyinin sağlandığı görülmüştür.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde izolatör sisteminin, bina baskın titreşim periyodunu büyüterek depremin yıkıcı etkisinden binayı uzaklaştırıp talepleri ciddi oranda azalttığı görülmüştür. Bunlara ilave olarak, sadece FPS tip ya da sadece LRB tip izolatörlerin kullanılması yerine, bu izolatörlerin farklı kombinasyonlarının birlikte kullanıldığı tasarımların tercih edilmesi gerektiği açıkça ortaya çıkmıştır. Böylece tasarlanan yapıda, depremin tekrarlı yüklemelerinin sonrasında bile talep/performans açısından en iyi sonuçları elde edebileceğimiz görülmüştür.

6 Results and observations

In the current study, a total of 5 different models were created with the typical 3-story 3-dimensional residential building; conventional model, only LRB type isolator, only FPS type isolator and two LRB and FPS type isolator with different configurations. Nonlinear dynamic analyses were performed for 11 ground motion pairs using their two orthogonal horizontal directions. Ground motion records were scaled to match the response spectrum. Displacement demands, interstory drift ratio, acceleration demands, base shear forces, torsional coefficients and permanent deformations were calculated for 110 nonlinear time history analyses. The results obtained are summarized as below:

- Largest peak Roof Drift Ratio (RDR) values relative to ground were calculated in models with isolators,
- Considering the average of the maximum RDR values according to the model; the conventional model displaced at least 65.3% less than the average displacement value of the models with isolator. However, when the displacement of the isolator model in the isolator interface is not taken into account, this ratio is calculated to be 20.3% larger,
- When the effect of the isolator on the displacement demands is evaluated, the displacement in the roof of the building has decreased by 79.7% compared to the conventional model as a result of energy dissipation at the isolator,
- According to the isolator interface, LRB and Combo-2 models demand the least displacements,
- Significantly higher average IDR value was observed for the conventional model. Its IDR value was 0.91% while the highest average IDR value was 0.41% observed in the FPS type isolator model. It was observed that the isolator achieved a 54.9% decrease on the average IDR,
- The regression analysis of IDR and maximum roof displacement showed that R squared values are 0.91, 0.98 and 0.99 for the conventional, the LRB and Combo-2 models, respectively,
- The smallest IDR values were observed for the LRB and Combo-2 models,
- The analyses for the current study illustrated that the isolators reduce the base shear demand up to 75-85,
- The smallest base shear demands were obtained when the LRB and Combo-2 models were used,
- The smallest torsional coefficients obtained at maximum relative displacement and the smallest IDR were calculated for the LRB and Combo-2 models,
- Except permanent deformation, all parameters studied the LRB and Combo-2 models give the best results. However, the self-centering feature in systems with isolators is very important to reduce the permanent deformations,
- When permanent deformations are examined, it is seen that the Combo-2 model approaches its starting position with 0.5 mm deformation. This value is 0.7 mm for the LRB model,
- The self-centering of the FPS type isolator and the high damping property of the LRB type isolator seem to be very effecient in the Combo-2 model,
- It should be noted that although different isolator types have been used in the same number on the plan view, their different configuration may cause differences in the building behavior,
- Damage distribution under the considered ground motion records showed that the models with isolators achieve SH performance level while the conventional models reached their collapse state.

When the results are evaluated in general, it is seen that the isolator system has increased the dominant vibration period of the building. Due to the increase in period, the demands reduce significantly. In addition, it is obvious that instead of using only FPS type or only LRB type isolators, the use of their combinations is more effective. This study showed that the proper use of seismic isolation improves the seismic behavior buildings.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Esra ÖZER ve Mehmet İNEL fikrin oluşturulması, tasarımın yapılması, analizlerin gerçekleştirilmesi, literatür taraması, yazım ve eleştirel incelenmesi başlıklarında eşit oranda katkı sunmuştur.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9 Kaynaklar

[1] Matsagar VA, Jangid RS. "Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures". *Engineering Structures*, 26, 1735-1749, 2004.

[2] Ordonez D, Foti D, Bozzo L. "Comparative study of the inelastic response of base isolated buodings". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 151-164,2003.
[3] Jangid RS, Kelly JM. "Base isolation for near-fault motions". *Earthquake Engineering and Structural, Dynamics*, 30, 691-707, 2001.
[4] Hoseini Vaez SR, Naderpour H, Kalantari SM, Fakharian P. "Proposing the optimized combination of different isolation bearings subjected to near-fault ground motions". *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, 24-28 September 2012.
[5] Naeim F, Kelly J. *Design of Seismic Isolated Structures*. 1st Ed. New York, USA, Wiley,1996.
[6] JL Almazan, JC De la Llera. "Analytical model of structures with frictional Pendulum isolators". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 31, 305-332, 2002.
[7] Kelly J. "Tension buckling in multilayer elastomeric bearings". *Journal of Engineering Mechanics*, 129(12), 1363-1368, 2003.
[8] Sharbatdar MK, Hoseini Vaez SR, Ghodrati Amiri G, Naderpour H. "Seismic response of base isolated structures with LRB and FPS under near fault ground motions". *Procedia Engineering*, 14, 3245-3251, 2011.
[9] Wu YM, Samali B. "Shake table testing of a base isolated model". *Engineering Structures*, 24(9), 203-215, 2002.
[10] Ismail M. "Elimination of torsion and pounding of isolated asymmetric structures under near-fault ground motions". *Structural Control Health Monitoring*, 22, 1295-1324, 2015.
[11] TBDY-2018. "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Ankara, Türkiye, 30364, 2018.
[12] Mander JB, Priestley MJN, Park R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete". *American Society of Civil Engieering*, 114(8), 1804-1826, 1988.
[13] İnel M, Özmen Hayri B. "Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete building". *Engineering Structures,* 28(11), 1494-1502, 2006.
[14] SEMAp. "Sargı Etkisi Modelleme Analiz Programı". Ankara, Türkiye, Tubitak Proje No: 105M024, 2008.
[15] Fardis MN, Biskinis DE. Deformation of RC Members, as Controlled by Flexure or Shear. Editor: Shiohara H. Performance-based Engineering for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Structures: a Volume Honoring Shunsuke Otani, University of Tokyo, 515-530, Otani, Tokyo, 2003.
[16] SAP2000 V-20 CSI. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual". Berkeley, USA, 2020.
[17] FEMA P-751. 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions: Design Examples, 751, Chapter 12, Washington DC, USA, 2012.
[18] FEMA P-1051. 2015 NEHRP Recommended Seismic Provisions:Design Examples, 1051, Chapter 15, Washington DC, USA, 2016.
[19] Erduran E, Dao ND, Ryan KL. "Comparative response assessment of minimally compliant low-rise conventional and base-isolated steel frames". *Earthquake Engineering for Structural Dynamics,* 40, 1123-1141, 2010.
[20] Ceccoli C, Mazzotti C, Savoia M. "Non-linear seismic analysis of base-İsolated RC frame structures". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28, 633-653, 1999.
[21] Şengel HS, Erol H, Yavuz E. "Sismik izolasyon tekniği ve kullanışına ilişkin örnek uygulama". *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 22(2), 166-178, 2009.
[22] Ryan KL, Kelly JM, Chopra AK. "Nonlinear model for lead-rubber bearings ıncluding axial-load effects". *Journal of Engineering Mechanics*, 131, 1270-1278, 2005.
[23] PEER. "PEER Ground Motion Database". http://peer.berkeley.edu (09.09.2019).
[24] Kayhan AH, Korkmaz KA, Irfanoglu A. "Selecting and scaling real ground motion records using harmony search algorithm". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2011), 941-953,2011.
[25] NEHRP. Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-history Analyses, NIST GCR 11-917-15, the NEHRP Consultants Joint Venture for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2011.
[26] Karakutuk O. Effects of Ground Motion Selection on Seismic Response of Buildings. A thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2015.
[27] TC İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Deprem Dairesi Başkanlığı. "Türkiye Deprem Tehlike Haritası". https://tdth.afad.gov.tr (08.09.2019).
[28] Çelik S. Düşük ve Orta Yükseklikteki Binaların Deplasman Taleplerinin Doğrusal Elastik Olmayan Zaman Tanım Alanında Dinamik Analizle Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2011.