





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Farklı Sürtünmeli Sarkaç Tipi İzolatörlerin Yapı Sismik Davranışına Etkileri

 Muhamad ZULFAKAR^a,  Ali İhsan KARAKAŞ^{a,*}

^a *İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE*

* *Sorumlu yazarın e-posta adresi: alihsan.karakas@ktu.edu.tr*

DOI:10.29130/dubited.960841

ÖZ

Bu çalışmada farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip sarkaç tipi izolatörler kullanılarak deprem yalıtımı sağlanan bir yapının zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilerek sürtünme yüzeyi sayısının yapı davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla beş katlı basit bir yapı ile birlikte tek, çift ve üç sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörler ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla üç boyutlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Dinamik analizler sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli yapılar için bir deprem kaydı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Maksimum kat görelî yer değiştirmeleri, kat ivmeleri ve kolon taban kesme kuvvetleri gibi yapı tepkileri farklı izolatör tipleri ve ankastre mesnetli durum için karşılaştırılarak yapının deprem davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre izolatörlerin kullanıldığı yapılarda oluşan tepkilerin ankastre mesnetli yapılara göre önemli oranlarda azaldığı görülmüştür. Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörler karşılaştırıldığında ise tüm bu tepkiler için üç sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörün diğer izolatörlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Deprem yalıtımı, Sürtünmeli sarkaç izolatör, Sonlu eleman modeli, Sürtünme yüzeyi*

Effect of Different Friction Pendulum Bearings on Seismic Behavior of Structures

ABSTRACT

In this study, time-history dynamic analyses of a structure isolated with friction pendulum bearings with different friction surface number were carried out and the effects of friction surface number on the seismic behavior of the structure were investigated. For this purpose, a five-story frame structure isolated with friction pendulum bearings with single, double and three friction surfaces were modeled using three-dimensional elements with the help of the ABAQUS finite element program. Dynamic analyses were carried out taking into account an earthquake record for seismically isolated and fixed-based structures. Structural responses such as maximum story relative displacements, story accelerations and column base shear forces were compared for different isolators and fixed-base case to investigate the effects on the earthquake behavior of the structure. According to the results obtained, it was observed that the reactions in isolated structures decreased significantly compared to structures with fixed-base. When the isolators with different number of friction surfaces were compared, it was concluded that the pendulum isolator with three friction surfaces performed better than the other isolators for all considered reactions.

Keywords: *Seismic isolation, Friction pendulum bearing, Finite element model, Friction surface*

I. GİRİŞ

Depremler yeryüzünde sıklıkla meydana gelen doğal olaylardır. Şiddetli depremler esnasında dünyanın litosferindeki tektonik plakaların hareketinden dolayı deprem bölgesindeki yapılar yatay ve düşey doğrultuda sarsılarak genellikle hasar görmektedir. Bu durumu engellemek amacıyla çeşitli yapılarda farklı deprem yalıtım sistemleri uygulanmaktadır.

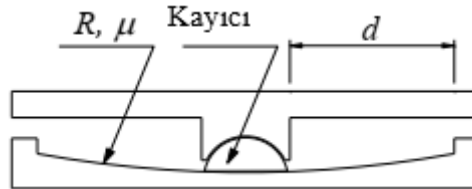
Deprem yalıtım sistemleri yapıların doğal titreşim periyotlarını deprem hakim periyodunun ötesine taşıyarak rezonans etkisinden kaynaklanan atalet yüklerinin azalmasını sağlamaktadır [1]. Bir başka ifadeyle, izolasyon sistemleri yapıları fiziksel olarak deprem yer hareketinden ayırarak depremin yapılar üzerinde oluşturacağı enerjiyi azaltmaktadır. Böylece izolasyonlu yapıların yer değiştirme, hız ve ivme gibi deprem tepkileri kabul edilebilir ve güvenli değerlere düşürülür [2].

Yaygın kullanılan iki tip deprem yalıtım sistemi vardır. Bunlar elastomer ve sürtünmeli izolator sistemlerdir. Sürtünmeli izolatorler ise Şekil 1'de gösterildiği gibi iki ana kategoriye ayrılır: düz yüzeyle ve eğri yüzeyle sarkaç izolatorler. Eğri yüzeyle sarkaç izolatorler içbükey plakalardan ve küresel yüzeylere sahip ara kayıcılardan oluşmaktadır. Düşey kuvvet ve küresel yüzeylerin kombinasyonu geri yüklenme (merkezleme) kuvveti sağlarken, yüzeyler arasındaki sürtünme ise hareket öncesi yatay rijitlik ve kayma esnasında kinetik enerji dağılımını sağlamaktadır. Sürtünmeli sarkaç izolatorler genelde tek, çift ve üç sürtünmeli yüzeyli sarkaç izolatorler olarak sınıflandırılır [3].



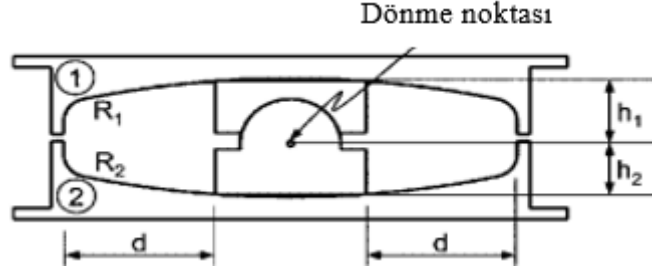
Şekil 1. (a) Düz yüzeyle ve (b) eğri yüzeyle sürtünmeli sarkaç izolator

Tek sürtünme yüzeyli sarkaç (TSYS) izolator ilk olarak 1987 yılında Zayas [4] tarafından tanıtılmıştır. Şekil 2'de enkesiti gösterilmektedir. İzolator, kavisli bir yüzey üzerinde kayma mafsallı bir kayıcıdan oluşur. İzolatorün sürtünme katsayısı (μ), izolatorü stabil halde tutmak ve kayma meydana geldiğinde deprem enerjisinin bir kısmını dağıtmak için yatay rijitlik sağlar. TSYS izolatorünün yatay yer değiştirme kapasitesi, Şekil 2 'de gösterildiği gibi d kadardır. Eğimli yüzeyin yarıçapı ve sürtünme katsayısı yapı deprem davranışını etkileyen izolatorün en önemli parametreleridir [5].



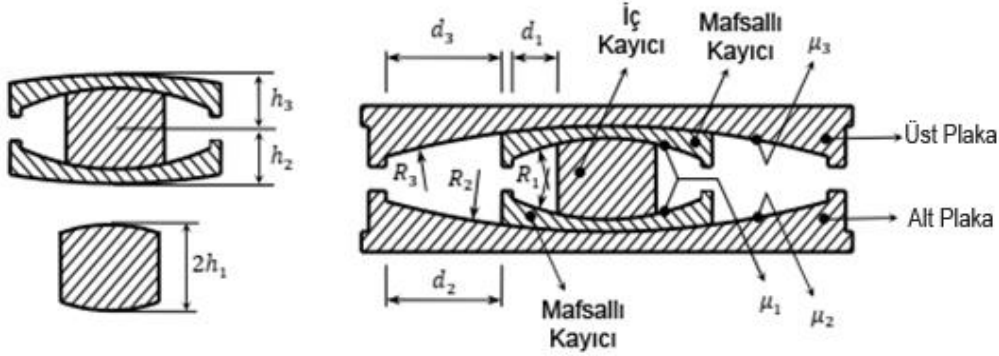
Şekil 2. Tek sürtünme yüzeyli sarkaç izolator enkesiti

Çift sürtünme yüzeyli sarkaç (ÇSYS) izolatorün sıfır yerdeğiştirmedeki enkesiti ise Şekil 3'te gösterilmektedir. İzolator alt ve üst içbükey yüzeylerde kayma hareketi gerçekleştirir. Şekil 3'e göre yatay hareket, mafsallı kayıcının dönmesini gerektirir. Sürtünmenin iki kayma yüzeyinde tam olarak aynı olamayacağı göz önüne alındığında kayıcının her zaman bir miktar döneceği düşünülür. Bu sebeple kayıcı mafsallı oluşturulur. İzolatorün en büyük yer değiştirme kapasitesi $2d$ kadardır, burada d , tek bir içbükey yüzeyin en büyük yer değiştirme kapasitesidir [6].



Şekil 3. Çift sürtünme yüzeyli sarkaç izolatör enkesiti

Üç sürtünme yüzeyli sarkaç (ÜSYS) izolatörün genel bileşenleri ise Şekil 4'te gösterilmektedir. İzolatör küresel yüzeylere sahip iki mafsallı içbükey arasında kayabilen ve daha sonra üst ve alt içbükey plakalar arasında kayabilen bir iç kayıcıdan oluşur. Yüzeyler arasındaki sürtünme, küçük yatay yüklere hareket olmaksızın direnir ve büyük yatay yük altında yüzeyler arasında oluşan kayma sırasında enerjiyi dağıtır. Düşey yük ile birlikte yüzeylerin eğriliği yatay yerdeğiştirme meydana geldiğinde bir geri yüklenme kuvveti (merkezleme kuvveti) oluşturur [7].



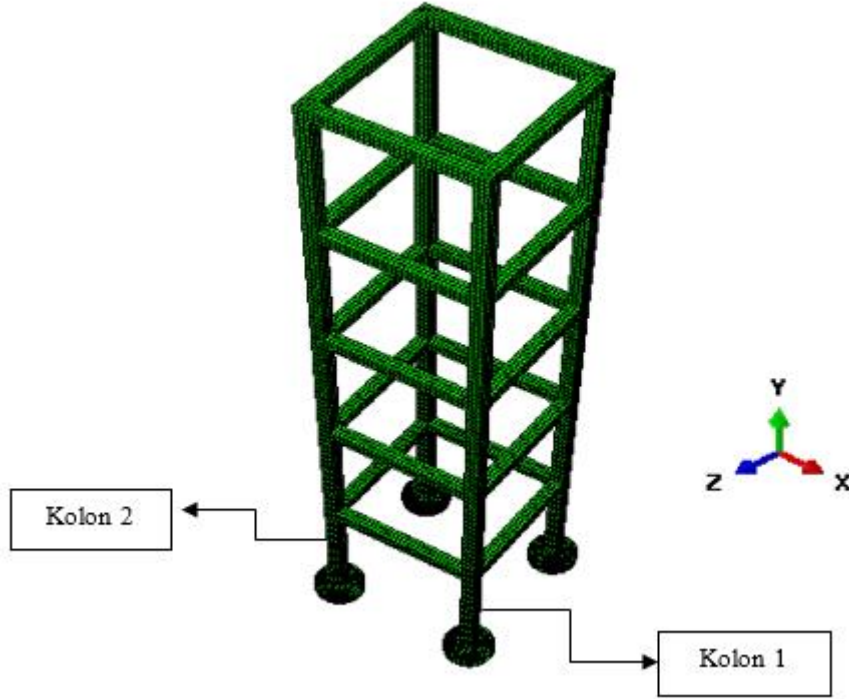
Şekil 4. Üç sürtünme yüzeyli sarkaç izolatör enkesiti

Depremlerin yapılar üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması konusunda sürtünmeli sarkaç izolatörlerin potansiyelini incelemek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Fenz ve Constantinou [6] çift sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörlerin eğrilik yarıçaplarını ve sürtünme katsayılarını değiştirerek kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerini incelemiştir. Benzer şekilde tek ve üç sürtünme yüzeyli izolatörler için de kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini deneysel [8] ve teorik [9] olarak elde ederek değişen parametrelerle izolatörlerdeki rijitlik ve sönüm değişimlerini incelemiştir. Pigouni vd. [10] bire bir ölçekli sarkaç izolatörler üzerinde deneysel dinamik testler gerçekleştirmişlerdir. Deringöl [11, 12] sürtünmeli sarkaç izolatör kullanılan iki boyutlu çelik çerçevelerin sismik tepkilerinin değerlendirilmesi için çeşitli tasarım yaklaşımlarını araştırmıştır. Calvi vd. [13] tarafından düz ve eğri yüzeyli sarkaç izolatörlerin performanslarının artırılması amacıyla farklı sürtünme özelliklerine sahip malzemeler kullanılarak daha yüksek enerji yutma kapasiteli izolatörler araştırılmıştır. Yurdakul ve Ateş [14, 15] tarafından üç sürtünme yüzeyli sarkaç izolatörlerin deprem yalıtım cihazı olarak verimliliği iki boyutlu analizler gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sürtünmeli sarkaç izolatörler üzerine ayrıntılı olarak çalışıldığını göstermekle birlikte farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörlerin birbirlerine göre performanslarının üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak incelenmediği görülmüştür. Ayrıca izolatörlerin çoğunluğunun basit yay elemanlar ile modellendiği fark edilmiştir. Bu sebeple bu çalışmada üstyapı ile birlikte tek, çift ve üç sürtünme yüzeyli izolatörlerin üç boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturularak zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiş ve yapı deprem davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

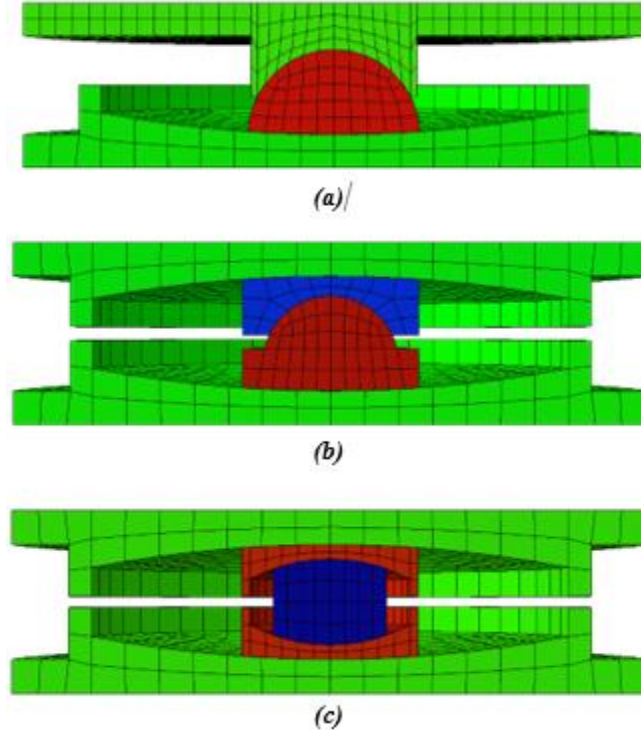
II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Şekil 5'teki 5 katlı yapı modeli dikkate alınmıştır. Yapı ve farklı izolatör türleri ABAQUS [16] sonlu eleman programı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiştir. Altı yüzlü (hexahedral), üç boyutlu, 8 düğüm noktalı ve azaltılmış integrasyon uygulanan C3D8R tipinde elemanlar kullanılarak sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Yapı kolon ve kirişleri 30 x 30 cm enkesit boyutlarına sahiptir. Kolonlar arası mesafe ve kat yüksekliği 3,5 m'dir. Beton malzemesi için elastisite modülü 20 GPa, Poisson oranı 0,18 ve özgül ağırlığı 24 kN/m³ olarak dikkate alınmıştır. X doğrultusunda dikkate alınan deprem yer ivmelerinin farklı kolonlar üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Şekil 5'teki Kolon 1 ve Kolon 2 seçilmiştir.

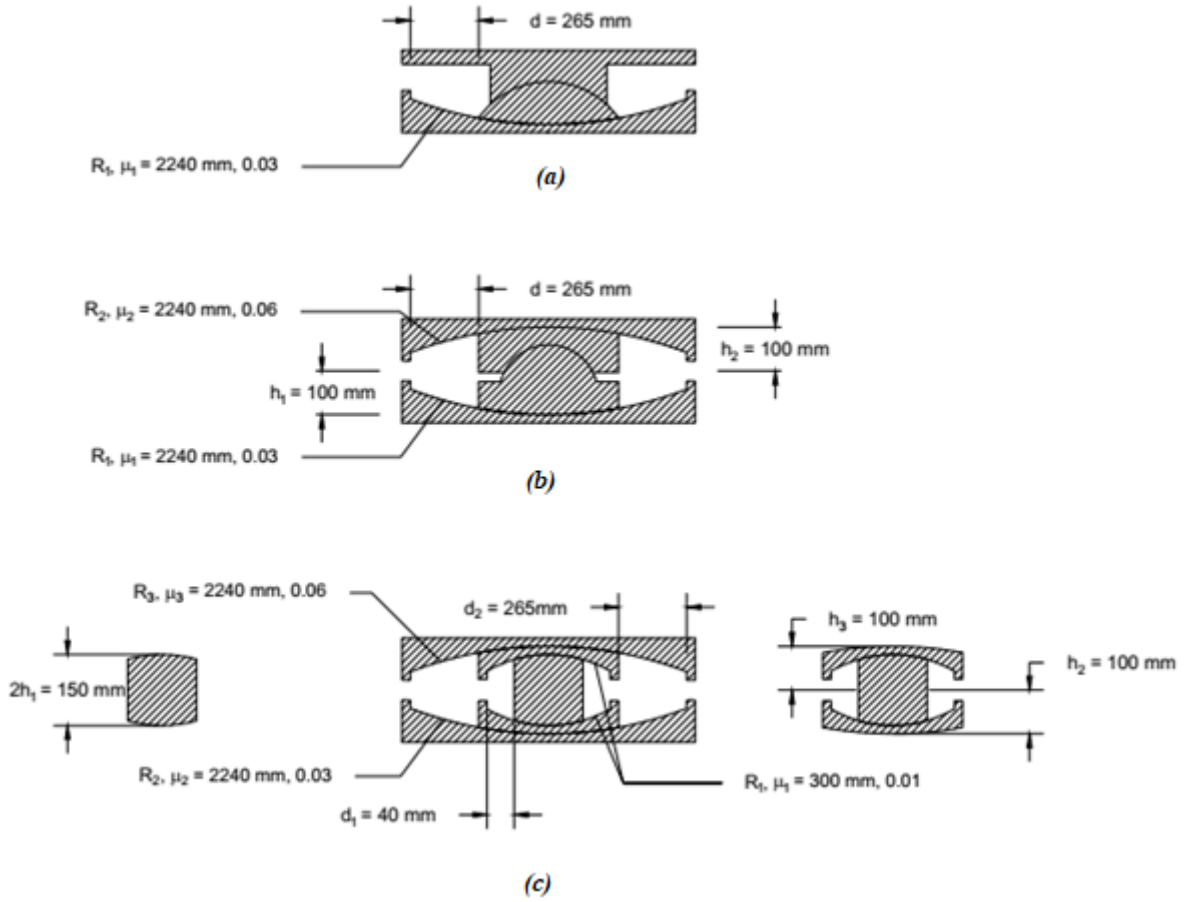


Şekil 5. Yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli

Yapının deprem yalıtımı için üç tip sürtünmeli sarkaç izolatör: TSYS, ÇSYS ve ÜSYS dikkate alınmıştır. Dikkate alınan izolatör sonlu eleman modelleri Şekil 6'da gösterilmektedir. İzolatörler için kullanılan malzeme, maksimum çekme dayanımı 490 MPa ve akma dayanımı 355 MPa olan çelik S355'tir. Çelik malzemesinin elastisite modülü 210 GPa ve Poisson oranı 0,3 olarak dikkate alınmıştır. TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlerin sonlu eleman modellerinin doğruluğu analitik formüllerle elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme döngülerinin sonlu eleman sonuçları ile karşılaştırmasıyla sağlanmıştır [17]. Farklı sürtünme yüzeyli izolatörler için bu çalışmada dikkate alınan eğrilik yarıçapları ve sürtünme katsayıları gibi geometrik ve malzeme özellikleri Şekil 7'de gösterilmektedir [18]. Şekil incelendiğinde üç izolatörün geometrik ve malzeme özelliklerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Böylece izolatörler malzeme ve geometrik özelliklerinden bağımsız olarak sürtünme yüzeyleri sayısı dikkate alınarak incelenebilecektir. Ayrıca izolatörlerin deplasman kapasitelerinin dikkate alınan depremin yerdeğiştirme talebinden daha büyük olmasına dikkat edilmiştir.

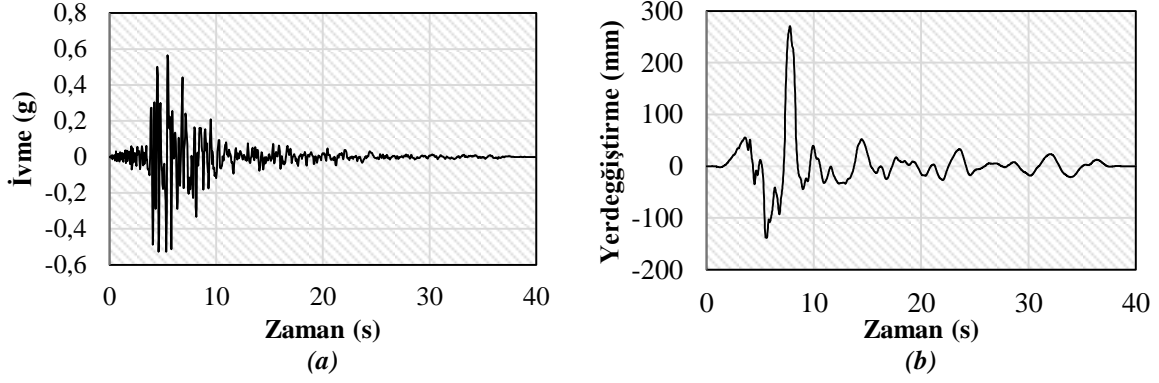


Şekil 6. (a) TSYS, (b) ÇSYS ve (c) ÜSYS izolator sonlu eleman modeli



Şekil 7. (a) TSYS (b) ÇSYS ve (c) ÜSYS izolator detayları

Doğrudan integrasyon yöntemiyle gerçekleştirilen zaman tanım alanında analizlerde kullanılan 1994 Northridge (1/17/1994) depreminin Newhall-Fire istasyonuna ait ivme-zaman ve yerdeğiştirme-zaman kaydı sırasıyla Şekil 8(a) 'da ve Şekil 8(b)'de verilmiştir. Depremin maksimum yer ivmesi değeri (PGA) 0,583g'dir. İlgili deprem kaydı PEER NGA [19] deprem yer hareketleri veri tabanından elde edilmiştir. Bu kayıt seçilirken depremin maksimum yerdeğiştirme değerinin özellikle tek sürtümlü sarkaç olmak üzere izolatörlerin maksimum yerdeğiştirme kapasitelerinden daha küçük olmasına dikkat edilmiştir. Analizlerde dikkate alınan sönüm oranı ise %5'dir.

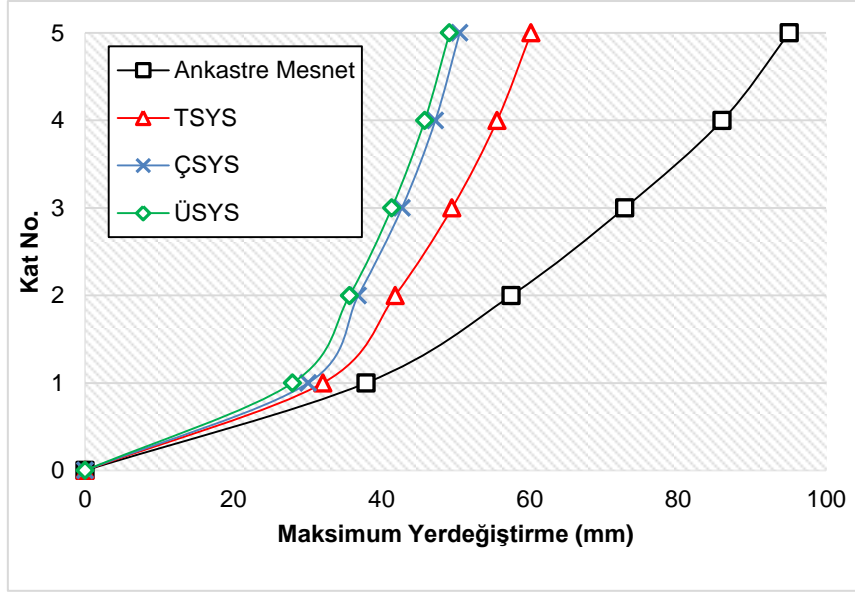


Şekil 8. Northridge 1994 depremi (a) ivme-zaman (b) yerdeğiştirme-zaman kaydı

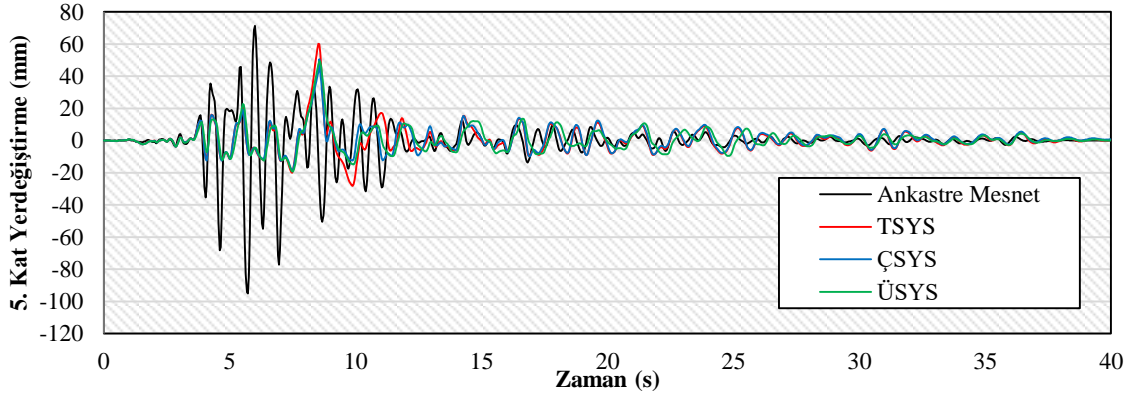
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tek, çift ve üç sürtünme yüzeyli sürtümlü sarkaç ile ayrı ayrı deprem yalıtımı yapılmış yapıların 1994 Northridge depremi yatay yer ivmesi altında zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı sürtünme yüzeyli izolatörlerin yapıların deprem davranışları üzerindeki etkileri kat yerdeğiştirmesi, kat ivmesi ve kolon taban kesme kuvveti açısından karşılaştırılarak incelenmiştir.

Şekil 9 yapının maksimum görelî kat yerdeğiştirmelerindeki değişimi ankastre mesnet, TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatör mesnet gibi farklı mesnet türleri için göstermektedir. Maksimum görelî yerdeğiştirme, tabana göre kattaki maksimum yerdeğiştirme değeridir. Şekil 9'a göre incelenen tüm yapılar söz konusu depremden önemli ölçüde etkilenmiştir. Sürtümlü sarkaç izolatörlerin kullanılması ankastre mesnetli sisteme kıyasla maksimum görelî yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde azaltmıştır. Northridge depremi etkisindeki yapının 5. Katındaki görelî yerdeğiştirmelerin zaman ile değişim grafiği Şekil 10'da gösterilmektedir. Ankastre mesnetli yapı için 5. kattaki maksimum yerdeğiştirme 95,0 mm olarak elde edilirken TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlü yapılar için bu değer sırasıyla 60,2 mm, 50,6 mm, 49,2 mm olarak elde edilmiştir. Ankastre mesnetli yapıya göre görelî yerdeğiştirmedeki azalma oranları sırasıyla %36,7, %46,8 ve %48,2 olarak elde edilmiştir. Bu duruma ÇSYS ve ÜSYS izolatörlerin TSYS izolatöre göre artan sürtünme yüzeyi sayısı ve değişken sürtünme katsayısı değerleriyle değişken deprem seviyelerine karşı gösterdikleri adaptif davranışın neden olduğu söylenebilir. Bu adaptif davranış ÇSYS ve ÜSYS izolatörlerin TSYS izolatöre göre aynı deprem etkisine karşı daha az yerdeğiştirme yaparak direnç göstermelerini sağlamaktadır [20, 21]. Bu durum üstyapıda da oluşan maksimum kat yerdeğiştirme değerlerini azalmaktadır. Böylece elde edilen oranlara göre kat yerdeğiştirmesi için ÜSYS ve ÇSYS izolatörlerin birbirine yakın ve TSYS izolatörden daha iyi performans gösterdikleri sonucuna varılmıştır.

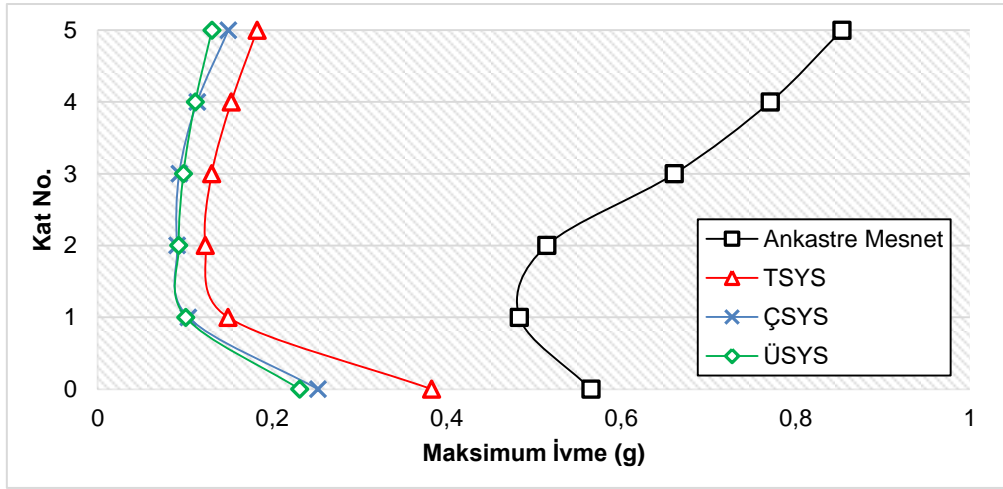


Şekil 9. Ankastr mesnetli ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapıların maksimum kat yerdeğıştirmeleri

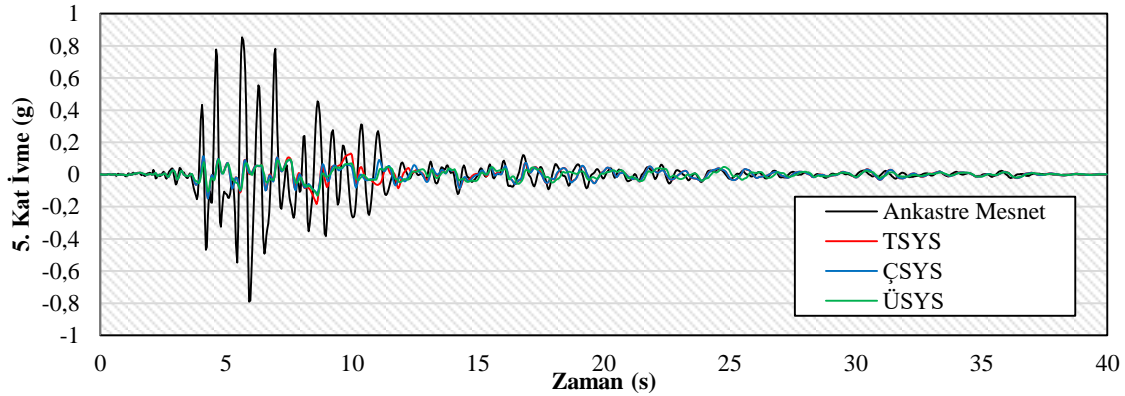


Şekil 10. Ankastr mesnet ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapıların 5. kat yerdeğıştirme değerlerinin zaman ile değışimi

Dikkate alınması gereken bir diğ er önemli yapı tepkisi deprem sırasında katlarda meydana gelen kat ivme değerleridir. Bunun sebebi kat ivmesinin katta oluşacak deprem kuvvetini etkilemesidir. İvme ne kadar büyükse, ilgili katta dikkate alınması gereken kuvvet o kadar büyük olacaktır. Northridge depremi etkisindeki ankastr mesnetli beş katlı yapı için Şekil 11'de görüldüğü gibi mevcut yapının maksimum ivmesi 5. katta 0,853g olarak elde edilirken, diğ er TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlü yapı sistemleri için 5. katta sırasıyla 0,183g, 0,150g ve 0,131g olarak elde edilmiştir. Burada ankastr mesnetli yapı maksimum yer ivmesi olan 0,583g değı erini 0,853g değı erine yükseltirken izolatörlü yapı sistemlerinin bu ivmeyi oldukça küçük değı erlere indirdiğı görülmüştür. 5. kattaki maksimum ivmelerdeki azalma oranları TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlü yapı sistemleri için ankastr yapıya kıyasla sırasıyla %78,6 , %82,4 ve %84,6 olmuştur. Ayrıca 5. kattaki ivme değı erinin zaman ile değı şimi Şekil 12'de gösterilmektedir. Birinci kat kolon tabanlarının rijit kabul edilmesi durumunda kat ivmelerinin artması kullanılan izolatörlerin yapı mesnet durumunu esnek hale getirdiğini göstermektedir. İvmelerdeki azalma oranlarına göre yapıya en fazla esneklik katan izolatörün ÜSYS olduğı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ise bu izolatöre ait iç kayıcının oldukça düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeyler arasında kayabilmesi olarak düşünülebilir.

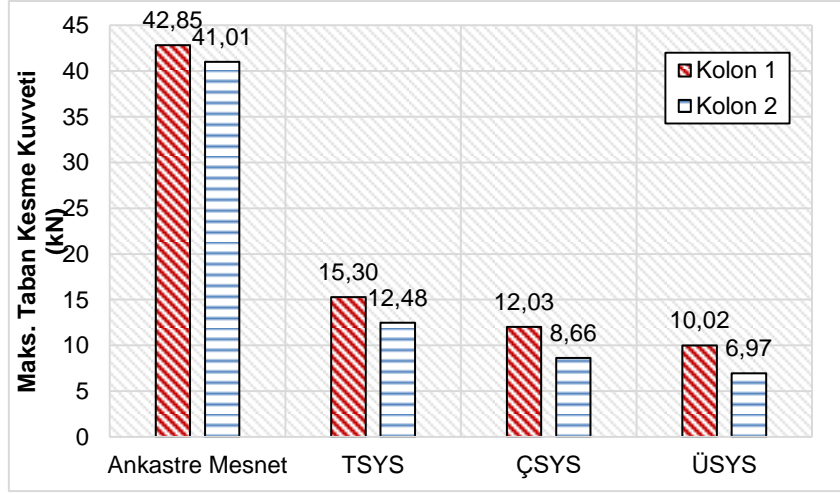


Şekil 11. Ankastr mesnetli ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapıların maksimum kat ivmeleri



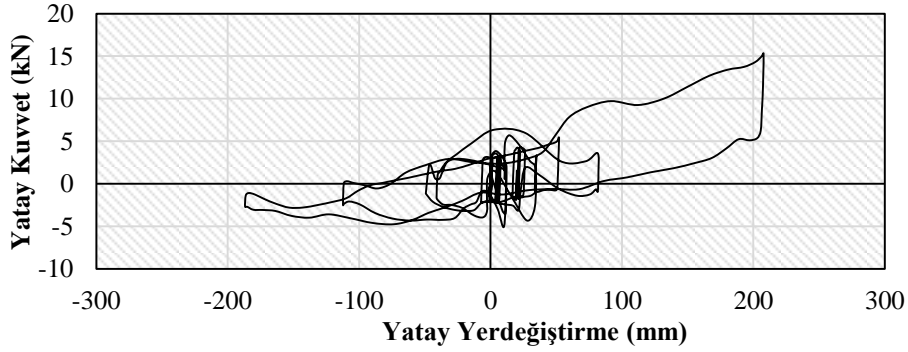
Şekil 12. Ankastr mesnetli ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapıların 5. kat ivme değerlerinin zaman ile değişimi

Bir yapının tasarımında dikkat edilmesi gereken bir diğer kuvvet de taban kesme kuvvetidir. Şekil 13 Northridge depremi etkisindeki ankastr mesnetli ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapılar için Kolon 1 ve Kolon 2'de oluşan maksimum taban kesme kuvvetlerini göstermektedir. Ankastr mesnetli yapının maksimum taban kesmesi 1. kolonda 42,85 kN ve 2. kolonda 41,01 kN iken izolasyon sistemlerinin uygulandığı yapılarda maksimum taban kesme kuvvetleri TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörleri için sırasıyla kolon 1'de yaklaşık 15 kN, 12 kN ve 10 kN olarak elde edilmiştir. Kolon 2 için ise sırasıyla elde edilen maksimum taban kesme kuvvetleri 12,48 kN, 8,66 kN ve 6,97 kN'dur. Bu durumda farklı sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı yapılarda oluşan maksimum taban kesme taleplerinin ankastr mesnetli yapıya göre önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmüştür. Kolonlarda oluşan yatay kesme kuvvetlerinin farklı olmasının nedeni deprem sırasında kolonlar üzerinde oluşan farklı düşey normal kuvvet değerleridir. Ayrıca ÜSYS izolatörlerin düşük eğrilik yarıçaplı ve düşük sürtünme katsayılı iç sürtünme yüzeylerine sahip olması deprem etkisine karşı diğer iki izolatöre nazaran daha esnek davranış göstermesini sağlamış ve taban kesme kuvvetini daha fazla azaltmıştır.

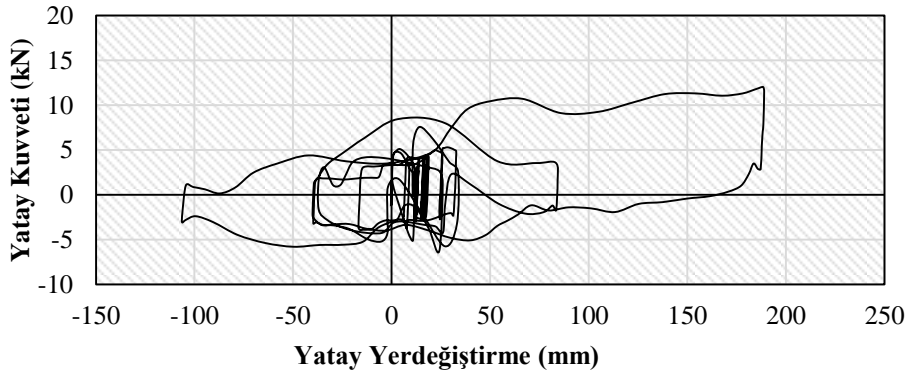


Şekil 13. Ankastr mesnetli ve TSYS, ÇSYS, ÜSYS izolatörlü yapıların maksimum taban kesme kuvvetleri

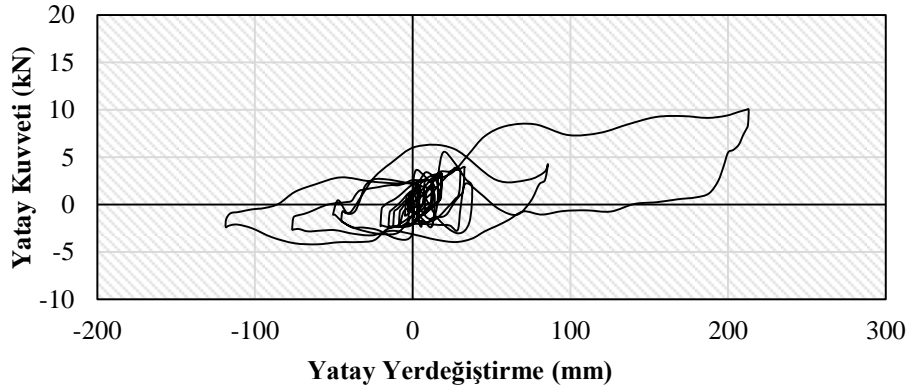
Şekil 14 Kolon 1 altındaki TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlerinde deprem süresince oluşan kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerini göstermektedir. Kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri döngü başına enerji kaybını ve yüzeyler tarafından sağlanan etkili sönümü belirlemek amacıyla kullanılabilir. Şekil 14 (a) incelendiğinde TSYS'de oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmenin yaklaşık 210 mm olduğu görülmektedir. Maksimum yatay yerdeğiştirme oluştuğunda kolon tabanında yaklaşık 15 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır. Benzer şekilde Şekil 14 (b) ve (c) incelendiğinde kolon tabanındaki ÇSYS izolatörde yaklaşık 190 mm maksimum yatay yerdeğiştirme oluştuğunda kolon tabanında 12 kN yatay kesme kuvveti oluşurken ÜSYS izolatöründe yaklaşık maksimum yatay yerdeğiştirme 215 mm ve kolon tabanında 10 kN yatay kesme kuvveti oluşmaktadır.



(a)



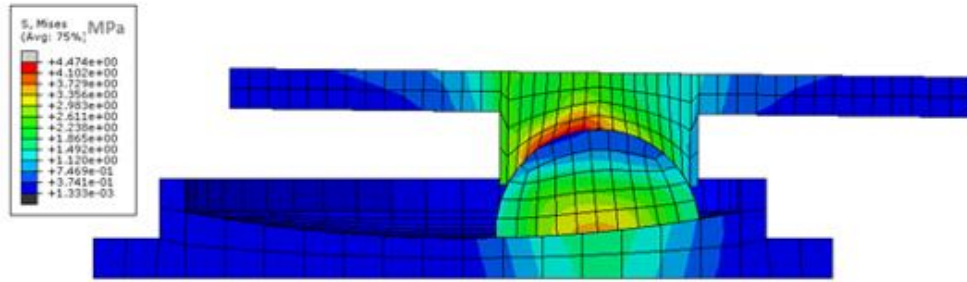
(b)



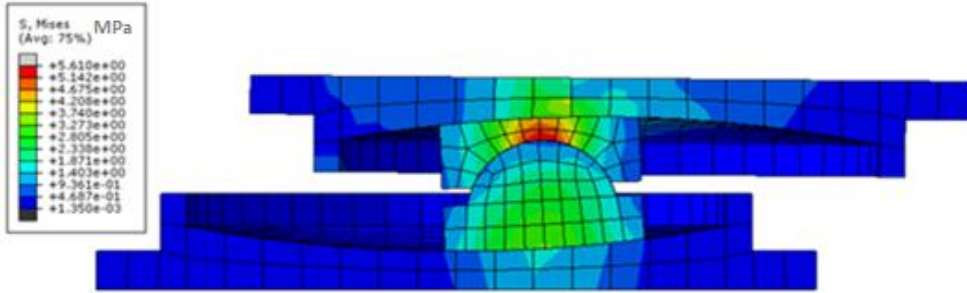
(c)

Şekil 14. Kolon 1 altındaki (a) TSYS, (b) ÇSYS ve (c) ÜSYS izolatörlerinde oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüleri

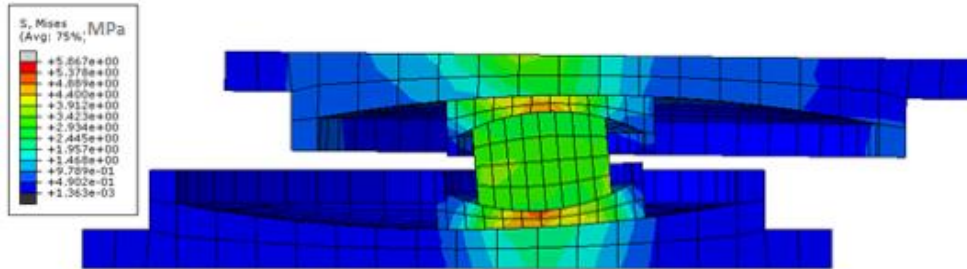
Şekil 15 (a), (b), (c) sırasıyla Kolon 1 altındaki TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatörlerinin maksimum yerdeğiştirme durumlarını ve enkesitlerinde oluşan gerilme durumlarını göstermektedir. Şekillerde gösterilen gerilme izolatörün herhangi bir yükleme durumunda plastik şekil değiştirmeye maruz kalıp kalmadığını belirlemek için hesaplanan bir gerilme türüdür. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan yüklemelerin plastik şekil değiştirmeye sebep olmadığı görülmüştür. Bu durum izolatör tasarımında izolatörlerin elastik davrandığı kabulüne uymaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 15. Kolon 1 altındaki (a) TSYS, (b) ÇSYS ve (c) ÜSYS izolatörlerinin maksimum yatay yerdeğiştirme ve gerilme durumları

IV. SONUC

Bu çalışma kapsamında deprem yalıtımı TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatör kullanılarak gerçekleştirilmiş beş katlı betonarme bir yapının zaman tanım alanında analizleri üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörler için yapıda oluşan tepkiler maksimum görelî yerdeğiştirme, kat ivmeleri ve kolon taban kesme kuvveti açısından incelenerek ankastre mesnetli durum ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca deprem süresince izolatörlerde oluşan kuvvet-yerdeğiştirme döngüleri ve maksimum yerdeğiştirmedeki enkesit ve gerilme durumları sunulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- ❖ Sürtünmeli sarkaç izolatörlerin kullanıldığı deprem yalıtımlı yapıların her biri ankastre mesnetli yapı ile karşılaştırıldığında yapıda oluşan görelî kat yerdeğiştirmelerinin, kat ivmelerinin ve taban kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Örnek olarak 5. kattaki maksimum görelî yerdeğiştirme ve ivme değerleri ankastre mesnetli yapı ile karşılaştırıldığında azalma oranları ÜSYS için sırasıyla %48,2 ve %84,6, ÇSYS için %46,8 ve %82,4 ve TSYS için %36,7 ve %78,6 olarak elde edilmiştir. Seçilen birinci kat kolon tabanlarında oluşan maksimum kesme kuvvetlerindeki azalma oranları ise TSYS, ÇSYS ve ÜSYS izolatör için sırasıyla %64,2 , %71,9 ve %76,6'dır.
- ❖ Farklı sürtünme yüzeyi sayısına sahip izolatörler için yukarıda verilen azalma oranları karşılaştırıldığında dikkate alınan tüm sismik tepkiler için ÜSYS izolatörün TSYS ve ÇSYS izolatörlerinden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

V. KAYNAKLAR

- [1] H. Moeindarbari ve T. Taghikhany, "Seismic optimum design of triple friction pendulum bearing subjected to near-fault pulse-like ground motions," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 50, no. 4, pp. 701–716, 2014.
- [2] P. Namiranian, G. Ghodrati Amiri ve S. Veismoradi, "Near-fault seismic performance of triple variable friction pendulum bearing," *Journal of Vibroengineering*, vol. 18, no. 4, pp. 2293–2303, 2016.
- [3] A.A. Sarlis ve M.C. Constantinou, "Model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions," Report No. MCEER-13-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 2013.
- [4] V. Zayas, S. Low ve S. Mahin, 1990. "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation," *Earthquake Spectra*, vol. 6, no. 2, pp. 317–333, 1990.
- [5] N.V. Nguyen, H.P. Hoang ve K.T. Huong, "Performance of Single Friction Pendulum bearing for isolated buildings subjected to seismic actions in Vietnam," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 143, no. 1, 2018.
- [6] D.M. Fenz ve M.C. Constantinou, "Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 35, no. 11, pp. 1403–1424, 2006.
- [7] N.D. Dao, "Seismic Response of a Full-scale 5-story Steel Frame Building Isolated by Triple Pendulum Bearings under 3D Excitations," PhD Thesis, University of Nevada, Reno, 2012.
- [8] D.M. Fenz ve M.C. Constantinou, "Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 37, no. 2, pp. 185–205, 2008b.

- [9] D.M. Fenz ve M.C. Constantinou, "Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 37, no. 2, pp. 163–183, 2008c.
- [10] A.E. Pigouni, M.G. Castellano, S. Infanti ve G.P. Colato, "Full-scale dynamic testing of pendulum isolators (Curved surface sliders)," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.130, no.105983, 2019.
- [11] A.H. Deringöl, "Seismic performance of steel moment frames with variable friction pendulum systems under real ground motions," *International Advanced Researches and Engineering Journal*, vol. 02, no. 03, pp. 208–216, 2018.
- [12] A.H. Deringöl ve E.M. Güneyisi, "Effect of friction pendulum bearing properties on behaviour of buildings subjected to seismic loads," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.125, no.105746, 2019.
- [13] P.M. Calvi, M. Moratti ve G.M. Calvi, "Seismic isolation devices based on sliding between surfaces with variable friction coefficient," *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 4, pp. 2291–2315, 2016.
- [14] M. Yurdakul ve Ş. Ateş, "Modeling of triple concave friction pendulum bearings for seismic isolation of buildings," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 40, no. 3, pp. 315–334, 2011.
- [15] M. Yurdakul, Ş. Ateş ve A.C. Altunışık, "Comparison of the dynamic responses of Gülburnu highway bridge using single and triple concave friction pendulums," *Earthquakes and Structures*, vol.7, no. 4, pp. 511-525, 2014.
- [16] ABAQUS, Analysis User's Guide Volume IV: Elements Version 6.14, Dassault Systemes Simulia, Inc., Providence, RI, USA, 2014.
- [17] M. Zulfakar, "Farklı Sürtünme Yüzeyleli Sarkaç İzolatörlerin Yapı Deprem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE, 2021.
- [18] R. Aguiar, G. Villarruel, P. Caiza, T. Roberto ve A. Falconí, "Implications Of Friction Coefficient Variation In The Seismic Analysis Of Structures With Triple Friction Pendulum Systems (FPS) An Application Case," *16th World Conference on Earthquake*, 16WCEE 2017, 2017.
- [19] PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [20] M. Malekzadeh ve T. Taghikhany, "Adaptive Behavior of Double Concave Friction Pendulum Bearing and its Advantages over Friction Pendulum Systems," *Transaction A: Civil Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 81-88, 2010.
- [21] F. Weber, J. Distl, C. Braun, "Isolation performance assessment of adaptive behaviour of triple friction pendulum," *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 7, no. 1, pp. 17-33, 2017.