




Karma Deprem Yalıtım Sistemlerinin Deneysel Performans Değerlendirmesi

Experimental Performance Evaluation of Hybrid Isolation Systems

Cem Yenidoğan ^{1*} 

¹ Bahçeşehir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: cem.yenidogan@eng.bau.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 21.09.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 20.02.2021

Atıf şekli / How to cite: YENİDOĞAN C. (2021). Karma Deprem Yalıtım Sistemlerinin Deneysel Performans Değerlendirmesi. DEÜFMD 23(69), 767-779.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236906

Öz

Deprem yalıtım teknolojisi yer hareketi ile yapısal sistem arasında bir ayrışım yaratarak depremlerin yıkıcı etkilerini azaltmak amacı ile kullanılan yenilikçi bir tasarım ve güçlendirme yöntemidir. Bu çalışma ¼ ölçekli üç katlı simetrik ve eşmerkezli çelik yapının korunması için önerilen karma yalıtım sistemlerinin sarsma masası deneyleri ile etkinliğinin araştırılması üzerine odaklanmaktadır. Kullanılan pasif yalıtım sistemi, yüksek sönümlü elastomer ve düz yüzeyli sürtünme tipi kayıcı yalıtım birimlerinden oluşmaktadır. Deney programında kullanılan yer hareketi kademeli olarak artırılarak, yalıtım sisteminde ortaya çıkabilecek davranış farkları araştırılmıştır. Deprem kaydının %100 etkilendiği durumda daha yüksek kayma modülüne sahip olan elastomer birimlerden oluşan yalıtım sisteminin daha düşük kayma modülüne sahip olan deprem yalıtım sistemine oranla taban kesme kuvveti açısından beklenildiği gibi daha yüksek değerler verdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem Yalıtımı, Yüksek Sönümlü Elastomer, Düz Yüzeyli Sürtünme Tipi Yalıtıcı, Sarsma Masası Testleri

Abstract

The seismic isolation technology is an innovative design/retrofit method. It decouples the structural response from the ground motion to reduce floor accelerations while concentrating most of the deformation demands at the isolation interface. The main objective of this research study is to investigate the effectiveness of passive-hybrid isolation systems for a ¼ scaled mass concentric three-story steel structure. The passive-hybrid isolation system is a combination of HDRB and PTFE sliding bearings. The ground motion used in the shake table tests is gradually increased to investigate changes in the dynamic response characteristics of the hybrid isolation system. It has been observed that the isolation system consisting of elastomer units with larger shear modulus subjected to higher base shear with displacement demands than the system with the lower shear modulus.

Keywords: Seismic isolation, HDRB, Flat friction sliders, shake table tests

1. Giriş

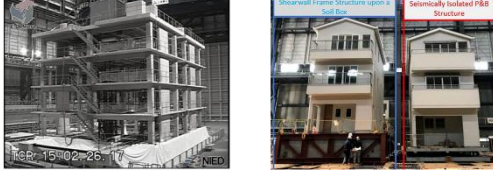
Deprem insan hayatını tehdit eden doğal bir afet olması yanında büyük ekonomik kayıplara ve modern hayatın işleyişinde önemli aksamalara neden olabilmektedir. Bu yüzden, sürdürülebilirlik hedefleri ve depreme dirençli bir toplum yapısının oluşturulması ancak sistematik ve bütünsel yaklaşımların uygulanması ile mümkündür. Olası bir depremde mevcut yapı envanteri ve alt yapı sistemlerinde ortaya çıkabilecek hasar dağılımının doğru tespit edilebilmesi, can ve mal kayıplarının azaltılması, geri kazanım adı verilen sürecin kısaltılması ancak afet öncesi stratejik planlama ve doğru afet yönetimi ile mümkündür. Afetlerden önce stratejik planlamada kullanılan envanter, bina hasar görülebilirlik çalışmaları ile karar verici mekanizmaya kritik çıktılar sunabilirler [1,2,3]. Yapı envanterinde yer alan binalar inşa edildikleri yıllara göre yürürlükte olan yönetmeliklerin dikkatlice ele alınması, yön eylem planının oluşturulmasında oldukça önemlidir. Büyük depremlerden sonra öğrenilen deneyimler ve yapısal performansın daha iyi hale getirilmesi için yürütülen bilimsel araştırmalar, deprem yönetmeliklerinin güncellenmesini veya son şekillerini almalarını sağlamışlardır.

Günümüzde deprem yönetmelikleri ve şartnameler eksiksiz bir şekilde uygulandığında, can güvenliği ve göçmenin engellenmesi performans hedefleri olağan bir durum haline gelebilmektedir. Diğer bir deyişle, geleneksel yöntemlere göre inşa edilen, kapasite tasarım ilkelerinin uygulandığı, yeterli dayanım ve süneklığe sahip yapılarda, orta ve büyük ölçekli depremler sonrası yapısal kararsızlığa bağlı göçmenin meydana gelmediği, saha incelemeleri ve matematiksel modeller yardımı ile ispatlanmıştır [4]. Fakat çağımızın getirdiği yeni koşullar ve deprem mühendisliğinde yaşanan ilerleme düşünüldüğünde paydaşlar tarafından standart olarak talep edilen can güvenliği performans hedefi yerine daha yüksek performans hedefleri talep edilebilmektedir. Örneğin büyük ölçekli bir deprem sonrasında barınma sorununun ortaya çıkmaması, sanayi yapıları ve iş merkezlerinde ekonomik kayıpların asgari seviyede tutulması, hastane, afet yönetim merkezleri gibi önemli yapıların deprem sonrası işlevselliklerinin korunabilmesi aranan yüksek performans hedefleri arasında sayılabilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde

deprem yalıtımı getirmiş olduğu esneklik ve ekonomik çözümler ile mühendislere farklı seçenekler sunabilmektedir. Deprem yalıtım sistemleri, geçmişte öncelikle örnek yapılar ve önemli yapılar için tercih edilirken, teknolojinin olgunlaşma evresine girmesiyle birlikte şartnameler ve deprem yönetmeliklerinde binalarda kullanımına dair tasarım yöntemleri, deney protokolleri, kontrol mekanizması için izlenecek kurallar açıklanmıştır. Japon Deprem Yalıtım Derneği tarafından derlenen yalıtımlı bina envanteri pasif kontrol sistemlerinin toplum nezdinde kabulü ve tarihsel gelişimine ışık tutmaktadır. Bu süreçte 1994 Northridge ve 1995 Hyogo Ken Nanbu depremlerinden sonra yalıtımlı bina sayısında ortaya çıkan artış, bu iki depremin dünya genelinde yalıtım teknolojisine olan ilgiyi hızlandırdığı görülmektedir [5]. Türkiye’de de benzer bir şekilde artan uygulama sayısının bir sonucu olarak deprem yalıtım teknolojisi ve bu teknolojinin binalarda kullanımına dair kurallar 2018-Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY-2018) ayrı bir bölüm olarak yer almıştır[6]. Mühendisler için deprem yalıtımı uygulanmış binaların tasarım ve çözüm kurallarını içeren TBDY-2018’de yer alan yeni bölüm, rehberlik eden bir doküman olması yanında teknolojinin geniş bir mühendis kitlesi tarafından tanınmasına ve uygulanabilecek yöntemlerin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

Deprem yönetmeliklerinde geleneksel ve deprem yalıtımlı binaların tasarımı ve analizi için yer alan kuralların doğrulanması ve kontrolünde deneysel yaklaşımlar önemli rol oynamaktadır [7,8,9,10,11]. Deneysel deprem mühendisliğinde en ideal yaklaşım, yapıların gerçek boyutlarında inşa edilerek, elastik hasar seviyesinden başlayarak elastik-ötesi hasar seviyesine kadar geniş bir bant aralığında incelenmesidir. Japonya ülke olarak deprem konusunda farkındalık seviyesinin yüksek olmasından ve yenilikçi mühendislik yaklaşımları ile gerçek ölçekli deney programlarına öncülük yapmaktadır. Japonya’da yer alan, dünyanın en büyük sarsma masası laboratuvarında ölçeklendirilmeye ihtiyaç duyulmadan, gerçek boyutlarında inşa edilen yapıların performans değerlendirilmesi, yeni teknolojiler ve deprem koruma sistemlerinin tahkikleri bilimsel araştırma programları kapsamında yürütülmektedir (Şekil 1.). Bu önemli çalışmalar, yapı mühendisliğinde ihtiyaç duyulan gerçek veri ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlaması yanında mevcut tasarım

kurallarının gözden geçirilmesine, çözümlemede daha doğru analitik modellerin kullanımına ve gerekli görüldüğü takdirde yönetmeliklerde yer alan kuralların değiştirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1. Gerçek ölçekli betonarme, ahşap ve deprem yalıtımlı ahşap yapı deneyleri[7,8,9,10]

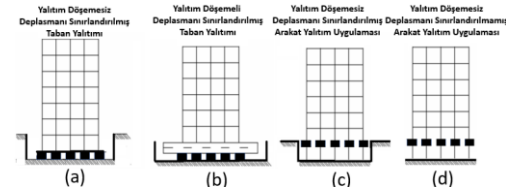
Büyük ölçekli sarsma masası deneyleri için inşa edilecek yapıların maliyeti ve sarsma masası laboratuvarının işletim masrafları büyük bütçeler gerektirmektedir. Bu yüzden dünyada kabul görmüş yönetmeliklerin birçoğunda yer alan kurallar genellikle ideal olarak tanımlanan maliyetli deneyler yerine, saha incelemelerinden elde edilen bulgular, matematiksel modeller, ölçeklendirilmiş sarsma masası deneylerine ya da laboratuvarlarda eleman bazlı yürütülen yarı-statik, sözde-dinamik deneylere dayanmaktadır. Türkiye’de deprem davranışı için deneysel çalışmalarda ağırlıklı olarak yarı-statik ve sözde dinamik deney protokolleri kullanılmaktadır. Fakat ölçeklendirilmiş sarsma masası deneyleri benzeşim ilkelerine uyarak etkitilen dinamik yükler altında yapıların genel davranışını daha gerçekçi temsil edebilmekte ve önerilen matematiksel modellerin geçerliliğinin doğrulanmasında tercih edilmektedir.

Türkiye’de deprem yalıtım teknolojisi ile ilgili bilimsel araştırmalar genellikle deneysel çalışmalar yerine sayısal modeller[12] üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu durumun başlıca nedeni ülkemizde sarsma masası test programlarını yürütecek kapasitede laboratuvar sayısının sınırlı olmasıdır. Bu çalışma kapsamında deprem yalıtım teknolojisinin binalarda uygulanması için önerilen genel kavramlar tanımlanırken, Türkiye’nin ilk sarsma masası laboratuvarında yürütülen karma yalıtım sistemi deney programının çıktıları paylaşılmaktadır. Yüksek sönümlü elastomer birimlerinin özelliklerinden dolayı iki farklı karma yalıtım sistemi, artımsal olarak verilen deprem yer hareketi altında incelenerek performans kıyaslaması yapılmıştır. Yalıtım sistemlerinin genel davranışının tespiti ve kıyaslanmasında tasarım ölçütleri arasında

taban kesme kuvveti, üst yapının hasar dağılımı, kat ivmelerinin değişimi ve yalıtım sisteminin yer değiştirme talepleri temel alınarak bir değerlendirilmeye gidilmiştir.

1.1. Binalarda Deprem Yalıtım Sistemleri

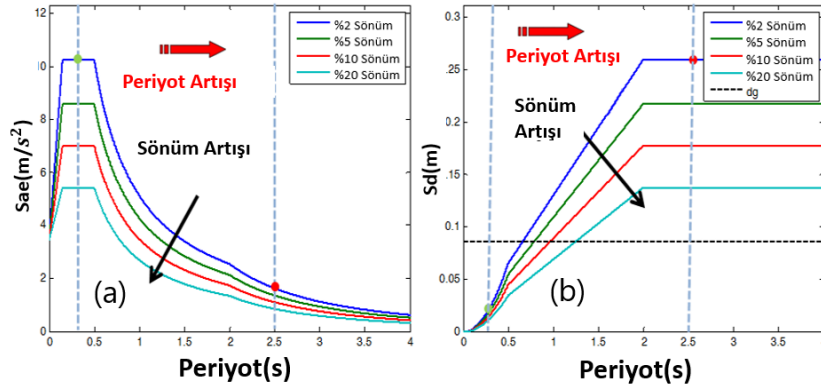
Deprem yalıtım teknolojisi yüksek performans hedefi konulan yapılarda, yer hareketi ile yapısal sistem arasında bir ayrışım yaratarak depremlerin yıkıcı etkilerini azaltmak amacı ile kullanılan yenilikçi bir tasarım ve güçlendirme yöntemidir. Geleneksel yaklaşımlara göre tasarlanmış olan yapılarda yer değiştirmelerin azaltılması için artırılan rijitlik, kat ivmelerinde artışlara neden olurken kat ivmelerinin azaltılması için alınacak önlemler ise izin verilebilir yer değiştirme taleplerinin aşılması durumunu ortaya çıkartabilmektedir [13,14,15]. Dolayısı ile yönetmelikler ile uyumlu, geleneksel yöntemlere göre tasarlanan binalar için yüksek performans hedefleri amaçlandığında yapısal ve yapısal olmayan hasarın istenilen seviyelerde tutulması ekonomik olmayan çözümler üretebilmektedir. Yüksek performans hedefi konulan binalar arasında yer alan hastane, veri merkezi ve afet yönetim merkezleri gibi özel yapılarda hasarların azaltılmasında olgunlaşma sürecine girmiş olan yalıtım teknolojisi, tasarımcılara yapının servis ömrünü uzatan, ekonomik ve esnek çözümler sunabilmektedir. Fakat günümüzde yalıtım teknolojisinin kullanımı sadece özel yapılarla sınırlı kalmayarak binalarda, enerji aktarım sistemlerinde, endüstriyel üretim merkezlerinde, belirli katlarda yer alan verilerin/pahalı teçhizatların ve müzelerde yer alan değerli kültür varlıklarının korunması gibi farklı amaçlara hizmet edebilmektedir [16,17,18]. Deprem yalıtım sistemleri inşa edilecek binada veya güçlendirilmesi planlanan mevcut bir binanın özelliklerine göre Şekil 2.’de gösterildiği gibi yapının kilit noktalarına yerleştirilir.



Şekil 2. Üstyapı özelliklerine göre deprem yalıtım sistemlerinin farklı yerleşim planları

Yalıtım sistemleri yardımı ile kavramsal olarak yapının hakim doğal titreşim periyodu tehlikeli bölge olarak tanımlanan frekans aralığının dışına taşınarak yapıya etkiyebilecek tasarım kuvvetlerinin azalımı sağlanabilir. Diğer bir deyişle yalıtım sistemleri yardımı ile yapıya etkiyebilecek muhtemel deprem kuvvetleri azaltılarak yer değiştirme taleplerinin büyük bir bölümü yalıtım katmanında yoğunlaşır. Yapıda tanımlanan yalıtım modunun frekansının rijit bir yapıya göre azaltılması, Şekil 3'te gösterildiği şekilde spektral ivmelerde dolayısı ile

kuvvetlerde azalıma neden olurken aynı zamanda yalıtım birimlerinde yer değiştirme taleplerinin artımına neden olacaktır. Yalıtım arayüzünde ortaya çıkabilecek aşırı yer değiştirme talepleri yalıtım birimlerinin içinde barındırdığı sönüm özelliklerine veya ek enerji sönümleyici cihazlar ile sınırlandırılabilir. Şekil 3a ve Şekil 3b'de geleneksel bir yapının sadece deprem yalıtım sistemi kullanılarak dinamik davranışının değişimi ile elde edilebilecek kazanımlar deprem davranış spektrumlarında gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) EC-8 tasarım spektrumuna göre spektral ivme değişimi (b) Spektral yer değiştirme değişimi [18]

Son dönemde konut tipi yapılarda ortaya çıkan deprem yalıtım teknolojisine artan ilginin nedenleri arasında büyük ve orta ölçekli depremlerden elde edilen saha verilerinin artması, malzeme biliminde ve bilgisayar teknolojisinde ortaya çıkan hızlı gelişim sayılabilir. Türkiye'de benzer sebeplere ek olarak, 2013 Sağlık Bakanlığı genelgesi[19] 2007 deprem yönetmeliğine[20] göre 1. ve 2. Deprem bölgelerinde yer alan 100 yatak ve üzeri kapasiteye sahip olan hastaneler ve TBDY-2018[6] içerisinde ayrı bir bölüm olarak yer alan deprem yalıtımlı bina tasarım ve çözümleme kuralları teknolojinin kullanımı ve yaygınlaşmasında katkı çarpanı etkisi yaratacaktır.

1.2. Deprem Yalıtım Birimlerinin Özellikleri ve Sayısal Modelleme Yöntemi

Deprem yalıtım teknolojisi yapıya eklenen cihazlar yardımı ile yukarıda belirtildiği gibi yapının dinamik davranışında değişimler meydana getirmektedir. Teknolojinin doğru kullanımı öncelikle her bir proje için koyulan performans ölçütlerinin doğru anlaşılacak,

yapısal güvenlik ve ekonomi anlamında en uygun koruma sisteminin seçilmesi ile başlar. Uygun yalıtım cihazlarının boyutları ve düzeni seçildikten sonra nihai tasarım ile göreceli kat ötelemeleri, kat seviyesinde oluşan ivmeler, taban kesme kuvveti ve işlevselliğin önem arz ettiği binalarda yapısal olmayan sistem/eleman hasarları değerlendirilir. Deprem yalıtım sistemleri geleneksel tasarım yöntemleri ile kıyaslandığında, kat ivmeleri ve göreceli kat ötelemeleri ile ilgili kazanımlardan ödün vermeden, yüksek performans hedeflerinin ekonomik bir şekilde elde edildiği bir tasarıma olanak sağlayabilir.

Deprem yalıtımı uygulanmış yapılarda, tasarım depremi seviyesinde yapısal hasarın elastik sınırlarda veya akma dayanımının aşıldığı durumlarda ise bu sınırlara yakın bir seviyede kalması önerilmektedir. Yalıtım sistemlerinde kullanılan yalıtım birimleri ideal olarak düşeyde etkiyen kuvvetleri karşılayabilecek yeterli rijitlikte ve yatayda nispeten daha düşük rijitliklere sahip birimlerdir. Araştırma enstitüleri ve özel sektörün araştırma geliştirme laboratuvarlarında yürütülen çalışmalar

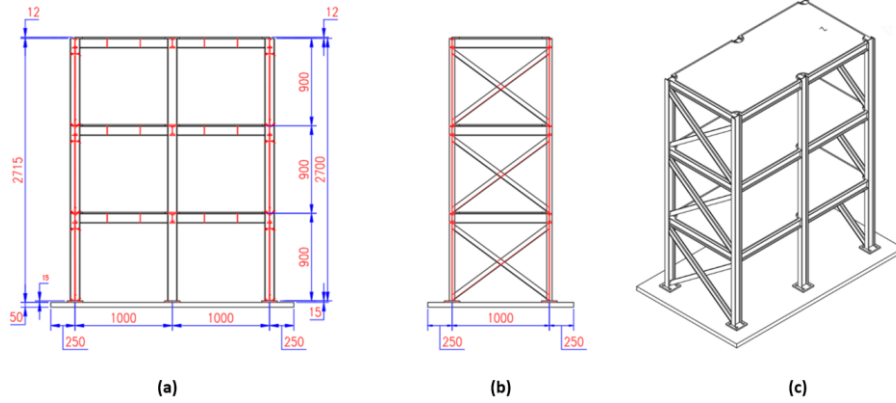
ekseninde her yıl deprem yalıtım birimleri ile ilgili birçok patent başvurusu yapılmaktadır. Fakat yürürlükte olan deprem yönetmelikleri ve şartnameler genellikle tüm cihazların detaylarına göre hazırlanmaktan ziyade inşaat endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulan ve genel davranışı iki ana kategoride sınıflandırılan kauçuktan üretilen elastomer ve sürtünme tipi kayıcı yalıtım birimleri ile ilgili kuralları içermektedir. Yönetmeliklerde iki ana kategoride sınıflandırılan elastomer ve sürtünme tipi yalıtım birimlerinden beklenen davranış, artan yerdeğiştirmeler altında artan dayanım özelliğine sahip olmasıdır.

2. Sarsma Masası Deneysel Programı

Deprem yalıtım teknolojisinin günümüzde yaygın bir şekilde kabul görmesinde deneysel deprem mühendisliğinde kullanılan sarsma masası deneylerinin önemli katkısı vardır. Deprem yalıtım sistemlerinde hakim olan doğrusal olmayan davranışın modellenmesi ve kullanılan sayısal modellerin doğrulama çalışmaları yalıtım birimleri için uygulanan testler ve sistem davranışının gerçek deprem yer hareketi altında değerlendirildiği sarsma masası deneyleri ile yürütülmektedir. Bu tarz çalışmalarda performans değerlendirilmesinde en doğru yaklaşım, zaman tanım alanında

doğrusal olmayan çözümleme için deprem tehlike çalışmaları ile uyumlu uygun yer hareketi seçimi ve ölçeklendirilmesinin yapılmasıdır.

Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsünde (KRDAE) yer alan sarsma masası laboratuvarı düşey yük kapasitesi ve boyutları açısından Türkiye'nin ilk kapsamlı sarsma masası laboratuvarı olma özelliğini taşımaktadır. KRDAE sarsma masası laboratuvarı 2000'li yılların başından başlayarak deprem yalıtım teknolojisi başta olmak üzere, tarihi yapılar, zemin dayanma yapıları ve yapısal olmayan elemanlara kadar geniş çerçevede deneysel çalışmaların yürütülmesinde etkin bir şekilde kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında oluşturulan sarsma masası deney programında, $\frac{1}{4}$ ölçekli karma deprem yalıtım sistemi uygulanmış çelik deney numunesinin dinamik davranışı ve uygulanan deprem yalıtım sisteminin etkinliği, kademeli olarak arttırılan deprem kayıtları ve harmonik yükleme altında incelenmiştir. Simetrik ve eşmerkezli tasarlanan çelik yapı, yüklemenin yapılacağı yönde çift açıklıklı moment aktaran çelik çerçeveden diğer yönde ise tek açıklıklı ve deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından karşılandığı bir sistemden oluşmaktadır (Şekil 4.).

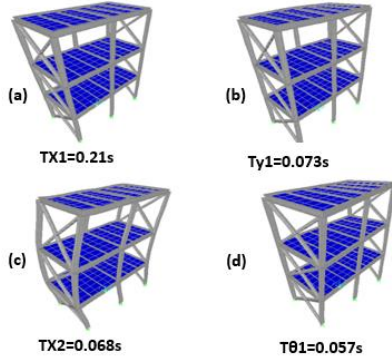


Şekil 4. (a) Moment aktaran çerçeve (b) Merkezi çelik çaprazlı çerçeve (c) 3 boyutlu gösterim

Taşıyıcı sistemin deprem yüklerini güvenli ve sürekli bir şekilde aktarabilecek yeterli rijitlik, kararlılık ve dayanıma sahip olmasına dikkat edilmiştir. Karma yalıtım sistemi, üst yapının ve sarsma masasının özelliklerine göre belirlenmiştir. Yalıtım birimi sayısı ve düzeneği belirlendikten sonra prototip deneyleri kullanılarak Şekil 5'te gösterilen üç boyutlu bilgisayar modeli, ticari programlar arasında

yaygın kullanım alanı bulan CSI SAP2000[21] ve akademik kullanım amaçlı OpenSees[22] programlarında oluşturulmuştur. Üst yapının dinamik davranış özelliklerini yansıtan bu modelde etkitilecek deprem yer hareketleri incelenerek, yapısal hasarın elastik sınırlar seviyesinde tutulması sağlanmıştır. Ön tasarımda deprem yer hareketinin etkitileceği yönde üst yapının hakim doğal titreşim modu

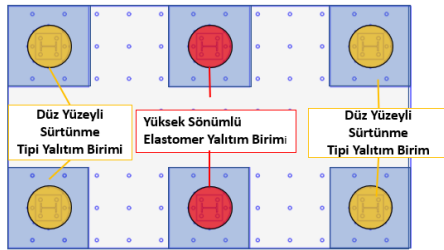
0.21s (Şekil 5a) ve ikinci modu ise 0.68s olarak bulunmuştur. Yapısal sistemin diğer yönde doğal titreşim periyodu (Şekil 5b) ve burulma modu ise 0.057s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. -Çelik yapının titreşim modları

Deney programında araştırılan karma deprem yalıtım sistemi dört sürtünme tipi düz kayıcı yalıtım birimi ve iki yüksek sönümlü kauçuktan oluşmaktadır. Merkezlenme koşulu için deney numunesinin ortasında bulunan kolonların altına yerleştirilen kauçuk elastomerlerin farklı kayma modülüne sahip olması durumunda yapısal performansa etkisi bu çalışmanın inceleme konularından birisi olmuştur. Diğer bir deyişle orta kolonlar altına yerleştirilmiş olan yüksek sönümlü kauçuktan üretilen elastomer mesnetlerin değiştirilmesi ile toplamda iki farklı karma yalıtım sistemi elde edilmiştir. Yüksek sönümlü yalıtım birimleri sistemin merkezlenme koşulunu sağlarken, düz yüzeyli sürtünme tipi kayıcı yalıtım birimleri kauçuk tipi yalıtım birimlerinde ortaya çıkabilecek düşey yüke bağlı sorunları önlemek ve maliyeti düşürmek için Şekil 6.'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.

Karma Yalıtım Sistemi Plan Düzeni

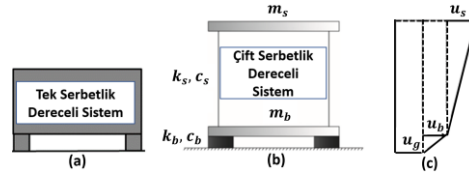


Şekil 6. -Deprem yalıtımlı çelik çerçevenin yalıtım sistemi düzeni

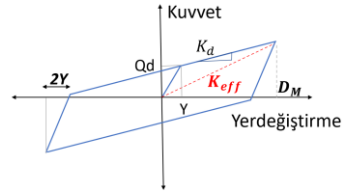
2.1. Yalıtım Birimlerinin Davranışı

Deprem yalıtım sistemlerinin 1900'lı yıllardan 2000'li yıllara kadar geçen süreç içerisinde tarihsel gelişimi araştırmacılar tarafından detaylı bir şekilde aktarılmıştır [13,14,15,18,23]. Deprem yalıtım sistemlerinin tasarımında tek serbestlik dereceli veya çift serbestlik dereceli sistemleri temel alan basitleştirilmiş doğrusal(Şekil7c) veya doğrusal olmayan yöntemler(Şekil 8) kullanılabilir. Basitleştirilmiş tek serbestlik dereceli modeller (Şekil 7a.) için Denklem 1.'de verilen hareket denklemi yardımı ile rijit üst yapı kabulüne göre uygun düzenleme ile performans tahkininde kullanılabilir. Benzer şekilde uygun düzenlemeler yapılarak üst yapının davranışının basitleştirilmiş olarak dikkate alındığı çift serbestlik dereceli sistem çözümü (Şekil 7b) ve bu yaklaşım lineer elastik davranış modeline (Şekil 7c) uyarlanabilir.

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega^2\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$



Şekil 7. -Basitleştirilmiş yalıtımlı bina modelleri



Şekil 8. -İdealleştirilmiş çift eğrili çevrim modeli

Nihai tasarım aşamasında ise yapısal olmayan elemanların korunmasının bir tasarım ölçütü olduğu durumlarda, seçilen doğrusal olmayan yalıtım sistemi ve üst yapının özellikleri yüksek modların etkisi ile değerlendirilebilmelidir. Yalıtım sisteminin, üstyapının davranışı üzerinde etkinliğinin araştırılması için üç boyutlu yapı modelleri genellikle deprem kayıtlarının iki veya daha fazla yönde etkilendiği durumlarda tercih edilmektedir. Deprem yalıtım birimlerinin yalıtım arayüzü plan yerleşimi, her bir yalıtım biriminin davranışını temsil eden değişkenler ve üstyapı üç boyutlu bilgisayar modeline dikkatlice aktarılmalıdır. Üst yapının rijit kabul edildiği tek moda dayalı analizler, sırası ile üstyapıya etkiyecek en büyük kuvvetler

ve yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirme değerlerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [18,24]. Tek modlu eşdeğer deprem yükü yöntemine ek olarak, tek serbestlik dereceli sistemlerin elastik ötesi davranışı için ikinci derece differansiyel denklem, Bouc-Wen modelinin kullanıldığı durumlarda Denklem 2'de gösterildiği gibi düzenlenerek de çözümlenebilir. Denklem 2'de yer alan T_d , Q_d , g , z deprem yalıtım sistemi periyodu, karakteristik dayanım, yer çekimi ivmesi ve zamana bağlı 0 ve 1 aralığında değişen bir katsayıya karşı gelmektedir.

$$\ddot{u}(t) + \left(\frac{2\pi}{T_d}\right)^2 u(t) + \frac{Q_d}{W} gz(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

Sarsma masası deney programında da yukarıda belirtilen yöntemlere göre yalıtımlı bina tasarlanarak, yüksek sönümlü elastomer ve sürtünme tipi yalıtım birimlerinden oluşan iki farklı deprem yalıtım sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Kullanılan yalıtım birimlerinin idealize eden davranış biçimi için kullanılan parametreler, dünyada kabul gören yönetmeliklerde yer alan genel kabullere göre kullanılmıştır [25,26,27,28]. Akma dayanımına karşı gelen yer değiştirme değeri, Denklem 3'te verilen ifade ile bulunmuştur. İfade içerisinde yer alan t değeri kauçuk tabaka kalınlığıdır. Prototip test verilerinden elde edilen sonuçların elastomer toplam tabaka kalınlığının %5 ile %10'u arasında değiştiğini temsil etmektedir.

$$D_y = 0.05 \sim 0.1 \sum t \quad (3)$$

Şekil 8'de yer alan ve akma dayanımının aşılması durumunda yalıtım sistemi rijitlik değeri Denklem 4'te yer alan ifade ile hesaplanmaktadır. A_r yüksek sönümlü elastomerde yer alan ince çelik levhalar ile elastomerin birbirine volkanizasyonu ile elde edilen alanı temsil etmektedir. G elastomer mesnetler için deneylerden elde edilen kayma modülünü göstermektedir. T_r ise toplam kauçuk kalınlığını ifade etmektedir.

$$K_d = GA_r / (T_r) \quad (4)$$

YSE için önemli bir tasarım parametresi olan karakteristik dayanımın hesabında herhangi bir

test verisi mevcut değilse FEMA-356[21] içerisinde yer alan Denklem 5 ile de hesaplanabilir. β_{eff} ve k_d yalıtım sisteminin etkin sönüm oranını ve elastik ötesi ikincil rijitlik değerini temsil etmektedir.

$$Q_d = \frac{\pi \beta_{eff} k_d D^2}{(2 - \pi \beta_{eff}) D - 2 D_y} \quad (5)$$

Sarsma masası deneylerinde kullanılan iki farklı tip Yüksek-Sönümlü-Elastomer (YSE) için prototip testlerinden elde edilen yalıtım birimi özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

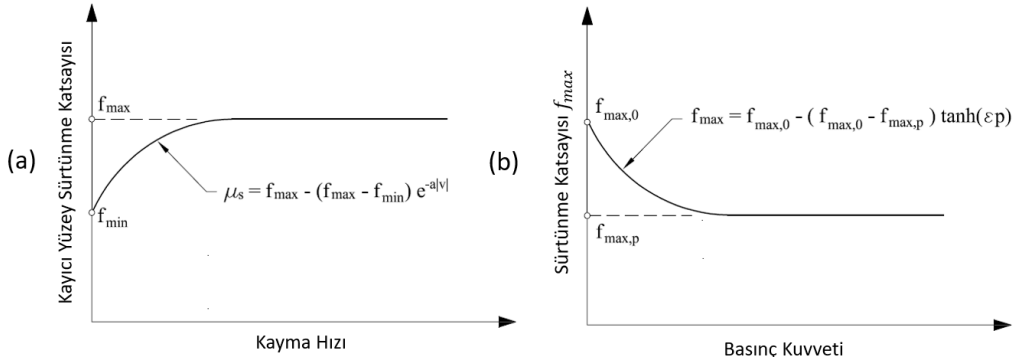
Tablo 1. YSE Birimlerin Özellikleri

Yalıtım Birimi Değişkeni	YSE-I	YSE-II
Yanal Rijitlik(kN/mm)	0.097	0.048
Düşey Yük Kapasitesi (kN)	27	15
Yerdeğiştirme Kapasitesi(mm)	± 85	± 55
Kayma Modülü-G(MPa)	0.8 MPa	0.4 MPa
Toplam Kauçuk Kalınlığı (mm)	136	136

Düz yüzeyli yalıtım birimlerinde deprem yükleri altında dinamik sürtünme katsayısının değişimi Constantinou vd. [29] tarafından önerilen Denklem 6 kullanılarak hesaplanabilmektedir. Önerilen denklem aksel yükte oluşabilecek değişimleri sürtünme modelinde dikkate almamaktadır. Aksel yüke bağlı en büyük sürtünme katsayısının değişimi ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Denklem 6'da yer alan f_{max} ve f_{min} en yüksek ve en düşük sürtünme katsayılarını, \dot{U} hız değerini, a ise f_{min} ve f_{max} değerlerine bağlı belirlenen bir değişkeni göstermektedir.

$$\mu_s = f_{max}(f_{max} - f_{min}) \exp(-a|\dot{U}|) \quad (6)$$

Yürütülen deneysel çalışmanın ön tasarım aşamasında girdi dosyalarının yaratacağı talep parametrelerinin hesabında, yalıtım birimlerinin üzerinde yalıtım döşemesi kullanılmasından dolayı Şekil 9'da verilen iki sürtünme modelinden sadece hıza bağlı değişimi dikkate alan sürtünme modeli tercih edilmiştir.



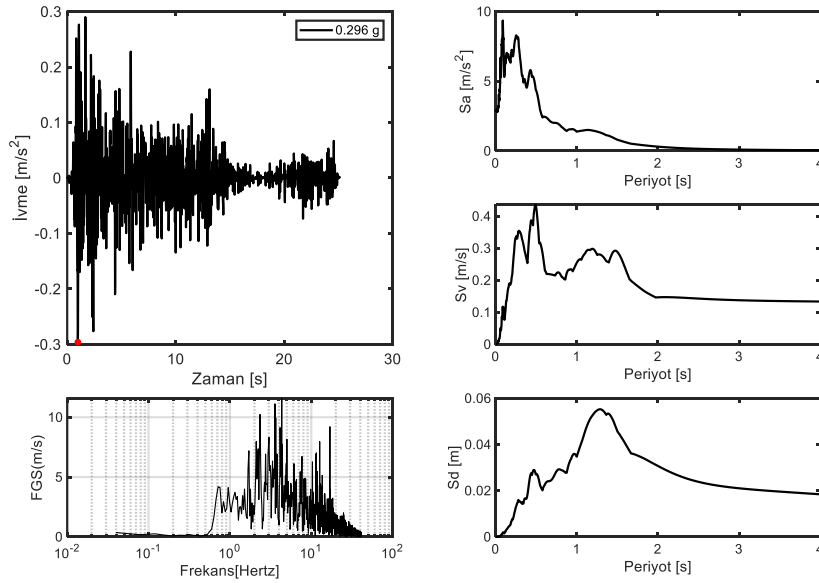
Şekil 9. (a) Hız değişimine bağlı sürtünme modeli[29] (b) Hız ve eksenel yükün değişimine bağlı sürtünme modeli[30]

Sürtünme katsayının değişimi yüzeye yağlanma uygulanması veya uygulanmamasına göre %1.5 ile %4 arasında değişen değerler aldığı prototip deneylerinde belirlenmiştir.

2.2. Sarsma Masası Deprem Kaydı Seçimi

Sarsma masası deneylerinde girdi olarak verilen deprem kayıtları ile çıktı olarak alınan kayıtların istenilen seviyelerde benzerlik gösterebilmesi sarsma masasından doğru kontrol yöntemlerinin uygulanmasına bağlıdır. Bu koşulun yerine getirilmesi sarsma masasının ve test edilen üst yapının özellikleri ile yakından ilişkilidir. Bu çalışma kapsamında seçilen deprem kaydının davranış spektrumu üst

yapının doğal titreşim periyoduna yakın aralıkta en yüksek değerlere karşı gelmektedir. Deney programının amaçları doğrultusunda seçilen deprem kaydına benzeşim kuralları uygulanarak bir ölçeklendirme yapılmıştır. Zaman tanım alanında deprem kaydının değişimi, ivme-hız-yerdeğiştirme davranış spektrumları ve frekans içeriği Şekil 10.'da gösterilmiştir. Seçilen deprem kaydı her bir karma yalıtım sistemi için %20 seviyesinden başlayarak yükseltilecek ortaya çıkabilecek davranış farklılıklarının incelenmesi sağlanmıştır. Artımsal dinamik deneysel analiz için deprem kaydının genlik değerleri, doğrusal olarak bir katsayı ile çarpılarak, deprem kaydının frekans içeriği korunmuştur.

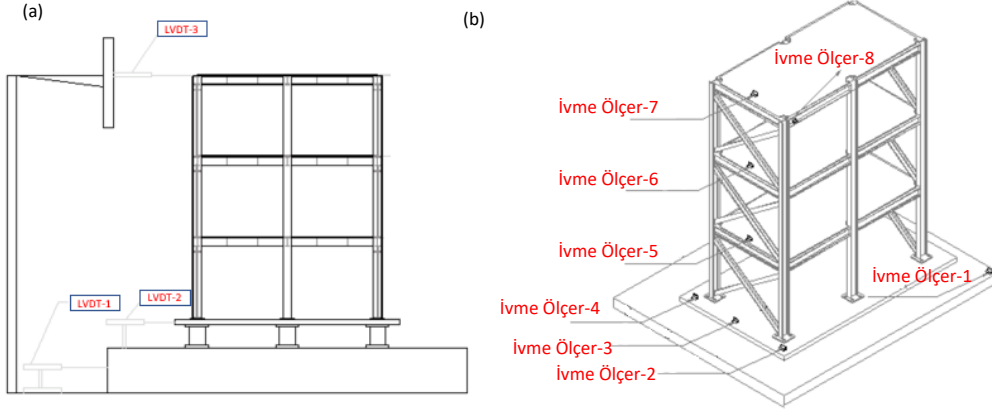


Şekil 10. El Centro kaydının sarsma masası deneyleri için kullanılan girdi dosyası, kaydın frekans içeriği ve davranış spektrumları

2.2. Ölçüm Aletlerinin Yerleşimi

Sarsma masası deneylerinde ölçüm aletlerinin uygun yerleşimi sistem tanılama çalışmaları için çok önemlidir. Deney programında deprem

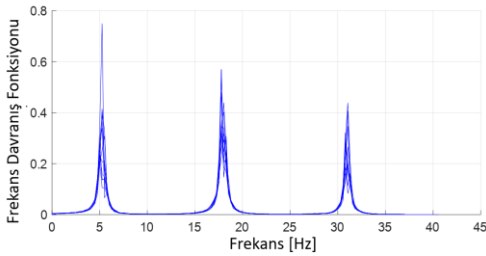
yalıtım sistemi ve üst yapının dinamik davranışını aynı anda yansıtabilecek şekilde hazırlanan ölçüm aleti yerleşim planı Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. -Yerdeğiştirme ölçer ve ivme ölçer düzeni

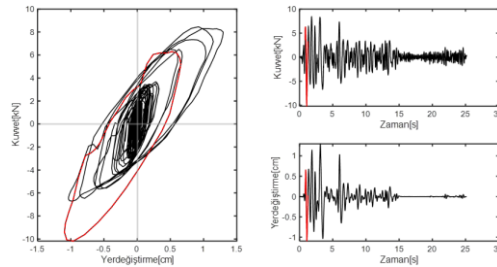
3. Bulgular

Deneyler sırasında kaydedilen veriler, uygun filtreleme yöntemleri kullanılarak yapının ilk üç doğal titreşim moduna karşı gelen frekansların tespitinde kullanılmıştır (Şekil 12). İşlenmiş deney verilerinin ve ön tasarımda kullanılan üç boyutlu sayısal modelin yakın değerler vermesi, hem ön tasarım aşamasında doğru bir yaklaşımın uygulandığını hem de bütün deneyler boyunca üst yapının hasar miktarının yalıtımlı binalarda hedeflenen elastik sınırlar içerisinde kaldığını ispatlamıştır. Birinci ve ikinci karma yalıtım sistemleri, deprem hareketi altında elde edilen transfer fonksiyonları karşılaştırıldığında birbirine çok yakın değerler vermiştir.



Şekil 12. Deneylerden elde edilen üstyapı titreşim frekansları

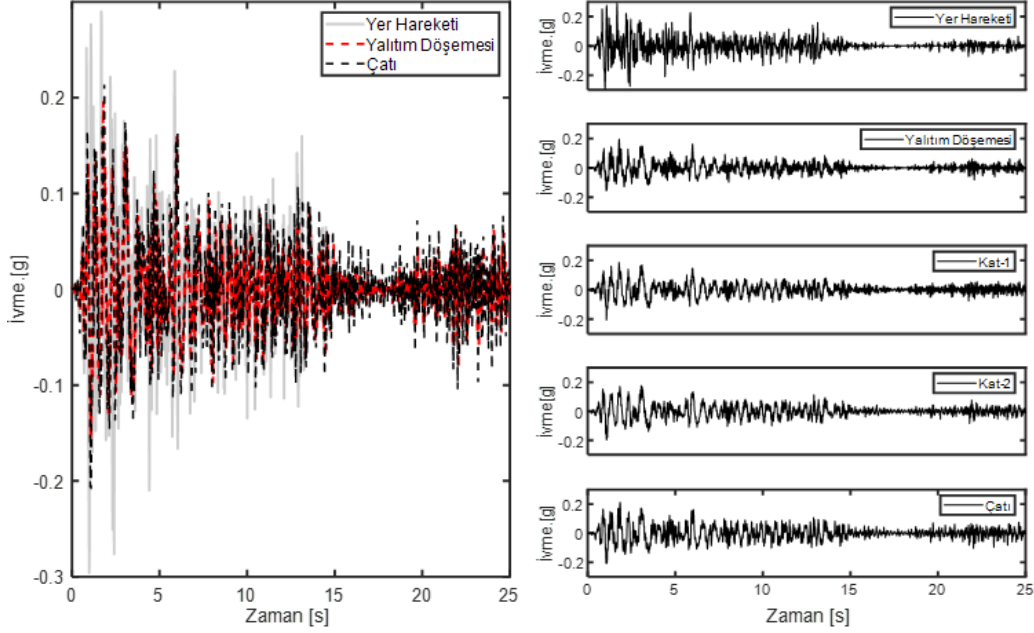
Deprem yalıtım sistemlerinin kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, yalıtım döşemesinden çatı katına kadar olan her kat seviyesinde elde edilen ivmelerinin zaman tanım alanında değişimi incelenmiştir. Karma Yalıtım Sistemi (KYS)-I için 100% deprem kaydının etkilenmesi ile elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme değişimi ve kat ivmeleri sırası ile Şekil 13-14’te verilmiştir. Elde edilen kuvvet-deformasyon ilişkisi, ulaşılan yerdeğiştirme sınırlarında, değişen anlık rijitlik değerlerine göre visko-elastike yakın bir davranış göstermiştir. KYS-I sistemi için yer hareketinin ve deprem yalıtımı uygulanmış yapının her seviyesinde alınan kat ivmeleri Şekil 14’te gösterilmektedir.



Şekil 13. KYS-I Kuvvet-yerdeğiştirme çevrimi

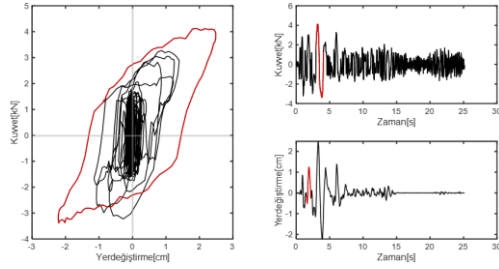
Deprem yer hareketinin en büyük ivme değeri 0.296g olarak kaydedilirken, çatı katında kaydedilen en büyük kat ivmesi Şekil 14'te

0.213g seviyesinde kalmış ve geleneksel yöntemlere göre inşa edilecek yapılara göre kayda değer bir azalış sağlanmıştır.



Şekil 14. KYS-I kat ivmelerinin değişimi

Benzer şekilde KYS-II için 100% deprem kaydının etkilmesi durumunda zaman tanım alanında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri ve kat seviyesinde ölçülen ivmeler sırası ile Şekil 15-16'da verilmiştir.

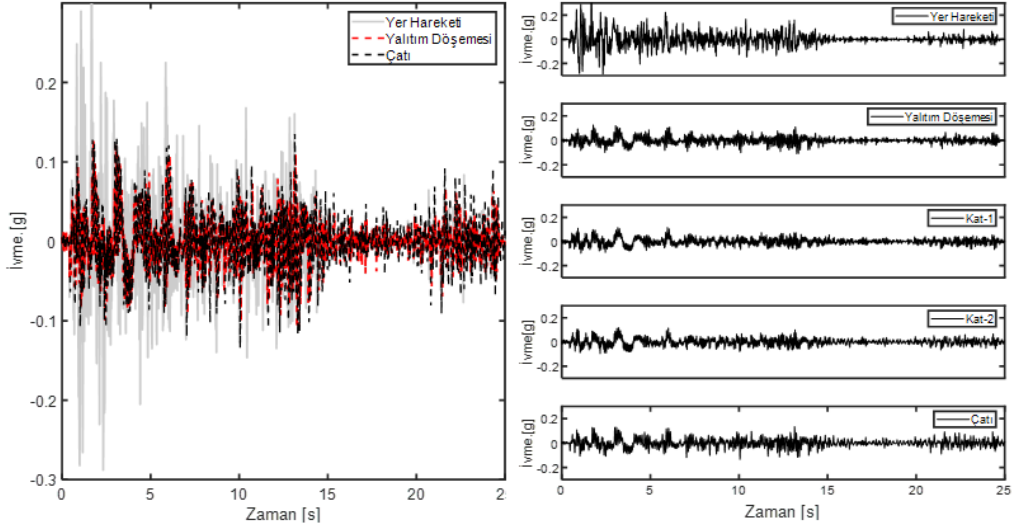


Şekil 15. KYS-II Kuvvet-yer değiştirme çevrimi

Deprem kaydı girdisi ise Şekil 16'da gösterildiği gibi çatı katında 0.135g seviyesine düşerken KYS-II sistemi daha düşük kayma modülüne sahip elastomer birimlerden oluştuğu için kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri daha yüksek

yerdeğiştirme değerlerine ulaşıp, taban kesme kuvvetinin daha etkin bir şekilde azalmasına neden olmuştur. Deney verilerine göre ikinci sistem KYS-I'e göre %43'ten daha fazla azalış sağlamıştır. Kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri, ulaşılan yerdeğiştirme genliklerinde idealize edilen çift eğrili elasto-plastik çevrimlere benzer davranış göstermektedir.

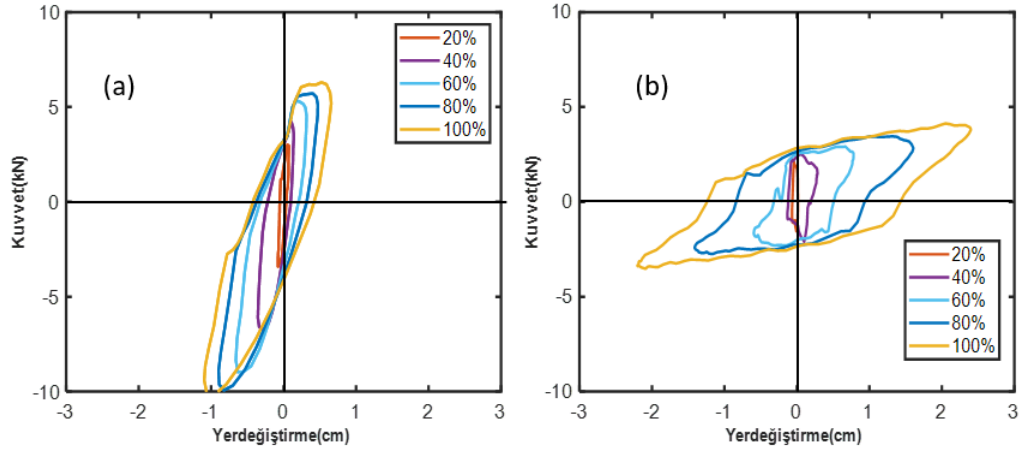
Sarsma masasında kullanılan deprem kaydı %20 genlik seviyesinden başlayarak zaman tanım alanında yapılan artımsal dinamik analiz uygulamasına benzer şekilde deneyde kullanılacak deprem kaydının ölçeklendirme katsayısının doğrusal ve kademeli olarak %100 seviyesine kadar artırılarak iki farklı karma yalıtım sisteminin aynı deprem seviyelerinde kıyaslanmasına olanak sağlanmıştır.



Şekil 16. KYS-II Kat ivmelerinin değişimi

KYS-I ve KYS-II'nin çevrimsel dinamik davranışı Şekil 17'de verilmiştir. KYS-I için taban kesme kuvvetinin yaklaşık olarak 10 kN seviyesindeyken, KYS-II sistemi için taban kesme

kuvveti 4.1 kN seviyesinde kalması ikinci deprem yalıtım sisteminden elde edilen önemli kazanımlardan bir tanesidir.



Şekil 17. (a) KYS-I dinamik çevrim kıyaslaması (b) KYS-II dinamik çevrim kıyaslaması

4. Tartışma ve Sonuç

Deprem yalıtım sistemlerinin genel davranışının anlaşılması ve ihtiyaç duyulan güvenilirlik ve doğrulama çalışmaları deneysel deprem mühendisliğinde önemli bir rol üstlenmektedir. Farklı tip yalıtım birimlerinden oluşan karma yalıtım sistemlerinin pratikte kullanımının

getireceği ekonomik katkı yanında yüksek performans hedeflerine bağlı istenen performans artım ölçütleri, karma yalıtım teknolojisinin uygulandığı her iki sistem için sağlanmıştır. Diğer bir deyişle, yalıtımlı bina tasarımında öngörüldüğü şekilde üst yapının görece kat ötelemeleri elastik sınırlarda başarı ile tutulmuştur.

Sarsma masası deneyinde kademeli olarak artırılan deprem kaydının yalıtım sistemlerinin kuvvet-yerdeğiştirme çevrimlerinde ortaya çıkan farklılıklar ve üst yapı davranışı her bir deney kademesi için detaylı olarak yazar tarafından incelenmiştir. Yüksek sönümlü elastomer yalıtım birimlerinden daha düşük kayma modülüne sahip olan ve KYS-II olarak adlandırılan düzenekte taban kesme kuvvetleri birinci sisteme göre yanal rijitlik farklılıklarına bağlı olarak daha etkin bir azalım sağlamıştır. Bu çalışmada yürütülen deney programının detayları ve işlenen deney verileri doğrultusunda karma yalıtım sistemlerinin etkinliğine dair bulgular okuyucu ile paylaşılmıştır.

Yürütülen deneysel çalışma kapsamında kullanılan sarsma masasının özelliklerinden

dolayı, deprem kayıtları sadece tek bir yönde ve belirli sınırlamalara tabi olarak verilebilmiştir. Bu yüzden elde edilen deneysel verilerin, ilerleyen çalışma safhalarında sayısal model doğrulamasının basitleştirilmiş modeller ve her bir cihazın ayrı ayrı incelendiği üç boyutlu karmaşık modellerle kıyaslanması, öngörülen deprem seviyesinin ötesinde deprem kayıtlarının her iki yatay yönde uygulanması, deprem tehlike çalışmalarında önerilmesi durumunda ise deprem kayıtlarının düzey bileşenin birlikte etkililmesinin yaratacağı etkilerin araştırılması gerekmektedir. İlerleyen süreçte yapılması planlanan yukarıda sıralanmış çalışmalar, pratikte yürütülebilecek optimizasyon çalışmaları için önemli kaynaklardan biri olabilecektir.

Teşekkür

Çalışmanın dinamik karakterizasyon çalışmaları yazarın yürütücüsü olduğu Bahçeşehir Üniversitesi tarafından desteklenen BAP 2020.01.06 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar değerli görüşleri ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Eren Uçkan'a, Dr. Yavuz Kaya'ya, testin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği çalışanlarına, yalıtım cihazlarının tedarikini sağlayan FIP Industrial firmasına, FIP Industrial firmasının Türkiye temsilcisi Yüksek Mühendis Mircan Kaya'ya, FIP Industrial İtalya kıdemli teknik ofis mühendislerinden ve araştırmacılarından olan Dr. Gabriella Castellano'ya ve makalenin kalitesinin yükseltilmesinde değerli yorumlarını paylaşan anonim hakemlere teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Hancılar, U., Tuzun, C., Yenidogan, C., and Erdik, M. 2010. ELER software - a new tool for urban earthquake loss assessment, *Natural Hazards Earth System. Sci.*, 10, 2677-2696, doi: 10.5194/nhess-10-2677-2010
- [2] Erdik, M., Sesetyan, K., Demircioglu, M.B., Hancılar, U., Zulfikar, C., Durukal, E., Kamer, Y., Yenidogan, C., Tuzun, C., Cagnan, Z., Harmandar, E. 2010. Rapid Earthquake Hazard and Loss Assessment for Euro-Mediterranean Region, *Acta Geophysica*, vol.58, no.5, pp: 855 -892
- [3] Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model Hazus MHR4 Technical Manual, Department of Homeland Security Emergency Preparedness and Response Directorate FEMA Mitigation Division, 2003.
- [4] Di Sarno, L., Yenidogan, C., Erdik, M. 2013. Field evidence and numerical investigation of the Mw = 7.1 October 23 Van, Tabanlı and the MW > 5.7 November earthquakes of 2011, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11:313-346. DOI: 10.1007/s10518-012-9417-0
- [5] Kani N. Current 2009. State of Seismic Isolation Design, *Journal of Disaster Research*; 4(4):175-181.
- [6] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TC İçişleri Bakanlığı AFAD Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Resmi Gazete No.: 30364, 2018
- [7] Yenidogan, C., Yokoyama, R., Nagae, T., Tahara, K., Tosauchi, Y., Kajiwara, K., Ghannoum, W. 2018. Shake table test of a full-scale four-story reinforced concrete structure and numerical representation of overall response with modified IMK model, *Springer, Bulletin of Earthquake Engineering*, Cilt 16 s. 2087-2118. DOI: 10.1007/s10518-017-0261-0
- [8] Nagae, T., Uwadan, S., Yenidogan, C., Yamada, S., Kashiwa, H., Hayashi, K., Takahashi, T., Inoue, T., 2021. The 2019 full-scale shake table test program of wood dwellings, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, September 27 to October 2, Paper No. C002274.
- [9] Yenidogan, C., Takahashi, T., Nagae, T., Inoue, T. 2021. Seismic Performance Evaluation of a Base Isolated P&B Structure Through Full-Scale Shake Table Tests, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, September 27 to October 2, Paper No. C002274.
- [10] Yenidogan, C., Nishi, R., Nagae, T., Koichi Kajiwara, 2020. Full-scale cyclic test of a Japanese post and beam wood shearwall assembly, *Bull Earthquake Eng Cilt 18*, 4985-5008.
- [11] Yenidogan C., Nishi, R., Uwadan, S., Nagae, T., Isoda, H., Tsuchimoto, T., Inoue, T., Kajiwara, K. 2021. Full-scale shake table tests of P&B type of Japanese three-story wood dwellings for the collapse characterization, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 150, 1-22. DOI: 10.1016/j.soildyn.2021.106898

- [12] Aydin E.R., Ozturk B., Kilinc O.F. Seismic Response of Low-Rise Base Isolated Structures. In 15th World Conference on Earthquake Engineering, Portugal 2012 Vol. 24, pp. 19493-19502
- [13] Kelly J.M. 1997. Earthquake-Resistant Design with Rubber. Springer-Verlag London Limited, 243s.
- [14] Naiem, F. and J.M. Kelly, 1999. Design of Seismic Isolated Structures. Wiley; HAR/CDR Edition John Wiley & Sons, New York, 304s.
- [15] Skinner, R.I., W.H. Robinson, and G.H. McVerry, 1993. An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, New York, 354s.
- [16] Xuan, D., Pavel, C., Wang, S.J., Medel, R.A., Smirnov, V., Yenidogan, C., Furni, M., Aiken, I. 2016. Recent Information on Seismically Isolated Buildings in the World, Journal of Japanese Society of Seismic Isolation "MENSIN", May, 2016.
- [17] Yenidogan, C., Erdik, M. 2014. The State of Art in Seismic Isolation and Energy Dissipation Applications in Turkey, The Japan Society of Seismic Isolation, Menshin Cilt 83, 49-59, 2014-02.
- [18] Yenidogan, C. 2021. Earthquake-Resilient Design of Seismically Isolated Buildings: A Review of Technology, Vibration, Cilt 4, no. 3, s. 602-647. DOI: 10.3390/vibration4030035
- [19] Türkiye Sağlık Bakanlığı, Deprem Yalıtımlı olarak İnşa Edilecek Yapılara Ait Proje ve Yapım İşlerinde Uyulması Gereken Asgari Standartlar, 2013.
- [20] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete No.: 26454, 2007
- [21] CSI SAP2000V22. Analysis Reference Manual. CSI: Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc. 2020.
- [22] Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. 2006 Jul 19;264.
- [23] Basu, B., Bursi, O. S., Casciati, F., Casciati, S., Del Grosso, A. E., Domaneschi, M., Faravelli, L., Holnicki-Szulc, J., Irschik, H., Krommer, M., Lepidi, M., Martelli, A., Ozturk, B., Pozo, F., Pujol, G., Rakicevic, Z. and Rodellar, J. (2014). A European Association for the Control of Structures joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe, Struct. Control Health Monit., 21:1414–1436. DOI:10.1002/stc.1652
- [24] Yenidogan, C and Mustafa E. 2016. A comparative evaluation of design provisions for seismically isolated buildings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Cilt 90, s. 265-286. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.08.016
- [25] Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356, 2000, Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. pp. 100-400.
- [26] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7 16, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [27] CEN, Eurocode 8: design of structures for earthquake Resistance—Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1:2004. Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [28] Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Notification No. 2009–2000, Technical Standard for Structural Specifications and Calculation of Seismically Isolated Buildings. (in Japanese). 2000.
- [29] Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., and Wolff, E.D. 1999. Property modification factors for seismic isolation bearings. Report MCEER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York.
- [30] Tsopelas, P.C., Constantinou, M.C. and Reinhorn, A.M., 1994. 3D-BASIS-ME: Computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically isolated single and multiple structures and liquid storage tanks.