

SEISMIC ISOLATION IN EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURAL DESIGN FOR RESILIENT CITIES

Cenk ALHAN-Mert HACIEMİROĞLU

ABSTRACT

The problems experienced by the society after the latest $M_w=7.8$ Pazarcık and $M_w=7.5$ Elbistan Earthquakes, which last happened in Kahramanmaraş on February 6, 2023 in Türkiye painfully demonstrated the importance of creating resilient cities that can continue daily life by recovering rapidly in the face of natural disasters. Although the survival of buildings after such major earthquakes is essential in terms of life safety, it has been clearly seen that this is not enough for a resilient city, that public buildings and even industrial facilities must continue their functions uninterrupted, and that the damage to the residences must remain limited and or repairable. It is possible to provide this earthquake performance in buildings with seismic isolation technology. Seismic isolation systems, in which floor accelerations and effective earthquake forces are reduced thanks to the extended period of the building and some of the earthquake energy damped at the isolation level, can protect both the contents and the building itself from the harmful effects of the earthquake. The most striking example of this is that the seismically isolated hospital buildings in the region affected by the 6 February 2023 earthquakes, in which more than 50,000 people lost their lives and immediate occupancy became impossible for more than 300,000 buildings, survived the earthquake without any damage. In this study, the definition of seismic isolation is made, seismic isolation applications are explained, and the modeling of a sample seismically isolated building and its behavior under near-fault and vertical earthquake effects are discussed.

Keywords: Earthquake-Resistant Structure, Seismic Isolation, Damper, Near-Fault Effect, Vertical Earthquake Effect

Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Mail: cenkalan@iuc.edu.tr

 ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-6649-8409>

Doktora Öğrencisi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa ve SISDEC Mühendislik Kurucu Ortağı

Mail: mert.haciemiroglu@ogr.iuc.edu.tr

 ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0767-9469>

Makale Atıf Bilgisi: | Alhan, C. ve Haciemiroğlu, M. (2023). "Dirençli Şehirler İçin Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*. Yıl: 2. Sayı: 4. ss. (96-127)

Makale Türü: Araştırma
Geliş Tarihi: 13.06.2023
Kabul Tarihi: 25.07.2023
Yayın Tarihi: 31.07.2023
Yayın Sezonu: Temmuz 2023

DİRENÇLİ ŞEHİRLER İÇİN DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMINDA SİSMİK İZOLASYON

Cenk ALHAN-Mert HACİEMİROĞLU

ÖZ

Türkiye’de, 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş’ta yaşanan son $M_w=7.8$ Pazarcık ve $M_w=7.5$ Elbistan Depremleri sonrasında toplumun yaşadığı sıkıntılar, doğal afetler karşısında hızla toparlanarak günlük yaşantıya hızlı bir şekilde geri dönebilecek dirençli şehirler oluşturmanın önemini bir kez daha acı bir şekilde ortaya koymuştur. Bu tür büyük depremler sonrasında yapıların ayakta kalabilmesi can güvenliği açısından şart olmakla birlikte, dirençli bir şehir için bunun yeterli olmadığı, kamu binalarının ve hatta endüstriyel tesislerin işlevlerine kesintisiz bir şekilde devam etmesi gerektiği, konutlardaki hasarın da sınırlı ve onarılabilir seviyede kalması gerektiği açıkça görülmüştür. Yapılarda bu deprem performansını sismik izolasyon teknolojisi ile sağlamak mümkündür. Yapının uzayan periyodu sayesinde kat ivmelerinin ve etkin deprem kuvvetlerinin azaltıldığı, deprem enerjisinin bir kısmının da izolasyon seviyesinde sönmüldüğü sismik izolasyon sistemleri hem içindekileri hem de yapının kendisini depremin zararlı etkilerinden koruyabilmektedir. 50,000’den fazla kişinin hayatını kaybettiği ve 300,000’den fazla binanın hemen kullanılamaz hale geldiği 6 Şubat 2023 depremlerinden etkilenen bölgede bulunan sismik izolasyonlu hastane yapılarının depremi hiç hasar almadan atlattığı olması bunun en çarpıcı örneği olmuştur. Bu çalışmada, sismik izolasyonun tanımı yapılarak sismik izolasyon uygulamaları anlatılmış, sismik izolasyonlu bina tasarımına ilişkin ana adımlar ortaya konarak örnek bir sismik izolasyonlu bina modellenmesine ve tasarımına yer verilmiş ve oluşturulan model kullanılarak yakın-fay ve düşey deprem etkileri tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Depreme Dayanıklı Yapı, Sismik İzolasyon, Sönümleyici, Yakın-fay Etkisi, Düşey Deprem Etkisi

Giriş

Dirençli yerleşim, karşılaştığı doğal afetler ve krizler karşısında direnç gösterebilen ve bu sayede günlük yaşantısına kesintisiz devam edebilen yerleşim olarak tanımlanabilir (Aydın, 2022). Sürdürülebilir bir kalkınmanın sağlanabilmesi, ancak afetlere karşı kırılğan olmayan dirençli şehirlerin oluşturulması ile mümkündür (Erdoğan vd., 2022). Yapı malzemesinin üretimi ve taşınması, yapımında kullanılan hammadde ve enerji ile tüm bu aşamalarda ve özellikle yıkıma bağılı olarak ortaya çıkan atıkların oluşturduğu olumsuz çevresel etkiler (Esin, Coşgun ve Aydın, 2013) dikkate alındığında, yapıların ekonomik ömrünü tamamlamadan bir deprem nedeniyle kullanılmaz hale gelmesi her bakımdan istenmeyen bir neticedir. Tüm bu olumsuzlukların yaşanmaması, sürdürülebilir ve doğal afetlerin en büyüğü olarak nitelendirilebilecek depremler karşısında dirençli şehirlerin oluşturulması ancak depreme dayanıklı yapıların tasarlanması ve inşa edilmesi ile mümkündür.

Diğer taraftan, bir yapının depreme dayanıklı olarak tasarlanmış olması, o yapının depremde hemen hemen hiç hasar görmeyeceği veya deprem sonrasında işlevini kesintisiz olarak yerine getirebileceğini garanti etmez. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre de yeni yapılacak ve kullanım amacı konut olan klasik taban-ankastre binalar (yüksek binalar hariç) için, tasarım deprem yer hareketi düzeyinde (DD-2) normal performans hedefi "*Kontrollü Hasar*" yani "*can güvenliğini sağlamak üzere bina taşıyıcı sistem elemanlarında çok ağır olmayan ve çoğunlukla onarılması mümkün olan hasar düzeyi*" dir. Zaten klasik depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesi kapsamında deprem enerjisinin bir kısmı, yapısal elemanlarda ortaya çıkan hasarlar vasıtasıyla tüketilmektedir. Ancak, yaşanan depremlerden sonra ortaya çıkan manzara göstermiştir ki, bu tasarım yaklaşımı ile can güvenliği sağlanabilse dahi şehirlerin hızlıca toparlanması ve günlük yaşamın kesintisiz devam etmesi mümkün olamamaktadır. Bu durumda, dirençli şehirlerin oluşturulmasında daha yüksek deprem performansı sağlayabilen alternatif depreme dayanıklı yapı tasarımı yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu yöntemlerin başında hem dünyada hem de Türkiye'de giderek popülerlik kazanan sismik izolasyon gelmektedir.

Sismik izolasyon, yatayda esnek, düşeyde ise rijit mesnetlerin genellikle üstyapı ile temel arasına yerleştirilmek suretiyle yapı hakim periyodunun uzatıldığı, böylece depremin hakim periyodundan uzaklaştırılmak suretiyle spektral ivmelerin azaltıldığı ve üstyapının tıpkı rijit bir kutu gibi izolasyon sistemi üzerinde hareket etmesinin sağlandığı bir deprem koruma yöntemidir (Skinner, Robinson ve McVerry, 1993; Naeim ve Kelly, 1999; Chen, Jiang ve Lou, 2008). Sismik izolasyon uygulaması neticesinde bir taraftan azaltılan görelî kat ötelemeleri sayesinde üstyapının bütünlüğü dolayısıyla yapısal ve yapısal olmayan elemanlar, bir taraftan da azaltılan kat ivmeleri sayesinde yapı içeriği depremin zararlı etkilerinden korunmaktadır (Komodromos, 2000).

TBDY'ye (2018) göre, yeni yapılacak sismik izolasyonlu ve kullanım amacı konut olan bir bina için, tasarım deprem yer hareketi düzeyinde (DD-2) normal performans hedefi "*Sınırlı Hasar*" yani "*bina taşıyıcı sistem elemanlarında sınırlı düzeyde hasarın meydana geldiği, diğer deyişle doğrusal olmayan davranışın sınırlı kaldığı hasar düzeyi*"dir. Hatta, kullanım amacı hastane, okul, yurt, vb. sismik izolasyonlu binalar için tasarım deprem yer hareketi düzeyinde (DD-2) "*Kesintisiz Kullanım*" yani "*bina taşıyıcı sistem elemanlarında yapısal hasarın meydana gelmediği veya hasarın ihmal edilebilir ölçüde kaldığı durum*" hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, sismik izolasyonunun tanımı yapılarak sismik izolasyon uygulamaları anlatılmış, sismik izolasyonlu bina tasarımına ilişkin ana adımlar ortaya konarak örnek bir sismik izolasyonlu bina modellenmesine ve tasarımına yer verilmiş, oluşturulan model kullanılarak yakın-fay ve düşey deprem etkileri tartışılmıştır.

1. Sismik İzolasyon Felsefesi ve Literatür

Bir sismik izolasyon sisteminde bulunması gereken ana öğeler şu şekilde sıralanabilir: (1) Yatayda esnek izolatörler sayesinde yapı periyodunun uzaması. (2) Sönümleme özelliğine sahip izolatörler veya kullanılacak ek sönümleyiciler sayesinde hem izolasyon sistemi deplasmanlarının makul seviyelerde tutulması hem de yapıya aktarılan deprem enerjisinin izolasyon sistemi seviyesinde soğurulması. (3) Küçük depremlerde ve rüzgar yükleri altında izolasyon sisteminin sık sık hareket etmesine engel olacak şekilde ilk yatay rijitliği yüksek ancak belirli bir deplasman aşıldığında rijitliği birkaç kat azalan izolatörlerin kullanılması. (4) Kalıcı yerdeğiştirmelerin önlenmesi için geri merkezleme özelliği. (5) Yüksek düşey yüklerin güvenle taşınabilmesi için yüksek düşey rijitliğe sahip izolatörlerin kullanılması. (6) Büyük yatay yerdeğiştirmelere karşın izolatörlerde kararlılığın (stabilitenin) sağlanması. Sismik izolasyonun en büyük avantajı hem yapının kendisini hem de içindekileri ve yapısal olmayan duvar ve cephe elemanlarını depremin zararlı etkilerinden aynı anda korumasıdır. Bunu, uzayan hakim periyot ve artan sönüm sayesinde azalan kat ivmeleri ve değişen rijit-cisim benzeri birinci mod davranışı sayesinde azalan görelî kat ötelemeleri sağlar. Yapının deprem sonrasında, hatta sırasında, kesintisiz kullanımına imkan sağlayan sismik izolasyon sayesinde üst yapının yüksek sünük olarak detaylandırılmasına ihtiyaç kalmaz. Mevcut yapıların depreme karşı güçlendirilmesine de olanak sağlar. Ancak bir yapının sismik izolasyonlu olarak tasarlanabilmesi için zemin koşullarının uygun olması yani uzun periyotlu yer hareketlerini büyüten yumuşak zeminde bulunmaması, yeterince ağır olması, çok narin olmaması ve çevresinin serbestçe hareket etmesine imkan sağlaması gerekmektedir (Mayes ve Naeim, 2001).

En çok kullanılan sismik izolatör tipleri kauçuk (elastomer) ve eğri yüzeyli sürtünmeli izolatörlerdir. Kauçuk ve ince çelik plaka katmanlarından oluşan kauçuk izolatörler üç ana tipte karşımıza çıkmaktadır: *Doğal Kauçuk İzolatörler* %2-%4 mertebesinde sönüm sağlarken *Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörler* merkezine yerleştirilen ve izolatör çapının yaklaşık 1/3'ü ile 1/6'sı arasında değişen bir çapa sahip olan kurşun çekirdek sayesinde %30'a varan sönüm sağlayabilmektedir. Sağlanan sönüm miktarı, kurşunun çapı ve dinamik akma dayanımının yanı sıra yatay deplasman seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Son olarak, *Yüksek Sönümlü Kauçuk İzolatörlerde* kurşun çekirdek bulunmaz; eklenen reçine, vb. maddeler sayesinde %12 civarı sönüm sağlanabilir (Whittaker vd. 2018). Çevresel etkilere dayanıklı malzemeden üretilen, geometrik özellikleri, yerçekimi ivmesini ve sarkaç hareketini kullanarak sismik izolasyon sağlayan Eğri Yüzeyli Sürtünmeli (Sürtünmeli Sarkaç) İzolatör tipi (Şekil 1) Zayas vd. (1990) tarafından geliştirilmiş ve yapılan deneylerle bu izolatörlerin başarısı ortaya konmuştur. Fay hattına çok yakın bölgelerde ortaya çıkan büyük izolatör yerdeğiştirme taleplerini makul sınırlara çekebilmek için bazen izolasyon sisteminde ek sönümleyici kullanma ihtiyacı doğmaktadır. Bu tür durumlarda sönüm oranı %30'ların çok üzerine çıkabilmektedir.



Şekil 1. Sismik izolasyon sisteminde ek sönümleyici kullanılması
(Fotoğraf: Maurer Söhne)

Sismik izolasyon konsepti 100 yıldan daha uzun bir süre önce ortaya çıkmış olmakla birlikte önemli araştırma çalışmaları 1970'lere uzanmaktadır: Kauçuk izolatörlerin yapıların depreme karşı korunmasındaki uygunluğunu belirlemek amacıyla Eidinger ve Kelly (1978) tarafından gerçekleştirilen ve tam ölçekli sismik izolasyonlu yapıların kullanıldığı deneyde inceleme konusu yapıların 1940 El Centro, 1950 Taft, 1966 Parkfield ve 1971 Pacoima Dam deprem kayıtları altındaki davranışları, kauçuk izolatörlerin büyük deformasyon altındaki kararlılıkları ve izolasyon sistemine büyük sönüm eklemenin etkileri

araştırılmış ve taban devrilme momentinin izolatörsüz duruma göre 1/10 oranında azaltıldığı ortaya konmuştur. Sismik izolasyonlu binaların, köprülerin ve nükleer güç santrallerinin tasarımına yönelik kurallara ait ilk dönem bilgileri Blakeley vd. (1979) makalesinde yer almaktadır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin deneysel performansları, Yeni Zelanda'da gerçekleşen ve bir bina ile üç köprüdeki ilk kullanımları ve kurşun çekirdeğin tasarımına yönelik kurallar Robinson (1982) tarafından ortaya konmuştur. Sismik izolasyonun 1990'ların başına kadarki dönemi kapsayan tarihçesi, dünya çapındaki ilk dönem uygulamaları ve bazı sismik izolasyonlu yapıların gerçek depremler altındaki davranışları Buckle ve Mayes (1990) tarafından özetlenmiştir.

Sismik izolasyonla ilgili yakın dönem araştırma çalışmaları son 20 yılda gerçekleştirilen çalışmalar olarak ele alınabilir: Alhan ve Gavin (2004), doğrusal ve doğrusal olmayan sismik izolasyon sistem parametrelerini değerlendirdikleri çalışmada L şeklinde bir plana sahip sismik izolasyonlu prototip bir bina modelini örnek olarak incelemiştir. Lin (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Taiwan sismik izolasyon yönetmeliğinde de yer alan ve %5'den fazla sönüm oranına sahip sismik izolasyon sistemlerindeki yüksek sönümün etkisini izolasyon sistemi deplasmanı hesabına azaltıcı yönde yansıtan sönüm ölçekleme faktörünün doğruluğu 1999 Chi-Chi Depremi'nden elde edilen 338 deprem kaydı kullanılarak kontrol edilmiştir. Sonuçta, sönüm ölçekleme faktörünün yüksek olduğu belirlenmiştir. Sismik izolasyonlu yapılar için yapı-zemin etkileşimi nümerik olarak Luco (2014) tarafından incelenmiştir. Kumar vd. (2015), Buffalo Üniversitesi'nde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda kauçuk izolatörlerin çekme altındaki davranışını incelemişler, bu tür izolatörlerde büyük deprem kuvvetleri altında ortaya çıkabilecek çekmenin kavtasyon problemine yol açacağını belirleyerek çekme altındaki kauçuk izolatör davranışı için nümerik bir model geliştirilmişlerdir. Yuvarlanan/top (rolling-type) izolatörler yüz yıllık bir geçmişe sahip olmasına rağmen ancak son dönemde popülerlik kazanmaya başlamıştır. Bu izolatörlerin tarihi gelişimi ve geleceğine yönelik değerlendirmeler Harvey ve Kelly (2016) tarafından ortaya konmuştur. Losanno vd. (2019), uygulamada yer alan mühendislerin sismik izolasyon tasarımını daha pratik şekilde uygulayabilmesi için Eurocode kurallarına dayalı tasarım tabloları geliştirmişler ve bu tablolar kullanılarak gerçekleştirilen örnek bir tasarım ortaya koymuşlardır. Bir başka benzer odaklı çalışmada (Furinghetti, 2022), en çok kullanılan kauçuk ve eğri yüzeyli sürtünmeli izolatörlerle öntasarım için basit ve hızlı tasarım yaklaşımları geliştirilmiş ve bir örnek çalışma ile basit tasarım sonuçları tam 3-boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılan tasarımla karşılaştırılmıştır. Kanbir vd. (2020), üstyapı modelleme yaklaşımının kurşun çekirdek ısınmasına maruz kalan kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlere sahip binaların davranışının gerçeğe en yakın biçimde belirlenmesindeki rolünü göstermişlerdir. Murota

vd. (2021), Türkiye’de yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerin konut türü yapılarda kullanımını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sürtünmeli izolatörlerin kullanıldığı sismik izolasyon sistemlerinin tarihi gelişimi Zhang ve Ali (2021) tarafından sunulmuştur. Farajian vd. (2022) sismik izolasyonlu sıvı depolama tanklarının yakın-fay depremlerine karşı kırılabilirliğini incelemişlerdir. Öncü-Davas vd. (2022), doğrusal olmayan sismik izolasyon sistemlerine sahip binaların optimizasyonuna üstyapı esnekliğinin etkisini değerlendirmişlerdir. Micozzi vd. (2022) yüksek sönümlü kauçuk izolatörlere sahip yapısal sistemlerin tasarımında izolasyon periyodu, üstyapı dayanım fazlalığı, vb tasarım kararlarının sismik izolasyon sistemlerinin deprem güvenilirliğini nasıl etkilediğini göstermişlerdir.

2. Sismik İzolasyon Uygulamaları

Sismik izolasyonlu binaların en çok bulunduğu ülke Japonya iken, bunu Çin, Rusya ve İtalya izlemekte olup dünyadaki sismik izolasyonlu yapılar, büyük depremlere maruz kalanları dahil, iyi deprem performansı sergilemişlerdir (Martelli vd., 2014). Sismik izolasyonun en çok uygulama bulunduğu yapılar ise hastane binalarıdır. T.C. Sağlık Bakanlığı’nın 2013’te yayınlanan ve 2018’de güncellenen genelgesi doğrultusunda Türkiye’de deprem bölgelerinde bulunan belirli yatak kapasitesine sahip hastanelerin sismik izolasyonlu olarak tasarlanması ve inşa edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda son 10 yılda Türkiye’de çok sayıda sismik izolasyonlu hastane binası inşa edilmiş olup dünyanın en büyük sismik izolasyonlu 10 binası içerisinde Türkiye’den Adana Şehir Hastanesi (Şekil 2), Isparta Şehir Hastanesi ve İstanbul Çam ve Sakura Şehir Hastanesi de (Şekil 3) yer almaktadır (ENR, 2023). Adana Şehir Hastanesi Ülker Mühendislik tarafından tasarlanmış olup 1512 adet sismik izolatöre sahiptir (Şekil 2). Isparta Şehir Hastanesi 903 adet sürtünmeli izolatöre sahip olup yapısal tasarımı Probi İnşaat tarafından gerçekleştirilmiştir. Dünyanın en büyük sismik izolasyonlu hastane binası ise, 2020 yılında inşa edilen ve Başakşehir, İstanbul’da bulunan Çam ve Sakura Şehir Hastanesi (Şekil 3) olup toplam 2068 adet izolatör kullanılmıştır (Arup, 2023). İstanbul Üniversitesi Hasdal Yerleşkesi’nde bulunan 7 adet toplam 1768 yatak kapasiteli hastane binası Sigma Mühendislik tarafından sürtünmeli sarkaç (eğri yüzeyli) sismik izolatörler kullanılarak olarak projelendirilmiştir. İnşaatı halen devam etmekte olan projeye ait fotoğraflar Şekil 4’te sunulmuştur.



Şekil 2. Sismik izolasyonlu Adana Şehir Hastanesi (Fotoğraf: Rönesans Holding)



Şekil 3. İstanbul Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi (Fotoğraf: Rönesans Holding)



Şekil 4. İstanbul Üniversitesi Hasdal Yerleşkesi, sismik izolasyonlu hastane binaları ve sürtülmeli sarkaç izolatörler (Fotoğraf: Ekşioğlu Karel Adi Ortaklığı)

Köprü türü yapılarda da sismik izolasyon yaygın olarak ve başarıyla uygulanmaktadır. Dolce (2001), Avrupa'daki bazı önemli köprü ve viyadüklerdeki sismik izolasyon uygulamalarını özetlemiştir. Bu köprülerden önemli bir tanesi Portekiz'de Tagus Nehri üzerinde yer alan eğik kablolu ve ana açıklığı 246 m olan köprüdür. 950 mm çapında, eşdeğer sönüm oranı %10 ve elastisite modülü 0.4 MPa gibi oldukça düşük bir değere sahip olan Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnetlerin kullanıldığı izolasyon sisteminin tasarım deplasmanı 250 mm'dir. İtalya'daki Napoli-Canosa Otoyolu'nun Agrifoglio Viyadüğü de elastoplastik

kayıcı mesnetlerin kullanıldığı bir sismik izolasyon sistemiyle güçlendirilmiştir. 27 Şubat 2010 tarihli Mw=8.8 Şili Depremi 140 saniye sürmüş ve en büyük yer ivmesi Melipilla İstasyonu'nda 0.78g olarak ölçülmüştür. 25 köprü çökmüş ve pek çok üst geçit hasar görmüş olmasına karşın depremden etkilenen bölgede bulunan 12 adet sismik izolasyonlu köprü çok iyi bir deprem performansı sergilemiştir. Sadece Cardinal Silva Henriquez Köprüsü hafif hasar görmüş olmakla birlikte bu hasar, köprü trafiğe açırken rahatlıkla onarılabilmektedir (Sarrazin vd., 2013).

Türkiye'de hastane, havaalanı terminali, köprü ve viyadük türü de dahil olmak üzere 2018 yılına kadar yaklaşık 104 adet sismik izolasyonlu yapı inşa edilmiş olup bu döneme ait detaylı bilgiler Erdik (2017) tarafından ortaya konmuştur. Bir başka çalışmada, Erdik vd. (2018) Türkiye'de gerçekleştirilen iki önemli sismik izolasyonlu projenin detaylarını ortaya koymuşlardır: (1) Toplam 688 kurşun çekirdekli ve 154 kayıcı izolatörün kullanıldığı dünyada sismik izolasyonla güçlendirilen en büyük hastane binası olan İstanbul, Başibüyük Eğitim ve Araştırma Hastanesi. (2) Toplam 1552 adet üç yüzeyli sürtünmeli izolatör kullanılan Adana Şehir Hastanesi. Türkiye'de sismik izolasyonlu yapılara ilişkin 2019-2022 yılları arasındaki gelişmeler ise Sadan (2023) tarafından rapor edilmiş olup bina başına ortalama 415 adet izolatör kullanıldığı, 1915 Çanakkale Köprüsü yaklaşım Viyadükleri'nin sismik izolasyonlu olarak inşa edildiği, İstanbul'da inşa edilen 16 bloklu sismik izolasyonlu konut türü bina kompleksinin bulunduğu, tarihi Nusretiye Saat Kulesi'nin sismik izolatörler üzerine yerleştirildiği ve tarihi Göztepe Tren İstasyonu Binası'nın sismik izolasyon teknolojisiyle güçlendirildiği bilgisine yer verilmiştir.

Türkiye'de giderek artan sismik izolasyon uygulamalarına paralel olarak artan izolatör test laboratuvarı ihtiyacı, Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde kurulan ESQUAKE Sismik İzolatör Test Laboratuvarı (Şekil 5) ile büyük ölçüde giderilmiştir. Laboratuvar Müdürü Prof. Dr. Gökhan Özdemir'in verdiği bilgiye göre, düşeyde 2 bin ton, yatayda 200 ton yükleme kapasitesi olan laboratuvar bu yükleme kapasitesi sayesinde dünyada ilk 5 bağımsız laboratuvar arasındadır. Yataydaki yükleme hızı da oldukça yüksek (1 m/s maksimum hız) olan laboratuvar yurtdışına da hizmet vermektedir (TV-Akşam, 2023).



Şekil 5. Sürtünmeli sarkaç izolatör ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatör deneyi. ESQUAKE Sismik İzolatör Test Laboratuvarı. (Fotoğraf: Prof. Dr. Gökhan Özdemir)

Sismik izolasyonun tipik az-orta katlı betonarme ve çelik binalar ile köprüler dışında çok çeşitli başka tür yapılarda da uygulamaları mevcuttur:

- *Sıvı Metal Soğutmalı Nükleer Reaktörlere* özel sismik izolasyon uygulaması Yoo vd. (2000) tarafından geliştirilmiştir.
- *Ahşap yapılar*, hafif olmaları ve göçmeye gitmeden ileri seviyede inelastik deformasyon yapabilmeleri nedeniyle genellikle iyi bir deprem davranışı sergilediklerinden sismik izolasyon bu yapılarda çok fazla uygulanmamıştır. Ancak, ahşap yapılarda inelastik davranış sonucunda ortaya çıkan hasarların tamirinin zor ve pahalı olması sebebiyle sismik izolasyonun tercih edildiği durumlar da mevcuttur (Symans vd. 2002). Örneğin Montreal, Kanada'da iki katlı bir ahşap çerçeve sisteme sahip ev 15 adet kayıcı mesnedin kullanıldığı bir sismik izolasyon sistemine sahiptir. San Fransisco, ABD'de ise çerçeve sisteme sahip dört katlı bir ahşap bina 1989 Loma Prieta Depremi'nde hasar gördükten sonra kayıcı mesnetler kullanılarak güçlendirilmiştir.
- Heykel, vb. sanat nesnelere ve ileri teknoloji ürünü cihazların korunmasına yönelik olarak *Kat İzolasyon Platformları* geliştirilmiş olup bunların kritik ekipmanın deprem etkilerinden korunmasında güvenilirliği Alhan ve Gavin (2005) tarafından ortaya konmuştur. Bu tür platformlara son dönemden bir örnek, Sorace vd. (2016) tarafından sunulmuştur.
- *Sıvı Depolama Tanklarının* sismik izolasyon yöntemiyle deprem güçlendirmesine yönelik nümerik bir araştırma çalışması Colombo ve Almazan (2017) tarafından gerçekleştirilerek bu sayede göçme olasılığının %90 oranında azaldığını göstermişlerdir.
- *Sismik izolasyonlu Nükleer Güç Santrallerine* ilişkin kapsamlı bir literatür taraması Whittaker vd. (2018) tarafından sunulmuştur. Dördü Fransa'da, ikisi Güney Afrika'da olmak üzere dünyada çalışan toplam 6 adet sismik izolasyonlu nükleer güç santrali olduğu, hepsinin 1970'li yıllarda inşa edilmiş kauçuk izolatörlere sahip olduğu bilgisine yer verilmiştir.
- Sismik izolasyon uygulamasının yaygın yer bulamadığı bir başka yapı tipi *Hafif Çelik Çerçeve yapılarıdır*. Can güvenliğini ciddi şekilde tehdit edecek göçme riski az olmasına karşın düşük-orta seviyede depremlerde bile büyük görece kat ötelemeleri ve inelastik davranışa bağlı hasarlar gözlemlendiğinden sismik izolasyondan faydalanabilecek yapılardır (Jampole vd., 2020).
- Çok yakın zamanda *Çelik Depolama Rafları* için eğri yüzeyli sürtünmeli izolatör prensibine dayanan özel sismik izolasyon sistemleri geliştirilmiş ve raf katlarındaki ivmelerin azaltıldığı nümerik ve deneysel olarak gösterilmiştir (Tagliaferro vd., 2021).

- *Silolar ve endüstriyel tesislerdeki sismik izolasyon uygulamalarının en çarpıcı örnekleri Düzce’de inşa edilen Ferrero Fındık Üretim Tesisleri içerisindeki sismik izolasyonlu silo grubu yapısı (Şekil 6) ve sismik izolasyonlu ana üretim binasıdır (Şekil 7). Silo grubu, ortak bir taban üzerinde, 28.5 m yüksekliğinde 12 adet fındık silosu ve kurşun çekirdekli izolatörler ile viskoz sönümleyicilerden oluşan bir sismik izolasyon sisteminden oluşmakta olup dünya çapında bu türün ilk örneğidir. Ana Üretim Binası ise sürtünmeli sarkaç izolatörlere sahip özel bir yapıdır ve Türkiye’deki sismik izolasyonlu endüstriyel yapıya ilk örnektir. Tasarımı Gahafari Associates LLC tarafından gerçekleştirilen bu yapıların analiz ve tasarım detayları Hacıemiroğlu vd. (2021a, 2021b) tarafından verilmiştir.*



Şekil 6. Sismik izolasyonlu silo grubu yapısı ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatör. Ferrero Fındık Üretim Tesisleri, Düzce, Çilimli (Fotoğraf: Gahafari Associates LLC)



Şekil 7. Sismik izolasyonlu ana üretim binası ve sürtünmeli sarkaç izolatör-viskoz damper.

3. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (2018) Sismik İzolasyon

Sismik izolasyonlu yapıların tasarımına yönelik kurallar önceki Türkiye yönetmeliklerinde yer almayı ilk defa Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) "Bölüm 14-Deprem Etkisi Altında Yalıtımlı Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar" başlığı altında yer almıştır. Ancak, sismik izolasyonlu bir yapının tasarımının gerçekleştirilebilmesi için ileri seviye analizler gerektiren diğer konular ve yönetmeliğin ilgili kısımları da dikkate alınmak zorundadır. Aşağıda, sismik izolasyonlu bir bina tasarımındaki ana aşamalar özetlenmiştir:

1. Zemin Etüdü ve Geoteknik raporun hazırlanması.
2. Sahaya Özel Deprem Tehlikesi Analizlerinin gerçekleştirilmesi (TBDY (2018)-Bölüm 2.4.1).
3. Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması (TBDY (2018)-Bölüm 2.5).
4. Sahaya Özel Zemin Davranışı Analizleri (TBDY (2018)-Bölüm 2.4.2 ve Bölüm 16).
5. Ön yapısal tasarımın yapılması ve gerekiyorsa (ZD veya ZE zemin ve kazıklı temel varsa) Yapı Kazık Zemin etkileşimi analizleri (TBDY (2018)-Bölüm 16.10).
6. Sismik izolatör ve varsa damperlere ilişkin teknik şartname (ana parametreler, test koşulları, vs.) hazırlanması.
7. Ön tasarıma uygun olarak ihalenin gerçekleştirilmesi.
8. Yeterlilik koşulları dikkate alınarak izolatör üreticisinin seçilmesi.
9. İhtiyaca uygun şekilde testleri gerçekleştirebilecek kapasitede bir izolatör test merkezinin seçilmesi. İzolatör test merkezlerinde yoğunluk olduğu durumlarda süre de önem arz etmektedir.
10. Prototip izolatör ve varsa damper üretiminin yapılması.
11. İzolatörlerin ve damperlerin prototip testlerinin gerçekleştirilmesi.
12. Test sonuçlarına göre yapısal tasarımın kontrol edilmesi.

Yine ilk defa TBDY (2018)'de "1.3 Özel Konularda Tasarım Gözetimi ve Kontrolü" başlığı altında "Yönetmeliğin uygulanmasına ilişkin değerlendirme ve tasarım süreçlerinde, özel uzmanlık gerektiren konularda projenin başlangıcından tamamlanmasına kadar ilgili tüm tasarım aşamalarında görev yapacak şekilde, ilgili alanda teorik ve mesleki bilgi ve deneyim sahibi inşaat mühendislerinden tasarım gözetimi ve kontrolü hizmeti" alma zorunluluğu getirilmiştir. TBDY (2018) Bölüm 14'e göre yapılacak sismik izolasyonlu bina tasarımı da tasarım gözetimi ve kontrolü hizmeti alınması zorunlu konulardan bir tanesi olup bu hizmet Tasarım Gözetim Uzmanlık Alanı-5 (TGUA-5) belgesi sahibi kişiler

tarafından yürütölmektedir. TGUA-5, yukarıdaki tüm adımları bir bütöün olarak kontrol eder ve bu süreçlerin yönetmelik kurallarına ve mühendislik ilkelerine uygun olarak gerçekleştirilmesinden sorumludur. Seçilen ve sahaya özel deprem spektrumuna göre ölçeklenen deprem kayıtlarını gözden geçirmek, tasarım kriterleri ve yaklaşımının uygunluğunu değerlendirmek, prototip test programını incelemek ve test sonuçlarını kontrol etmek ve son izolatör parametreleri ile nihai tasarımın uygunluğunu değerlendirmek TGUA-5'in esas görevleri arasındadır. Ayrıca, Sahaya Özel Deprem Tehlikesi Analizlerinin gerçekleştirilmesi, Zaman Tanım Alanında Deprem Yer Hareketlerinin Tanımlanması, Sahaya Özel Zemin Davranışı Analizleri, Yapı Kazık Zemin etkileşimi analizleri için, bu alanlara özel uzmanlığı olan TGUA-1 ve TGUA-2 sahibi kişilerden de hizmet alma zorunluluğu vardır. TBDY (2018) kuralları doğrultusunda tasarımda dikkat edilecek ana hususlar aşığıdaki gibi özetlenebilir:

1. TBDY (2018)'de sadece kauçuk ve eğri yüzeyle sürtünmeli izolatörler yer almaktadır. Diğer çeşit izolatörler kapsam dışındadır. Ayrıca, ek sönümleyici (damper) kullanılması gereken durumlar için yönetmelikte henüz tasarım kuralları bulunmamaktadır.
2. Sismik izolasyonlu binaların performans hedefleri taban ankastre binalardan farklıdır. İzolasyon sistemi, Deprem Tasarım Sınıfı'ndan (DTS) bağımsız olarak Kesintisiz Kullanım (KK) performans hedefi için tasarlanırken, üstyapı DTS=1, 2, 3, 3a, 4, 4a yapılarda Sınırlı Hasar (SH) normal performans hedefi için, DTS=1a, 2a yapılarda ise KK ileri performans hedefi için tasarlanır. Üstyapı için kullanılacak Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) ile görel kat ötelemesi sınırı yine taban ankastre yapılardan farklıdır. KK performans hedefi için $R=1.2$, $D=1.2$ ve h_i =kat yüksekliği olmak üzere görel kat ötelemesi sınırı $=0.005h_i$, SH performans hedefi için $R=1.5$, $D=1.5$ ve görel kat ötelemesi sınırı $=0.010h_i$ olarak dikkate alınır. Altyapı için hesaplarda $R=1$ alınmaktadır.
3. Deprem hareketinin çok büyük kısmı sismik izolasyon sisteminde meydana geleceğinden, izolasyon ara yüzünün altında kalan altyapı ve üstünde kalan üstyapı tasarımında süneklik seviyesi sınırlı olarak dikkate alınabilir.
4. Sismik izolasyonlu bir binada, üstyapının altyapıya olan bağlantısını sağlayan izolatörlerin olabilecek en yüksek güvenliğe sahip olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, izolatörlerin tasarımına esas yerdeğıştirme hesabı, izolasyon sisteminin kararlılık hesabı ve izolatörlere etkiyen yüklerin hesabı, tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu, çok seyrek ve göz önüne alınan en büyük deprem yer hareketi olan DD-1 Deprem Yer Hareketi Düzeyi'nde yapılır. Ayrıca,

izolatörlerin özelliklerinde yaşlanma ve çevresel etkiler, yükleme hızı ve ısınma, üretimdeki değişkenlikler gibi faktörlere bağlı olarak meydana gelebilecek değişkenlikler de dikkate alınarak, olası en büyük yerdeğiştirme talebinin ve kararlılık açısından en olumsuz durum belirlenebilmesi için bu hesaplarda, kauçuk izolatörlerde karakteristik dayanımın (F_Q) ve ikincil (elastik ötesi) rijitliğin (k_2), eğri yüzeyli sürtünmeli izolatörlerde ise etkin sürtünme katsayısının (μ) alt sınır değerleri kullanılır. İzolatörlere etkileyen yüklerin hesabında ise, bu durum için en olumsuz senaryo olan üst limit özellikleri kullanılır.

5. Üstyapının tasarımı ve bu tasarım için kullanılmak üzere üstyapıya etkileyen yatay kuvvetin hesabı, daha düşük bir deprem düzeyi olan, tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek, standart tasarım deprem yer hareketi düzeyinde (DD2) yapılır. İzolatör parametrelerinde meydana gelebilecek değişkenlikleri dikkate alırken, güvenli yönde kalmak üzere üstyapıya etkileyen yatay kuvvetin en büyük değerinin elde edilebilmesi için bu defa izolatörlere ait Madde 4'te bahsi geçen parametrelerin üst sınır değerleri dikkate alınır.
6. Kat ivmelerinin hesabında nominal kat ivmeleri dikkate alınır.
7. Tasarım yaklaşımı sonucu olarak sismik izolasyonlu binaların üstyapısı büyük oranda doğrusal davranış sergileyeceği için, yönetmeliğe göre de üstyapı ve altyapı doğrusal elastik olarak modellenenilmekte, izolatörlerin ise doğrusal olmayan davranış için modellenmesi gerekmektedir. Üstyapı ve altyapıyı oluşturan yapısal elemanlar modellenirken etkin kesit rijitliği çarpanlarının kullanılması gerekmele birlikte, bu çarpanların değerleri de taban ankastre bir yapınıninkine göre daha yüksektir.
8. Tasarım, mümkün olduğunca izolatörlerde çekme kuvveti oluşmayacak şekilde yapılmalıdır. Narin ve hafif binalarda bunun sağlanması daha zordur. Ayrıca, yakın-fay depremlerinin düşey bileşenlerinde çok yüksek ivmeler ortaya çıktığı durumlarda problem yaşanabilmektedir. Bu tür durumlarda özel nitelikli izolatörler kullanılabilmele birlikte, bu izolatörlerin oluşan çekme kuvvetlerini karşılayabileceğinin deneylerle doğrulanması gerekmektedir. Dünyada çekme altında yatay ötelenme testlerini yapabilecek kapasitede laboratuvar sayısı ise oldukça azdır.
9. Rüzgâr yükü altında yapının çok fazla hareket etmesi, yaşayanların konforu açısından tercih edilmemektedir. Dolayısıyla, rüzgâr yükü altında izolasyon ara yüzünde oluşacak maksimum görelî ötelenenin sınırlandırılması ve üstyapıda DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde ortaya çıkan görelî kat ötelenmesi değerinden fazla olmaması gerekmektedir.

10. İzolatörlerin yüksek kaliteli ve emniyetli ürünler olması gerekmektedir. Bu açıdan, izolatörlerde CE işareti olması zorunludur.
11. İzolatörlerin bağlantılarının tasarımı tüm yapı için en kritik nokta olduğundan, bu tasarıma esas yatay ve düşey kuvvetlerin, toplam en büyük yerdeğiştirme dikkate alınarak ve tüm yük birleşimleri %10 arttırılarak hesaplanması gerekmektedir. Yük birleşimlerinde yer alacak toplam deprem etkisi E_{gr} , DD-1 deprem yer hareketi düzeyi için ve düşey deprem bileşenini de içerecek şekilde dikkate alınmalıdır.
12. Kauçuk izolatörlerde, çeşitli durumlar için birim şekildeğiştirme hesapları yapılarak belirlenen sınırları aşmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Hesaplanacak birim şekildeğiştirmeler depremsiz durumda basınçtan ve diğer etkilerden dolayı (genleşme, rüzgar, vb.) oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısız şekildeğiştirme, izolatör üst ve alt plakaları arasındaki görelî dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme, deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan ve yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirmedir. Ayrıca, kauçuk izolatörler için burkulma yükünün sınır değerleri aşmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir.
13. Bazı kısıtlar altında ve belirli kriterlerin sağlanması durumunda analizler için Etkin Deprem Yüğü Yöntemi veya Mod Birleşirme Yöntemi kullanılabilir. Ancak pratikte tasarım, herhangi bir kısıtlamaya tabi olmadan kullanılabilen zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirilerek sonuçlandırılmaktadır.
14. TBDY (2018)'de kat ivmelerinin sınırlandırılmasına yönelik bir kural yoktur. Diğer taraftan, sismik izolasyonlu binaların ana amaçlarından bir tanesi, bina içerisindeki titreşime hassas cihazları korumak ve insanların konforunu sağlamak amacıyla kat ivmelerinin azaltılmasıdır (Alhan ve Şahin, 2011). Kat ivmelerinin sınırı, kullanım amacı ve bina içerisindeki cihazlar da dikkate alınarak bina sahibi ile istişare neticesinde belirlenmelidir. Bu seviye genellikle 0.2 g ~ 0.3 g mertebesindedir. Türkiye'deki hastane binaları için T.C. Sağlık Bakanlığının 2013'te yayınlanan genelgesinde kat ivme sınırı 0.2 g iken, 2018'de güncellenen genelgesinde bu sınır 0.3 g'ye çekilmiştir. Çok katlı (yaklaşık 4-5 kat üzerinde) binaların üst katlarında bu ivme seviyelerinin sağlanması bazı durumlarda zor olabilmektedir. Ancak bu katlar genellikle yatak katları olduğundan 0.3 g'nin biraz üzerinde değerler kabul edilebilir değerler olarak değerlendirilebilmektedir.

Yukarıdaki 4., 5. ve 6. adımdaki hesapların yapılabilmesi için, izolatör parametrelerinin (i) üst sınır değerleri, (ii) alt sınır değerleri ve (iii) nominal değerleri için üç farklı yapısal model kurulması ve analiz edilmesi gerekmektedir.

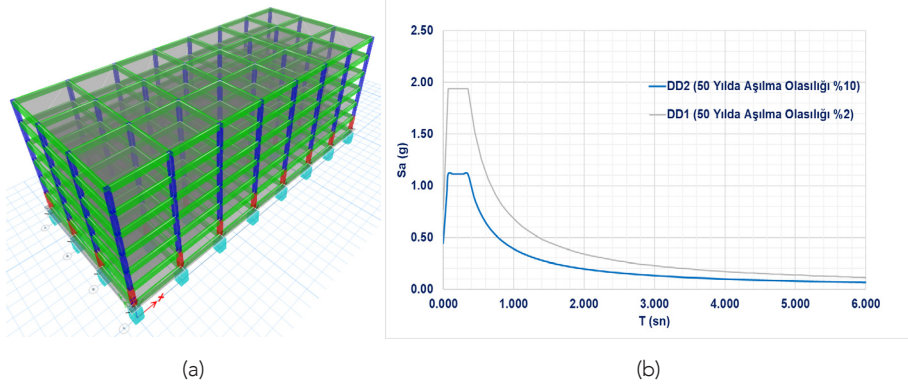
Hesapların, her birinin iki yatay ve bir düşey bileşeni olan 11 adet deprem kaydı takımı için yapılacağı dikkate alındığında, analiz yükünün ne kadar fazla olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Proje süresine etkisi olan diğer bir husus, tasarımda dikkate alınan izolatör parametrelerinin kontrolünün Prototip Deneyleri ile, izolatör üretimine bağlı değişkenliğin tasarımda dikkate alınan sınırlar içinde kaldığının teyidinin de Üretim Kontrol Deneyleri ile yapılmasının zorunlu olmasıdır. Prototip ve üretim kontrol deneyleri için kullanılması gereken düşey yük, yatay yerdeğiştirme, yatay kuvvet, çevrim sayısı, deney süresi ve kabul koşulları TBDY (2018)'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Yine yönetmelik gereği, bu deneyler tasarım mühendisinin gözetimi ve denetimi altında yapılmak zorundadır. Deneylere TGUA-5 de katılmalı ve sonuçlarını değerlendirmelidir.

4. Örnek Bir Sismik İzolasyonlu Bina Modelinin Yakın-fay ve Düşey Deprem Etkisi Altındaki Davranışı

4.1. Örnek Sismik İzolasyonlu Bina Modeli

Bu kısımda, sonraki kısımda incelenecek örnek bir sismik izolasyonu bina modeli tanıtılmıştır. Söz konusu bina, Polat vd. (2018) tarafından oluşturulan 6 katlı örnek betonarme bir otel yapısının çekirdek perde sistemi ve bodrum katı kaldırılmak, bir izolatör katı döşemesi eklenmek ve her bir kolonun altına bir adet eğri yüzeyli sürtünmeli izolatör yerleştirilmek suretiyle değiştirilerek elde edilmiştir. Ayrıca, radye temel üstünde, üzerine izolatörlerin yerleştirileceği ve boyutları 150 cm × 150 cm × 150 cm olan betonarme kaideler teşkil edilmiştir. X ve Y doğrultularında sırasıyla toplam 8 ve 4 adet aks bulunmakta olup aks açıklıkları 8 m'dir. Toplam 32 adet eğri yüzeyli sürtünmeli izolatör kullanılan binanın plan boyutları 56 m × 24 m ve kat yükseklikleri 3.5 m olup izolasyon ara yüzü üzerinde yer alan bina toplam yüksekliği 21 m'dir. Binaya ait 3 boyutlu sonlu elemanlar model görünüşü Şekil 8(a)'da verilmiştir. Taşıyıcı sistemi moment aktaran betonarme çerçeve ve kirişli betonarme plaktan oluşan üstyapıda tipik kolon boyutları ilk katta 70 cm x 70 cm ve diğer katlarda 60 cm x 60 cm, tipik kiriş boyutları 60 cm × 75 cm ve betonarme döşeme plak kalınlığı 20 cm'dir. Kolon ve kirişler çubuk elemanı olarak, döşemeler kabuk elemanı olarak ve izolatörler "Link" elemanı olarak modellenmiştir. Üstyapı ve alt yapı doğrusal, izolasyon sistemi doğrusal olmayan şekilde modellenmiştir. Yapının modellenmesinde kullanılacak etkin kesit rijitliği çarpanları için TBDY (2018), Tablo 13.1 de paylaşılan değerler kullanılmıştır. Beton kalitesi C35 olan yapıya ait yükler ve bina genel özellikleri Polat vd. (2018)'den burada kullanılacak olan modele uyarlanarak Tablo 1'de verilmiştir. Spektral ivme katsayıları, yapının bulunduğu konum (İstanbul, Mahmutbey, Enlem=41.0413046° ve Boylam=28.8371403°) ve DD1 ve DD2 deprem yer hareketi seviyesi için Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan elde edilmiştir. Yerel Zemin Etki Katsayıları, Yerel Zemin Sınıfı

ZC için TBDY (2018), Tablo 2.1 ve 2.2'ye göre $F_s=1.2$ ve $F_1=1.5$ olarak dikkate alınmış ve tasarım spektral ivme katsayıları, S_{DS} ve S_{D1} , DD1 ve DD2 seviyeleri için TBDY (2018), Denklem 2.1'e göre elde edilmiştir. Elde edilen değerler ile TBDY (2018), Denklem 2.2 ve 2.3 kullanılarak oluşturulan yatay elastik ivme spektrumları DD1 ve DD2 deprem düzeyleri için Şekil 8(b)'de verilmiştir.



Şekil 8. (a) Örnek sismik izolasyonlu bina, (b) DD1 ve DD2 için yatay elastik spektrum

Tablo 1 – Bina genel özellikleri

Bina Kullanım Sınıfı (BKS)	BKS = 3 – TBDY (2018), Tablo 3.1
Bina Önem Katsayısı (I)	I = 1.00 – TBDY (2018), Tablo 3.1
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	$S_{DS} = 1.1124 > 0.75$ ve BKS = 3 için DTS = 1 TBDY (2018), Tablo 3.2
Bina Yükseklik Sınıfı (BYS)	$17.5m < H_N \leq 28 m$ ve DTS=1 için BYS = 5 TBDY (2018), Tablo 3.3
Üstyapı Performans Hedefi	DD-2 altında Sınırlı Hasar (SH) TBDY (2018), Tablo 3.5
Altyapı Performans Hedefi	DD-1 altında Kesintisiz Kullanım (KK) TBDY (2018), Tablo 3.5
Üstyapı Sınırlı Hasar seviyesi için Deprem yükü azaltma (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D)	R = 1.5 ve D = 1.5
Altyapı için Deprem yükü azaltma katsayısı (R)	R = 1

DD1 için Spektral İvme Katsayıları	$S_s = 1.618$ ve $S_1 = 0.454$
DD2 için Spektral İvme Katsayıları	$S_s = 0.927$ ve $S_1 = 0.259$
DD1 için Tasarım Spektral İvme Katsayıları	$S_{DS} = S_s \times F_s = 1.618 \times 1.2 = 1.942$ $S_{D1} = S_1 \times F_1 = 0.454 \times 1.5 = 0.681$
DD2 için Tasarım Spektral İvme Katsayıları	$S_{DS} = S_s \times F_s = 0.927 \times 1.2 = 1.112$ $S_{D1} = S_1 \times F_1 = 0.259 \times 1.5 = 0.389$
Betonarme elemanların zati ağırlığı	25.0 kN/m ³
Kaplama Yüğü (Otel / Çatı)	2.50 kN/m ² / 5.00 kN/m ²
Bölme Duvar Yüğü	1.50 kN/m ²
Hareketli Yüğü (Otel/Koridor)	2.00 kN/m ² / 5.00 kN/m ²
Hareketli Yüğü (Çatı / Kar)	1.00 kN/m ² / 0.75 kN/m ²

Eğri Yüzeyleli Sürtünmeli (EYS) izolatörlerin davranışını etkileyen ve tasarım için seçilecek iki ana parametre etkin sürtünme katsayısı (μ) ve eğrilik yarıçapıdır (R_c). Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisindeki ana parametreler ise şunlardır: Karakteristik dayanım (F_Q), başlangıç rijitliği (k_1), ikincil rijitlik (k_2), bir D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik (k_e), bir D yerdeğiştirmesine karşılık gelen kuvvet (F), karakteristik dayanım (F_y) ve etkin akma yerdeğiştirmesi (D_y).

EYS Sarkaç tipi izolatörlere ait karakteristik dayanım, Denklem (1)'de verildiği şekilde (TBDY (2018), Denklem 14B.1), etkin sürtünme katsayısı μ ile izolatör üzerine etkiyen düşey kuvvetin, P , çarpımına eşittir:

$$F_Q = F_y = \mu P \quad (1)$$

Başlangıç rijitliği, k_1 , hesaplarda çok yüksek bir değer olan sanal bir rijitlik olarak dikkate alınır. İkincil rijitlik ise, Denklem (1)'de verildiği şekilde (TBDY (2018), Denklem 14B.2) şu şekilde hesaplanır:

$$k_2 = \frac{P}{R_c} \quad (2)$$

Örnek modelde, izolatörlere gelen ortalama $P_{(G+nQ)}$ yüğü 4992.62 kN'dur. Seçilen nominal etkin sürtünme katsayısı 0.08 ve etkin eğrilik yarıçapı $R_c = 6.9$ m için karakteristik dayanım $F_Q = 0.08 \times 4992.6 = 399.4$ kN ve $k_2 = 4992.62 / 6.9 = 723.6$ kN/m olarak hesaplanmıştır. Bilgisayar modelinde ihtiyaç duyulan diğer bir parametre olan k_1 değeri büyük bir değer (mesela F_y 'nin 400~500 katı) olarak alınabilir.

Etkin rijitlik (k_e), Denklem (3)'te (TBDY (2018), Denklem 14B.3), etkin sönüm oranı (β_e) de Denklem (4)'te (TBDY (2018), Denklem 14B.4) verildiği üzere, eğrilik yarıçapı, sürtünme katsayısı ve yerdeğiştirmeye bağlı olarak elde edilebilmektedir:

$$k_e = \frac{F}{D} = \frac{F}{R_c} + \frac{\mu P}{D} \quad (3)$$

$$\beta_e = \frac{1}{2\pi} = \left[\frac{W_d}{FD} \right] = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\mu}{\mu + D/R_c} \right] \quad (4)$$

Bu durumda, DD1 deprem seviyesinde, nominal özellikler kullanılarak hedef yerdeğiştirme 40.4 cm olarak kabul edilirse (nihai değer iterasyon sonucu elde edilir), $k_e=1697.7$ kN/m ve $\beta_e=0.365$ olarak elde edilmektedir.

Sönüm Ölçeklendirme Katsayısı (η), DD1 ve DD2 deprem yer hareketi düzeyindeki izolatör yerdeğiştirmeleri için hesaplanan etkin sönüm yüzdesine (ζ) bağlı olarak Denklem (5)'te (TBDY (2018), Denklem 14.32) verildiği gibi hesaplanır:

$$\dot{\eta} = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} \quad (5)$$

Burada, DD1 deprem seviyesinde, nominal parametrelerle yapılan yukarıdaki hesapta $\zeta=\%36.5$ olarak elde edilmiş olmakla birlikte, TBDY (2018), Madde 14.14.3.5 gereği etkin sönüm oranı $\zeta=\%30$ ile sınırlandırıldığından, bu değer kullanılarak sönüm ölçekleme değeri $\eta=0.535$ olarak elde edilmiştir.

DD1 deprem düzeyi için bina etkin periyodu (T_M), Denklem (6) (TBDY (2018), Denklem 14B.31) kullanılarak

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gK_M}} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada K_M , DD1 seviyesindeki maksimum nominal deplasman D_M için Denklem (3) ile elde edilen etkin rijitliktir. $P=4992.62$ kN, nominal $\mu=0.08$ ve etkin eğrilik yarıçapı $R_c=6.9$ m için $K_M=1697.7$ kN/m ve bina toplam ağırlığı $W=159764$ kN olduğundan $T_M=3.44$ s olarak hesaplanır.

DD1 deprem yer hareketi düzeyi için izolasyon sistemi etkin rijitlik merkezindeki yatay yerdeğiştirme (D_M), %5 sönüm için elde edilmiş DD1 yatay tasarım spektrumu kullanılarak hesaplanır. Öngörülen bir yerdeğiştirme değeri için elde edilen bina etkin periyodu T_M ve bu periyoada denk gelen spektral ivme değerinin sönüm ölçekleme katsayısı η_M ile Denklem (7)'de (TBDY (2018), Denklem 14.30) verilen formül ilişkisi ile yeni bir yerdeğiştirme değeri hesaplanır. Öngörülen yerdeğiştirme ile hedef yerdeğiştirme eşitlenene kadar

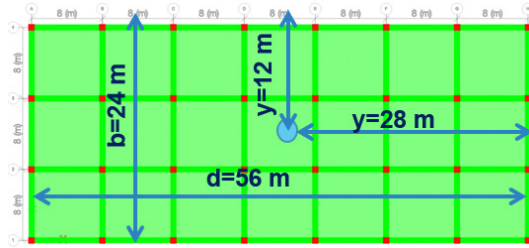
yapılacak iterasyon ile nihai D_M belirlenir. Seçilecek bir ilk değer sonucunda iterasyon tamamlandığında, incelenen örnek yapı için nihai olarak $D_M=40.4$ cm bulunmuştur.

$$D_M = 1.3 \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T_M^2 \eta_M S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) \quad (7)$$

Üstyapı ve yalıtım sistemi burulmasından gelen ilave yerdeğiştirmeler de dikkate alındığında, DD1 deprem yer hareketi düzeyi için izolasyon sistemi etkin rijitlik merkezindeki toplam yerdeğiştirme (D_{TM}), Denklem (8) (TBDY (2018), Denklem 14.34) kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (8)$$

Burada, e, üstyapı ağırlık merkezi ile yalıtım sistemi rijitlik merkezi arasında ölçülen dış merkezlik ile deprem yüklemesine dik doğrultudaki plan boyutunun %5'i olarak hesaplanan ek dış merkezliğin toplamını, b, yapının en uzun plan boyu olan d'ye dik doğrultudaki en kısa plan boyunu ve y, yalıtım sistemi rijitlik merkezi ile ilgili eleman arasındaki deprem yüklemesine dik doğrultudaki uzaklığı vermektedir. Bu örnekte nominal parametreler için D_{TM} hesabı detayları Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen hesaplar neticesinde X ve Y doğrultularında D_{TM} değerleri 40.5 cm ve 40.6 cm olarak hesaplanmıştır. Yönetmelik gereği, bu değerlerin minimum değer olan $1.1 \times D_M = 1.1 \times 40.4 = 44.4$ cm'den küçük olduğunun kontrolü yapılmış ve 44.4 cm değeri deplasman kapasitesi olarak seçilmiştir.



Şekil 9. Toplam yerdeğiştirme hesabında kullanılan plan ölçüleri

Üstyapı ve altyapı tasarımı için üstyapıya ve altyapıya etkiyen kuvvetler, V_D ve V_M , Denklem (9) ve (10) (TBDY (2018), Denklem 14B.35 ve 14.36) ile şu şekilde hesaplanır:

$$V_D = \frac{S_{ae}^{(DD-2)}(T_D)W\eta_D}{R} \quad (9)$$

$$V_M = \frac{S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)W\eta_M}{R} \quad (10)$$

Bu hesaplarda, üstyapıya etkiyen kuvvet için DD2 deprem yer hareketi düzeyi, alt yapıya etkiyen kuvvet için DD1 deprem yer hareketi düzeyi kullanılmaktadır.

Yukarıda ortaya konan hesaplar, izolatör parametrelerinin nominal değerleri içindir. Ancak, izolasyon sisteminin yerdeğiştirme kapasitesinin hesabında alt limit özellikleri, üstyapı tasarımında ve izolatörlere gelen yüklerin belirlenmesinde üst limit özellikleri, kat ivmelerinin belirlenmesinde ise nominal değerler kullanılarak hesapların yapılması gerekmektedir. Alt limit ve üst limit değerlerinin belirlenmesi, TBDY (2018), Bölüm 14.13.1 doğrultusunda gerçekleştirilir. EYS izolatörler için etkin sürtünme katsayısı, μ , Denklem (11) ve (12)'de (TBDY (2018), Denklem 14.9 ve 14.10) verilen $\lambda_{üst}$ = üst limit katsayısı ve λ_{alt} =alt limit katsayısı ile çarpılarak üst limit ve alt limit değerleri elde edilir.

$$\lambda_{üst} = [1 + 0.75 (\lambda_{ae,üst} - 1)]\lambda_{deney,üst} \lambda_{spek,üst} \quad (11)$$

$$\lambda_{alt} = [1 - 0.75 (1 - \lambda_{ae,alt})]\lambda_{deney,alt} \lambda_{spek,alt} \quad (12)$$

λ_{ae} yaşlanma ve çevresel etkiler, λ_{deney} yükleme hızı ve ısınma gibi etkiler ve λ_{spek} üretimdeki değişkenlikler nedeni ile kullanılacak olan çarpanlar olup prototip veya üretim kontrol deneyleri ile belirlenemediyse, alt sınır için sırasıyla 1.00, 0.70 ve 0.85, üst sınır için sırasıyla 1.20, 1.30 ve 1.15 alınır (TBDY (2018), Tablo 14.3). Bu çalışma kapsamında yönetmelikte verilen alt ve üst limit özellikleri kullanılarak $\lambda_{üst} = 1.719$ ve $\lambda_{alt} = 0.595$ olarak hesaplanmıştır.

DD1 ve DD2 deprem seviyelerinde, alt limit, nominal ve üst limit için hesaplanmış izolatör özellikleri özet olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. DD1 ve DD2 deprem seviyelerinde, alt limit, nominal ve üst limit için hesaplanmış izolatör özellikleri

Parametre	DD1			DD2			Birim
	Alt Limit	Nominal	Üst Limit	Alt Limit	Nominal	Üst Limit	
P (G+nQ)	4992.62						kN
$\lambda_{üst}$	1.719						-
λ_{alt}	0.595						-
μ_{nom}	0.08						-
μ_{eff}	0.0476	0.08	0.13752	0.0476	0.08	0.13752	-
R_c	6.9						m
D	54.0	40.4	30.7	22.7	17.5	11.9	cm
F_Q=F_y	237.6	399.4	686.6	237.6	399.4	686.6	kN
k₂	723.6						kN/m
k_e	1155.7	1697.7	2938.4	1756.8	2942.5	6445.1	kN/m
β_e	23.8	36.5	48.0	37.4	48.0	56.5	%
η_m	0.589	0.535	0.535	0.535	0.535	0.535	-
T_M veya T_D	4.170	3.440	2.615	3.382	2.613	1.766	s

NOT: TBDY (2018) gereği, β_e değeri %30'u geçtiği durumlarda η_m hesabında ζ %30 olarak dikkate alınmıştır.

4.2 Yakın-fay ve Düşey Deprem Etkisi Altındaki Davranış

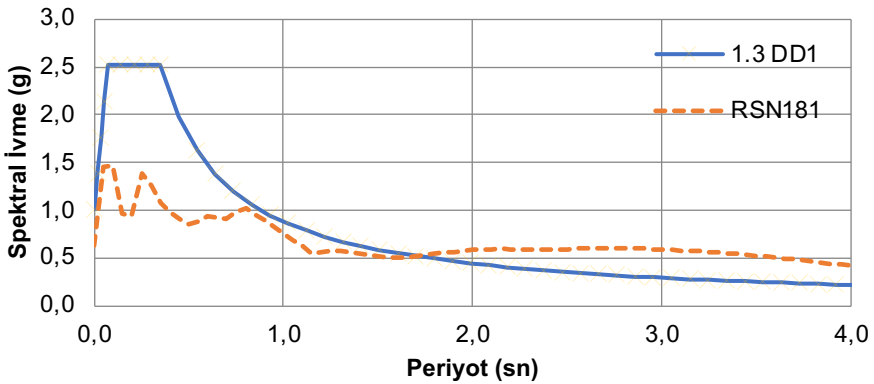
Sismik izolasyonlu binaların en çok zorlandıkları iki konudan bir tanesi faya yakın bölgelerdeki deprem yer hareketi hız kayıtlarında gözlenen uzun periyotlu ve yüksek genlikli "hız puls"ları iken, diğeri yine özellikle bu faya yakın bölgelerdeki deprem yer hareketinin düşey ivme bileşeni genliklerinin çok yüksek olması durumudur (Elnashai ve Papazoglou, 1997; Papazoglou ve Elnashai, 1997; Bray ve Marek, 2004; Memarpour vd., 2016). Yakın-fay depremlerinde gözlenen hız pulslarının uzun periyotları sismik izolasyonlu binaların izolasyon periyotlarına yakın olduğu durumlarda rezonansa benzeyen bir davranış gözlenmekte ve izolatör deplasman talepleri çok artmaktadır (Hall, 1998; Alhan ve Öncü-Davas, 2016). Bunun tasarımda öngörülemezliği durumunda izolatörlerin kapasitesi aşılarak yırtılmalarına veya burkulmalarına sebep olabilir. Benzer şekilde, düşey deprem ivmeleri genellikle yatay ivmelerden ve yer çekimi ivmesi değerinden küçüktür. Genellikle, izolatörlerdeki çekmeler/kalkmalar daha ziyade yatay deprem kuvvetlerinin etkisi altındaki

devrilme hareketine bağlı olarak kenar/köşe izolatörlerde çıkabilmekteyken, yakın-fay depremlerindeki yüksek düşey yer ivmeleri nedeniyle çok sayıda izolatörde çekme/kalkma gözlenebilir.

Yukarıda özetlenen problemi nümerik olarak ortaya koyabilmek için, uzun periyotlu ve yüksek genlikli bir hız pulsu içeren ve yüksek düşey ivmelere sahip bir yakın-fay deprem kaydı özel olarak seçilmiş ve Bölüm 4.1’de oluşturulan sismik izolasyonlu bina modeline etkilmiştir. Seçilen 15 Ekim 1979 Imperial Valley-06 Depremi’nin El Centro Array #6 İstasyonu Kaydı’na (RSN181) ait karakteristik özellikler Tablo 3’te verilmiştir (PEER, 2023). Deprem kaydının karakteristik özelliklerini değiştirmemek için herhangi bir ölçekleme yapılmamıştır. Ancak, RSN181 kaydının spektral özelliklerini Bölüm 4.1’deki sismik izolasyon sisteminin tasarımında kullanılan yatay deprem tasarım spektrumuyla karşılaştırmak amacıyla, TBDY (2018) – Bölüm 2.5.2 doğrultusunda, RSN181 deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmiş ve yatay deprem tasarım spektrumunun 1.3 katı ile karşılaştırılmıştır (Şekil 10). Görüleceği üzere, alt limit özellikleri ile hesaplanan sismik izolasyon periyodu yani yaklaşık 4 s civarında, RSN181 kaydının spektral ivme değeri 1.3DD1 yatay tasarım spektrumunun bir miktar üzerinde kalmaktadır.

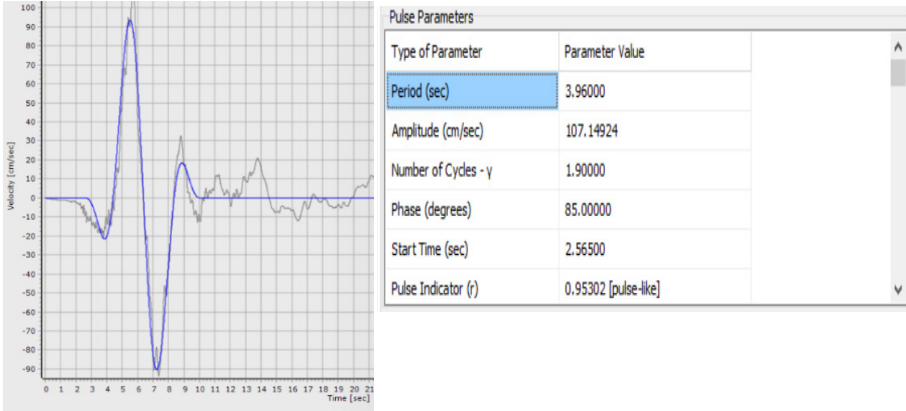
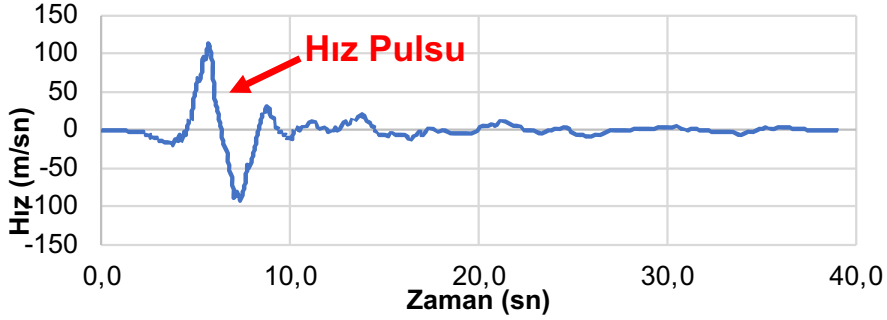
Tablo 3. Imperial Valley-06 Depremi, El Centro Array #6 Kaydı karakteristik özellikleri

PEER RSN No	Faya en yakın mesafe	Bileşke	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
RSN181	$R_{rup} = 1.35$ km	Yatay 1: H-E06230	0.449	113.55	72.89
		Yatay 2: H-E06140	0.448	67.02	27.90
		Düşey: H-E06-UP	1.895	63.59	23.63

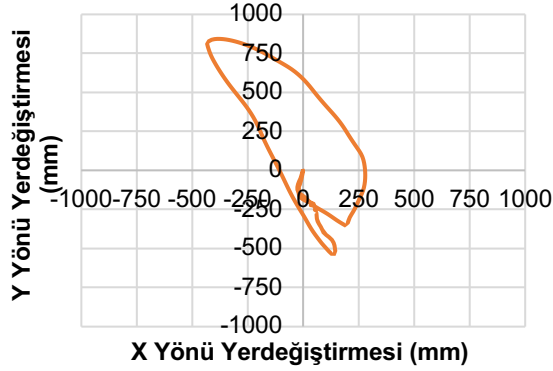


Şekil 10. RSN181 bileşke yatay ivme spektrumu ile DD1 deprem yer hareketi spektrumunun 1.3 katı ile karşılaştırılması (%5 sönümlü)

Yakın-fay özellikleri genellikle faya olan mesafe 10 km'nin altında ise ortaya çıkmakta olup bu mesafe azaldıkça etkiler eksponansiyel bir şekilde artmaktadır. Tipik bir depremin pik yer hızı 25 cm/s ~ 50 cm/s iken, faya olan en yakın mesafenin 1.35 km olduğu RSN181 kaydı için, tablodan görüleceği üzere, E06230 yatay bileşeni pik yer hızı 113.55 cm/s gibi çok yüksek bir değerdir. Bu bileşenin hız-zaman kaydı ve Seismosignal (2023) programında belirlenen hız pulsü özellikleri Şekil 11'de verilmiştir. Hız pulsunun periyodu 3.96 s olup izolatör alt limit özellikleri ile elde edilen izolasyon periyodu olan 4.17 s ile neredeyse üst üste çakışmaktadır. Bu durumun ortaya çıkardığı sonuç, izolatör yerdeğiştirme taleplerinin çok artması (Şekil 12) olup X ve Y doğrultusu pik izolatör yerdeğiştirme talepleri sırasıyla 28.0 cm ve 83.2 cm olmak üzere pik bileşke izolatör yerdeğiştirme talebi 93.2 cm olmuştur.

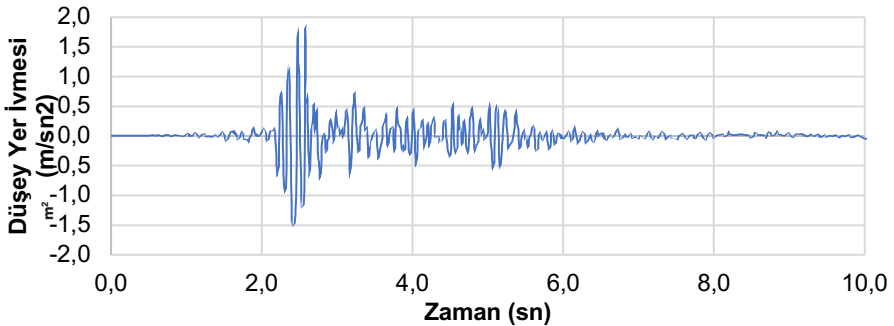


Şekil 11. RSN181, E06230 Bileşeni hız-zaman kaydı ve puls özellikleri

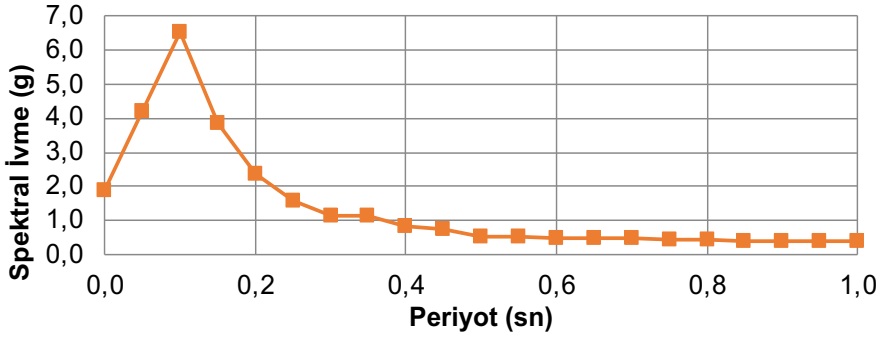


Şekil 12. İzolatörlere ait yatay X ve Y yönü yerdeğiştirme grafiği

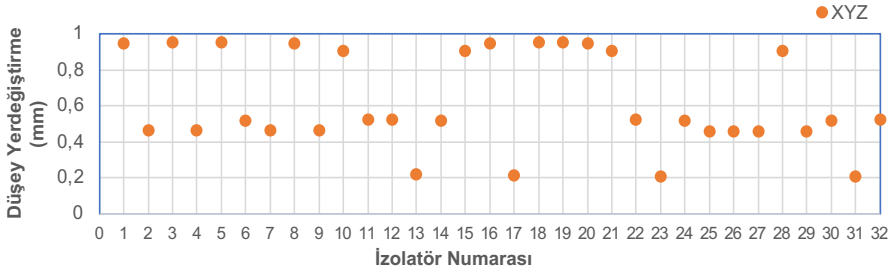
Bir diğer yakın-fay problemi, yukarıda değinildiği üzere yüksek dikey yer ivmeleri olup, RSN181 kaydı H-E06-UP dikey bileşeni için de bu durum gözlenmektedir. Şekil 13'te görüleceği üzere, H-E06-UP dikey bileşenine ait pik yer ivmesi 1.895 g gibi çok yüksek bir seviyeye çıkmaktadır. Şekil 14'te ise, RSN181 deprem kaydının dikey bileşenine ait %5 sönümlü ivme spektrumu sunulmuştur. Gerçekleştirilen modal analiz neticesinde, incelenen binanın dikey titreşim periyodu 0.176 s olarak hesaplanmış olup bu değere karşılık gelen spektral ivme değerinin yaklaşık 3.0 g gibi oldukça yüksek bir değer olduğu görülmektedir. Bu durumun etkisi ise Şekil 15'te açıkça görülmektedir. Depremi sadece yatay bileşenleri aynı anda X ve Y yönlerinde binaya etkilendiğinde, analizler sonucunda izolatörlerde herhangi bir kalkma görülmemiştir. Yani, yatay deprem etkileri altındaki devrilmeye bağlı olarak herhangi bir izolatörde kalkma ortaya çıkmamıştır. Ancak, deprem kaydının dikey bileşeni de Z yönünde binaya etkilendiği durumda, Şekil 15'te görüldüğü üzere, tüm izolatörlerde 1 mm'ye varan kalkmalar gözlenmiştir.



Şekil 13. RSN181, H-E06-UP Düşey Bileşeni yer ivmesi-zaman kaydı

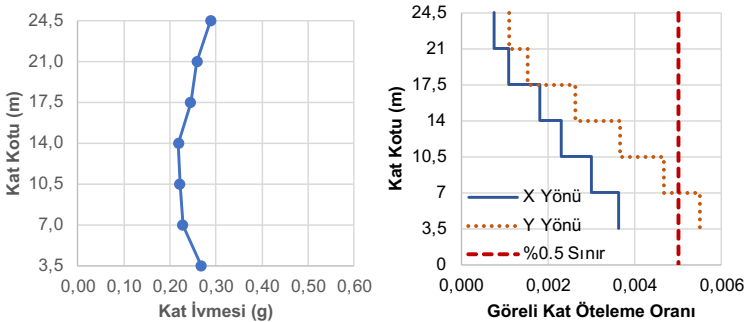


Şekil 14. RSN181, H-E06-UP düşey bileşenine ait %5 sönümlü ivme spektrumu



Şekil 15. X, Y ve Z yönlerinde deprem yüklemesi altında izolatlara ait düşey yerdeğıştirmeler

RSN181 kaydı altındaki analizlerde elde edilen bileşke kat ivmeleri ile X ve Y yönlerindeki görece kat ötelemesi oranları Şekil 16'da verilmiştir. Görüleceği üzere, kat ivmeleri, T.C. Sağlık Bakanlığı'nın 2013'te yayınlanan genelgesindeki 0.2 g sınırının altına hiçbir katta inmemiştir. Ancak, 2018'de güncellenen genelgesindeki 0.3 g sınırına en üst katta dayanmış olmakla birlikte bu sınır aşılmamıştır. Görece kat ötelemesi oranları, en alt katta Y yönündeki küçük bir miktar aşım haricinde Kesintisiz Kullanım (KK) için TBDY (2018)'de belirlenen sınır olan 0.005'in altında kalmıştır.



Şekil 16. Kat ivmesi profili (X ve Y yönü bileşkesi) ve görece kat ötelemesi oranı

Sonuç ve Öneriler

Dirençli şehirler oluşturabilmek için, büyük depremler sonrasında yapıların sadece ayakta kalabilmesi değil, kamu binaları ve hatta endüstriyel tesislerin işlevlerine kesintisiz bir şekilde devam etmesi, konutlardaki hasarın da sınırlı ve onarılabilir seviyede kalması gerekmektedir. Bu deprem performansını hem yapı içindekileri hem de yapının kendisini depremin zararlı etkilerinden koruyarak sağlayabilen sismik izolasyon teknolojisi, dünyada olduğu gibi Türkiye’de de giderek artan bir hızla uygulanmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye’deki son dönem sismik izolasyon uygulamalarının önemli örneklerine yer verilmiş, sismik izolasyonlu bina tasarımı felsefesi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)’de yer alan kurallar çerçevesinde ortaya konmuş ve örnek bir sismik izolasyonlu bina modellemesi ve tasarımı adımları gösterilmiştir. Oluşturulan sismik izolasyonlu bina modeli ile yüksek genlikli ve uzun periyotlu bir hız pulsuna sahip, düşey ivme bileşenleri yüksek bir yakın-fay deprem kaydı takımı kullanılarak incelenen yakın-fay ve düşey deprem etkileri neticesinde, yakın-fay depremlerindeki hız pulslarının izolasyon periyodu ile çakışması durumunda izolatör yerdeğıştirme taleplerinin nasıl arttığı ve yakın-fay depremlerindeki yüksek düşey ivmelerinin nasıl çok sayıda izolatörde kalkmaya neden olduğu ortaya konmuştur. İncelenen örnekte, yerdeğıştirme talebi 93.2 cm’ye ulaşmış olup tüm izolatörlerde 1 mm’ye varan kalkmalar meydana gelmiştir. Ayrıca, kat ivmeleri T.C. Sağlık Bakanlığı’nın 2013’te yayınlanan genelgesindeki 0.2 g sınırını tüm katlarda aştığı ancak 2018’de güncellenen genelgedeki 0.3 g sınırının altında kaldığı gösterilmiştir.

Kaynaklar

Alhan, C. ve Gavin, H. (2004). "A Parametric Study of Linear and Non-linear Passively Damped Seismic Isolation Systems for Buildings". *Engineering Structures*, 26:485–497.

Alhan, C. ve Gavin, H. (2004). "Reliability of Base Isolation for the Protection of Critical Equipment from Earthquake Hazards". *Engineering Structures*, 27:1435–1449.

Alhan, C. ve Şahin, F. (2011). "Protecting Vibration-sensitive Contents: An Investigation of Floor Accelerations in Seismically Isolated Buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9:1203–1226.

Alhan, C. ve Öncü-Davas, S. (2016). Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes. *Engineering Structures* 116:83–94.

Arup, "Başakşehir Pine and Sakura City Hospital, Istanbul, Bringing to Life the Largest Base-Isolated Building in the World", Erişim tarihi: 24.04.2023, <https://www.arup.com/projects/basaksehir-city-hospital>

Aydın, E. Ö. (2022). "Direnci Yerleşim-Yapılaşma İlişkisi ve Sürdürülebilirlik". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, 2, 1-18.

Blakeley, R.W.G., Charleson, A.W., Hitchcock, H.C., Megget, L.M., Priestley, M.J.N., Sharpe, R.D., Skinner, R.I. (1979). "Recommendations for the Design and Construction of Base Isolated Structures". *Bulletin of New Zealand National Society of Earthquake Engineering*, 12 (2): 136–157.

Bray, J. D., and Rodriguez-Marek, A. (2004). Characterization of Forward-directivity Ground Motions in the Near-fault Region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24(11): 815–828.

Buckle, I.G., Mayes, R.L. (1990). "Seismic Isolation: History, Application, and Performance – A World View". *Earthquake Spectra*, 6 (2):161–201.

Castellano, M.G., Cosenza, E., Di Sarno, L., Guerriero, L., Lupoi, G. ve Infanti, S. (2007). "Seismic isolation of hospitals: The examples of Udine, Lisbon and Naples hospitals". *Proceedings of the 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 27-30 Mayıs, İstanbul, Türkiye.

Chen, F.Y., Jiang, H. ve Lou, K. (2008). "Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control". USA: CRC Press, ISBN: 978-0-8493-8532-2.

Colombo, J.I. ve Almazan, J.L. (2017). "Seismic Reliability of Legged Wine Storage Tanks Retrofitted by Means of a Seismic Isolation Device". *Engineering Structures*, 134:303–316.

Dolce, M. (2001). "Remarkable Design Examples Concerning Recent Application of Innovative Anti-seismic Techniques to Bridges and Viaducts in Europe". *7th Intl. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of Vibrations of Structures*, 2- Ekim, Assisi, İtalya.

Eidinger, J.M., Kelly, J.M. (1978). "Experimental results of an earthquake isolation system using natural rubber bearings". *UCB/EERC-78/03*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Elnashai, A. S. and Papazoglou, A. J. (1997). Procedure and Spectra for Analysis of RC Structures Subjected to Strong Vertical Earthquake Loads. *Journal of Earthquake Engineering* 1(1):121-155.

ENR, "The 10 Largest Base-Isolated Buildings in the World". Erişim tarihi: 24.04.2023, <https://www.enr.com/articles/42366-the-10-largest-base-isolated-buildings-in-the-world>

Erdik M. (2017). "State of the art on Application, R&D and Design Rules for Seismic Isolation and Energy Dissipation for Buildings, Bridges and Viaducts, Cultural Heritage and Chemical Plants in Turkey. NSZEE Conference, Nisan, 27-29 April, New Zealand.

Erdik, M., Ülker, Ö., Sadan, B., Tüzün, C. (2018). "Seismic isolation code developments and significant applications in Turkey". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115: 413–437

- Erdoğan, G., Simsar, S., Sakal, S.D., Kor, Ö., Kardoğan, G., Parıltı, C., Kaya, Y.D. ve Gündoğdu, B. (2022). "Dirençli Şehirler Tasarlamak: Uygulama Kılavuzu Arayışı İzmir-Torbalı Örneği". *Çevre, Şehir ve İklim Dergisi*, 2,165-202.
- Esin, T., Coşgun, N. ve Aydın, E.Ö. (2007). "Performance Evaluation of Architectural Education in Respect of Environmental Sensibility (In Turkey)", Ed.: Koprivanac, N., Kusic, H., Environmental Management: *Trends and Results, Zagreb, University of Zagreb Publications Faculty of Chemical Engineering and Technology*, 305-312.
- Farajian, M., Saeed, N. ve Kang, W-H. (2022). "Seismic vulnerability assessment of base isolated liquid storage tanks under near-fault ground motions". *Structures*, 43:1901–1912
- Furinghetti, M. (2022). "Definition and Validation of Fast Design Procedures for Seismic Isolation Systems". *Vibration*, 5:290-305.
- Hacıemiroğlu, M., Tahaoğlu A.Ç, Artun, K., Uğurlu, E., ALHAN, C. (2021a). "Ortak Bir Sismik İzolasyon Döşemesi Üzerindeki Bir Grup Silo Yapısının Deprem Yalıtımlı ve Viskoz Sönümleyicili Tasarımı". 6. *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 13-15 Ekim, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- Hacıemiroğlu, M., Tahaoğlu A.Ç, Artun, K., Uğurlu, E., ALHAN, C. (2021b). "Bir Endüstri Yapısının ve Viskoz Sönümleyicili Tasarımı", 6. *Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 13-15 Ekim, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
- Hall JF. (1998). Seismic Response of Steel Frame Buildings to Near-Source Ground Motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 27:1445–64.
- Harvey Jr., S.P. ve Kelly K.C. (2016). "A review of rolling-type seismic isolation: Historical development and future directions". *Engineering Structures*, 125:521–531.
- Jampole, E., Swensen, S., Miranda, E. ve Deierlein, G.G. (2020). "Parametric Study of Seismic Isolation Properties for Light-Frame Houses". *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 146(10):04020207.
- Kanbir, Z., Alhan, C. ve Özdemir, G. (2020). "Influence of Superstructure Modeling Approach on the Response Prediction of Buildings with LRBs Considering Heating Effects". *Structures*, 28: 1756-1773.
- Komodromos, P. (2000). "Seismic Isolation for Earthquake-Resistant Structures". USA: WITPress, ISBN: 1-85312-803-1.
- Kumar, M., Whittaker, A. ve Constantiou, M.C. (201). "Experimental Investigation of Cavitation in Elastomeric Seismic Isolation Bearings". *Engineering Structures*, 101:290–305.

- Li, Y-Y. (2007). "Statistical Study on Damping Modification Factors Adopted in Taiwan's Seismic Isolation Design Code by Using the 21 September 1999 Chi-Chi Earthquake. Taiwan". *Engineering Structures*, 29:682–693.
- Losanno, D., Hadad, H.A. ve Serino, G. (2019). "Design Charts for Eurocode-based Design of Elastomeric Seismic Isolation Systems". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119:488–498
- Lu, J.E. (2014). "Effects of Soil–structure Interaction on Seismic Base Isolation". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66:167–177.
- Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M. ve Salvatori, A. (2014). "Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use". *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*. Ed. Atilla Ansal. Volume 1: 449-488, Springer.
- Mayes, R.L. ve Naeim, F. (2001). "Design of Structures with Seismic Isolation". *The Seismic Design Handbook* (Ed. Naeim, F.). USA: Springer New York. 723-755. ISBN: 978-0-1923-7301-8.
- Memarpour, M. M., Ghodrati Amiri, G., Razeghi, H. R., Akbarzadeh, M., and Tajik Davoudi, A. (2016). Characteristics of Horizontal and Vertical Near-Field Ground Motions and Invesigation of Their Effects on the Dynamic Response of Bridges. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 4(2):1-24.
- Micozzi, F., Scozzese, F., Ragni, L. ve Dall'Asta, A. (2022). "Seismic reliability of base isolated systems: sensitivity to design choices". *Engineering Structures* 256:114056.
- Murota, N., Suzuki, S., Mori, T., Wakishima, K., Sadan, B., Tuzun, C., Sutcu, F., Erdik, M. (2021). "Performance of High-damping Rubber Bearings for Seismic Isolation of Residential Buildings in Turkey". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143:106620.
- Naeim, F. Ve Kelly, J.M. (1999). "Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice". USA: *John Wiley & Sons, Inc.*, ISBN: 0-471-14921-7.
- Öncü-Davas, S., Temür, R. ve Alhan, C. (2022). "Comparison of Meta-Heuristic Approaches for the Optimization of Non-Linear Base-Isolation Systems Considering the Influence of Superstructure Flexibility". *Engineering Structures*, 263:114347.
- Papazoglou, A. J. and Elnashai, A. S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion., *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 25(10):1109-1137.
- PEER (2023) Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Center. Erişim tarihi: 24.04.2023, <https://ngawest2.berkeley.edu/>

Polat, Ő.Ő., Vuran, E., KaraŐöp, A. ve Aydınogđlu, M.N. (2018). "Örnek BA-1: TBDY (2018)'e Göre Süneklik Düzeyi Yüksek 6 Katlı Betonarme Perdeli/Çerçeveseli Bina Taşıyıcı Sisteminin EŞdeğer Deprem Yüğü Yöntemi İle Hesabı ve Tasarımı". *Bina Tasarım Mühendisleri İçin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY - 2018) Eğitim Elkitabı, Açıklamalar ve Uygulama Örnekleri, Kısım – I: Genel Konular, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.*

Robinson, W.H. (1982). "Lead-rubber Hysteretic Bearings Suitable for Protecting Structures During Earthquakes". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10:593–604.

Sadan, B. (2023). "State of the Art in Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation in Turkey". *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer.*

Sarrazin, M., Moroni, O. Neira, C., Venegas, B. (2013). "Performance of Bridges with Seismic Isolation Bearings during the Maule Earthquake, Chile". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47:117-131.

Seismosignal (2023) Earthquake Software for Signal Processing of Strong-Motion Data. Seismosoft. Read more at: <https://seismosoft.com/products/seismosignal/>

Sorace S., Terenzi, G., Bitossi, C., Mori, E. (2016). "Mutual seismic assessment and isolation of different art objects". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 85:91–102

Symans, M.D., Cofer, W.F. ve Fridley, K.J. (2002). "Base Isolation and Supplemental Damping Systems for Seismic Protection of Wood Structures: Literature Review". *Earthquake Spectra*, 18(3):549-572.

Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. (1993). "An Introduction to Seismic Isolation". UK: *John Wiley & Sons Chichester.*

Tagliafierro, B., Montuori, R., Castellano, M.G. (2021). "Shake table testing and numerical modelling of a steel pallet racking structure with a seismic isolation system". *Thin-Walled Structures*, 164:107924

TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

TV-Akşam, "Deprem'in Etkisini Yüzde 80 Azaltan İzolatörler Türkiye'de Sadece Bu Merkezde Test Ediliyor". Erişim tarihi: 27.04.2023, <https://www.aksam.com.tr/aksam-tv/teknoloji>

Yoo, B., Lee, J-H., Koo, G—H., Lee, H-Y., Kim, J-B. (2000). "Seismic Base Isolation Technologies for Korea Advanced Liquid Metal Reactor". *Nuclear Engineering and Design*, 199:125–142.

Zayas, V.A., Low, S.S., Mahin, S.A. (1990). "A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation. *Earthquake Spectra*, 6 (2):317–333.

Zhang, C. ve Ali, A. (2021). "The Advancement of Seismic Isolation and Energy Dissipation Mechanisms Based on Friction". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 146:106746.