



Deprem yalıtımlı ve ankastre temelli betonarme yapıların performansının TBDY-2018 kapsamında kıyaslamalı olarak değerlendirmesi

Comparative evaluation of seismically isolated buildings and fixed base buildings in accordance with the TSDC-2018

Cem Yenidoğan^{1*}

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, cem.yenidogan@yildiz.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0219-6302>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 26 Temmuz 2024
Revizyon 8 Eylül 2024
Kabul 23 Eylül 2024
Online 30 Eylül 2024

Anahtar Kelimeler:

Deprem yalıtımı, TBDY-2018, Betonarme Yapılar, Kahramanmaraş Depremleri, Kayıt Seçimi ve Ölçeklendirmesi, LRB, Kayıcı Yalıtım Birimi.

ÖZ

Deprem yalıtımı, Türkiye'de yeni inşa edilecek ve mevcut binaların güçlendirilmesinde geleneksel yöntemlere alternatif olarak Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018 kapsamında sunulan yenilikçi bir teknolojidir. Bu çalışma kapsamında, konut tipi yapılarda kullanılacak olan deprem yalıtım sisteminin tasarım parametreleri deprem yer hareketinin özelliklerine bağlı olarak yarattığı etkiler zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan elastik ötesi analizler yardımıyla incelenmiştir. Taban yalıtım sisteminin üzerinde yer alan üst yapı aynı oturum planı düşünülerek ankastre temelli olarak tasarlanıp betonarme binalar için yönetmelikte öngörülen koşulların sağlandığı kabulü üzerinden kıyaslanmıştır. Zaman tanım alanında elastik ötesi analizlerde kullanılacak deprem kaydı sayısı, TBDY-2018'e göre belirlenen periyot aralığında ölçeklendirilmiştir. Analizlerde kullanılan taban yalıtımlı ve ankastre temelli binanın yapısal boyutlandırmasında birinci modun hakim olduğu düşünülerek tek serbestlik dereceli sistem için seçilen 11 çift deprem kaydı altında incelenmiştir. Deprem yalıtım sisteminin tasarımında kullanılan doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme çevrimlerinin zarfı nominal parametrelerine göre belirlenmiştir. Deprem yalıtımlı binanın üst yapısı rijit olarak kabul edilmiş ve tanımlanan diferansiyel denklem takımları çözümlenerek cihazların yerdeğiştirme kapasitesi ve üst yapının tasarımında kullanılacak olan taban kesme kuvveti belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre deprem yalıtım sisteminin üst yapıya etkilenen deprem kuvveti ve göreceli kat ötelemesi talebinde ciddi oranda bir azalış sağladığı gözlemlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2024
Received in revised form 8 September 2024
Accepted 23 September 2024
Available online 30 September 2024

Keywords:

Seismic Isolation, TSDC-2018, Reinforced Concrete Structures, Kahramanmaraş Earthquakes, Selection and Scaling of Earthquake Records, LRB, Sliding Isolation Unit

Doi: 10.24012/dumf.1522816

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Seismic isolation is an innovative design and retrofit method presented as an alternative to conventional design methods in Turkey per TSDC-2018. The effects of design parameters and the response characteristics of isolated and fixed-base residential buildings have been examined through nonlinear response history analysis. The superstructure of the base isolation system has the same plan layout as the fixed-base RC Moment-Resisting-Frame (MRF) structure. A comparison of the seismic performance of base-isolated and fixed-base MRF structures was done by assuming that the requirements stipulated in the seismic design code met for reinforced concrete buildings. The number of earthquake records for the nonlinear response history analysis is determined following TSDC-2018 provisions, and the selection and scaling procedure is applied within the specified period range. Considering that the base-isolated and fixed-base counterparts are first-mode dominated structures, the nonlinear Single-Degree-of-Freedom (SDOF) system is analyzed under a selected set of 11 pairs of earthquake records. The backbone curve of the seismic isolation system is established based on the nominal parameters of the isolation units in compliance with the practical applications. The superstructure of the seismically isolated building is assumed to be rigid, and the displacement capacity of the isolation devices and the base shear force were calculated by solving the suite of differential equations. Analysis results indicate that the seismic isolation system provides a considerable reduction in the transferred earthquake force acting on the superstructure and the deformation demands by concentrating it in the isolation interface.

Giriş

Dünya nüfusunun önemli bir oranı deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde yaşamaktadır. Her yıl farklı büyüklük ve özelliklerde meydana gelen doğal afetler arasında depremler yaratmış olduğu kayıplar açısından geniş bir etki alanıyla büyük can ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Türkiye aktif deprem kuşağında yer alan bir ülke olarak 1939 Erzincan depreminden 2023 Kahramanmaraş depremlerine kadar geçen süreçte büyük can kayıpları yaşamıştır[1],[2]. Deprem yönetmeliklerinin güncellenmesi ve revize edilmesinde bilimsel araştırma çıktılarının yanında, Türkiye’de meydana gelen 1999 Kocaeli, 2011 Van Depremi ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra gerçekleştirilen saha incelemelerinin katkısı önemli olmuştur [3]-[5]. Saha gözlemleri neticesinde depremlerden sonra uygulamada yaşanan sıkıntılar tanımlanması, tasarım ve analiz yöntemlerinin gözden geçirilerek yapısal güvenliğin hedeflenen seviyede olup olmadığının incelenmesi gerekli konu başlıkları arasında gelmektedir. Deprem yönetmelikleri 1940 yılından bu yana uzmanlardan oluşan komiteler tarafından günümüze kadar belirli aralıklarla gözden geçirilip güncellenerek farklı isimler altında yayınlanmıştır. Yönetmeliklerde ortaya çıkan değişimin nedenleri arasında bilgisayar teknolojisinde ve malzeme biliminde hızlı gelişim, inşaat endüstrinin üretim kapasitesinde ortaya çıkan artış ve deprem mühendisliğine yönelik bilgi birikimi ve yetişmiş eleman sayısının artması önemli rol oynamıştır. Dolayısıyla deprem yönetmelikleri artan bilgi birikimimiz ve teknolojinin yardımıyla deprem bölgesinde yaşayan yüzbinlerce kişinin hayatının kurtarılmasında etkin rol oynarken mühendislik muhakemesini temel alan yol gösterici bir araç olmuştur.

Yeni teknolojilerin inşaat endüstrisine başlıca yansımaları arasında deprem koruma sistemleriyle donatılmış yapılar, yapı-sağlığı izleme sistemleri, acil müdahale sistemleri ve erken uyarı sistemleri sayılabilir. Deprem riskinin azaltılmasına yönelik belirtilen stratejilerin geliştirilmesi ve afet yönetimi açısından bu teknolojilerin bütüncül kullanımı depreme dirençli şehirler oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Paylaşılan başlıklar arasında depreme dirençli şehirlerin oluşturulması ve bölge halkının can güvenliğinin temin edilmesinde konut tipi yapılarda yapısal performansın nesnel bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Mevcut yapı envanterinde yer alan binaların yaşlanması deprem riskine yönelik çözümler açısından karşımıza iki seçenek sunmaktadır. Bunlardan bir tanesi konutların yıkılarak kentsel dönüşüm yasasıyla uyumlu bir şekilde yenilenmesi diğeryse maliyet açısından uygun koşulların ortaya çıkması durumunda yapıların güçlendirilmesinin tercih edilmesidir. Kentsel dönüşüm sürecinde konutlarda yapı ömrü boyunca hedeflenen performans kriterleri yapı güvenliği ve maliyet açısından değerlendirilirken yenilikçi teknolojiler ve malzemelerle donatılmış binaların göreceli olarak getireceği ek maliyetlerin sağlayacağı üstün performans hem güçlendirme

düşünülen yapılarda hem de yeni inşa edilecek binalar için göz ardı edilemez.

Bu çalışma kapsamında deprem yalıtımlı konut tipi binalarının performansı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018[6] kapsamında değerlendirilmiştir. Yürütülen çalışmada öncelikle geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş konut tipi yapıların deprem sırasında göstereceği genel davranışı anlamak ve talep parametrelerini doğrusal olmayan analizler yardımıyla değerlendirilmiştir. yanında aynı yerde inşa edilmesi planlanan deprem yalıtım teknolojisiyle donatılmış bir binanın performansı kıyaslanmıştır.

Çalışmanın kapsamında depreme dayanıklı yapı tasarımı, Türk Deprem yönetmeliklerinde kronolojik olarak ortaya çıkan değişimler, yeni tasarım felsefesi ve son yönetmelikle uyumlu tasarlanan depreme dayanıklı geleneksel yapı sistemleri için performans düzeyleri paylaşılmıştır. Deprem yalıtım teknolojisi açıklandıktan sonra ankastre temelli geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş betonarme binalar ve deprem yalıtımlı binaların tasarım kuralları, ve sağlaması gerekli olan koşullar tanımlanmıştır. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde en büyük deprem yer hareketi düzeyini aşan bir bölgede (AFAD-deprem izleme istasyonu kayıtları temel alınarak seçim gerçekleştirilmiştir) inşa edilecek olan konut tipi yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Kahramanmaraş depremleri altında araştırmada kullanılan inşaat alanı için deprem yalıtımlı sistemlerin göstermiş olduğu performans seçilen deprem kayıtlarına göre elde edilen yerdeğiştirme limitlerini aşmış olmadığı incelenmiştir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliklerinin değişim süreci ve TBDY-2018

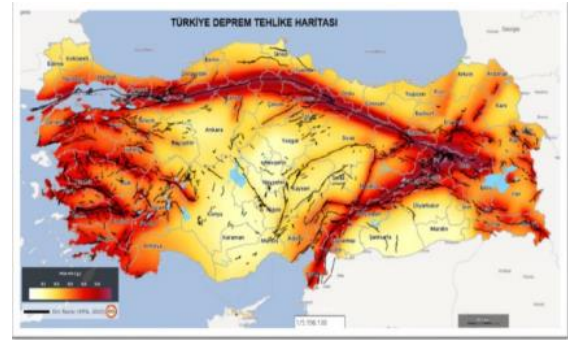
Son 60 yıllık süreçte Türk Bina Deprem Yönetmeliklerinde yapısal tasarım ilkeleri açısından önemli değişiklikler dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki 1971 San Fernando depreminden sonra betonarme binalar için can güvenliği hedeflerini sağlamak için sünek tasarımın uygulanmasıdır. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-75 (ABYYHY-75)[7] kapsamında, sünek tasarım ilkeleri yansıtılarak günümüzün modern yönetmeliklerinin ve araştırma projelerinin yer verdiği yapısal olmayan elemanlar dahil birçok önemli konuya kısaca değinilmiştir. 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri sonrasında dünyada referans alınan yönetmelikler arasında yer alan Amerikan[8],[9] ve Japon[10] yönetmeliklerinde saha gözlemlerinden elde edilen bulgular dahilinde çelik yapılar, ahşap yapılar ve betonarme yapıların tasarım ve analizinde ciddi değişikliklere gidilmiştir [11],[12]. Türkiye 1975 deprem yönetmeliğinde temel alınan toptan göçmenin engellenmesi hedeflerinin 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip deprem yer hareketi seviyesinde onarım maliyetinin ekonomik düzeylerde olmadığı, 1999 Gölcük depreminde toptan göçmenin önlenmesine rağmen birçok binanın can güvenliği performans hedeflerini aşarak ileri hasar seviyesine

ulaştığı saha gözlemlerinde belirlenmiştir. Sadece toptan göçmenin engellenmesi hedefi, deprem sonrasında ileri hasar seviyesine ulaşan yapıların yıkılmasıyla ekonomik açıdan olumsuzluklar yaratmıştır. 2000 yılında yayınlanan BSL-2000 Japon Bina Şartnamesinde[10] ve ATC-40[13] sonrasında kullanımda olan Amerikan yönetmeliklerinde [8],[9] bu durumu ortadan kaldırmak için ek önlemlerin alınması için çalışmalar yürütülmüştür. Diğer bir deyişle, betonarme binalar dahil farklı tipte birçok yapısal sistem için can güvenliği performans hedefi sağlanırken ekonomik kayıpları azaltmak amacıyla yapısal onarımın uygulanabilmesi bu ülkelerin yönetmeliklerinde hedeflenmiştir. Benzer şekilde Türkiye Bina Deprem yönetmeliklerinde dünyada meydana gelmiş önemli depremlerden sonra saha gözlemlerine dayalı alınan dersler ve bilimsel araştırmalar kapsamında can güvenliğinin sağlanması yanında 50 yılda %10 aşılma olasılığına sahip depremler altında hasarların onarılabilir seviyelerde olmasına yönelik koşulların yerine getirilmesi amacıyla bir dizi değişiklik yapılmıştır[14],[15]. Bu açıdan bakıldığında 1998 Deprem Yönetmeliğinin kullanıma girmesiyle birlikte yönetmelikte yer alan asgari tasarım koşullarının yerine getirilmesi, hazır beton kullanımının yaygınlaşması, ve doğru boyutlandırmanın geometriye uygun yürütüldüğü projelerin uygulanmasının yaygınlaşmasıyla birlikte bina performans beklentileri açısından hasargörebilirlik çalışmalarında ülkemizde birçok araştırmacı tarafından 2000 yılı depreme dayanıklı tasarım açısından milat olarak kabul edilmektedir.

Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de yapılan son revizyonlar düşünüldüğünde geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş yapılarda kapasite tasarım ilkelerine uygun tasarım yanında önemli değişiklikler hayata geçirilmiştir[16],[17]. Yapılan değişiklikler arasında deprem tehlike haritalarının güncellenip tasarımda kullanılan deprem yer hareketi seviyesine uygun parametrelerin bir web uygulaması üzerinden sunulması, dayanıma göre tasarım kuralları yanında şekil değiştirmeye göre tasarımın yeni inşa edilecek yapılar için de yönetmelikte alternatif kullanımı yer almaktadır. Farklı deprem yer hareketi seviyelerini dikkate alacak şekilde yapısal performansın değerlendirilmesi için ihtiyaç duyulan tasarım spektrumları, güncelenen diri fay haritalarıyla uyumlu[18] 2018 Deprem Tehlike Haritasından[19] elde edilmiştir (Şekil 1). Detaylı geoteknik incelemenin yapıldığı zemin sınıfları dışında deprem yer hareketi seviyelerine göre elde edilen spektrumlarda yerel zemin koşullarının etkisi Amerikan yönetmeliğinde[9] olduğu gibi büyütme katsayılarıyla bulunmaktadır. Ayrıca özel yapıların tasarımında ihtiyaç duyulabilecek sabit deplasman bölgesinin, tasarımda dikkate alınması ve düşey tasarım spektrumunun tanımlanarak hesaplara dahil edilmesi yönetmelik kapsamında olan değişiklikler arasındadır.

Yürürlükte olan TBDY-2018'de kullanılan tasarım spektrumu daha önce 1999 deprem tehlike haritasına [20] göre beş deprem bölgesi için sadece etkin en büyük

yer ivmesinin tanımlandığı ve zemin sınıfına bağlı değişen 50 yılda bir aşılma olasılığı %10 olan tek bir deprem yer hareketi seviyesi için oluşturulan tasarım spektrumuyla kıyaslandığında önemli farklılıklar içermektedir. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-2007(ABYYHY-2007)'de yer alan beş deprem bölgesinin tanımlanması ve uzun periyotlu yapılar için önemli olan sabit deplasman bölgesinin dikkate alınmaması ciddi sıkıntılar yaratmıştır. Bu tip özel durumlarda mühendisler yabancı yönetmeliklere veya sahaya özel spektrum elde edilmesi yöntemine başvurmuştur. TBDY-2018 yönetmeliğinde sabit hız bölgesine ek olarak sabit deplasman bölgesinin yer alması uzun periyotlu yapıların değerlendirilmesi ve yönetmelikte tasarım spektrumuyla uyumlu olduğu bölgeleri gözleme olanağı sunmuştur. En büyük yer ivmesi yerine spektral girdi parametreleri ve büyütme katsayıları yardımıyla üç farklı bölgenin tanımlandığı deprem yer hareketi düzeyine göre tasarım spektrumu elde edilmektedir.



Şekil 1. Türkiye Deprem Tehlike Haritası [19]

TBDY-2018'de özel tasarım yaklaşımları altında değerlendirilmesi gerekli olan yüksek yapılar ve deprem yalıtımlı binalar için farklı deprem yer hareketi seviyelerini temsil eden dört farklı tekrar periyoduna sahip tasarımda kullanılacak spektrumlar tanımlanarak dayanıma göre tasarım ve şekil değiştirmeye göre tasarım ilkelerine göre ayrı ayrı performans hedefleri sunulmuştur.

Depreme dayanıklı yapıların inşa edilmesinde kapasite tasarım ilkelerinin yönetmelik kurallarına göre uygulanması gerekmektedir. Yönetmelikte tanımlanan düzensizliklerin mümkün olduğu en düşük seviyelerde tutulması için planda ve düşeyde uygun eleman düzenlemesine sahip bir tasarımın temel alınarak elemanların boyutlandırılması ve kapasite tasarım ilkeleriyle uyumlu ekonomik çözümler standartlarda yer alan asgari koşulların yerine getirilmesi sağlanabilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş binalarda hafif şiddette sıklıkla meydana gelen depremlerde binaların yapısal ve yapısal olmayan elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, nadir görülen şiddetli depremlerde ise can güvenliği sağlanırken kalıcı yapısal hasarın onarılabilir düzeyde kalması için tasarımda hasarın sınırlandırılması hedeflenmektedir. Şekil değiştirmeye göre tasarım yaklaşımları arasında zaman tanım

alanında dinamik analizlerin tercih edilmesi durumunda, TBDY-2018'e göre ortalama değerlerin kullanılması koşulu için seçilen deprem kaydı sayısı onbire yükseltilecek kayıttan kayıta gözlemlenecek farklılıkların tasarıma yansıtılması amaçlanmıştır.

Yürürlükte olan TBDY-2018 kapsamında ilk defa uzun periyotlu yüksek yapılar ve deprem yalıtımlı yapıların ayrı bölümler olarak yer almıştır. Yüksek binaların deprem yalıtımlı yapıların tasarımı için sunulan yönetmelik şartları sırasıyla Bölüm 13 ve Bölüm 14'te tanımlanmıştır. Bu çalışmada incelenen deprem yalıtımlı konut binalarının tasarımı, analizi ve test protokollerine yönelik kurallar TBDY-2018'in 14. Bölümünde yer alan koşullar dikkate alınarak zaman tanım alanında dinamik analizler gerçekleştirilmiştir.

Deprem yalıtım teknolojisi

Günümüzde mühendislik uygulamalarında kullanılan inşaat yapım teknikleri, malzeme bilimi ve bilgisayar teknolojisinde meydana gelen hızlı değişim sonrası daha önce yenilikçi bir teknoloji olarak nitelendirilen deprem yalıtımı olgun bir teknolojiye evrilmiştir. Deprem yalıtım teknolojisi ve enerji sönümleyici cihazlar teknolojinin getirmiş olduğu olanakları inşaat endüstrisinde etkin bir şekilde gözler önüne sermiştir. Konut, işyeri, okullar, hastane, veri merkezi, afet yönetim binaları, havalimanı terminalleri, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) depolama tankları, karayolu ve demiryolu köprüleri ve stadyumlar, gibi bir çok yeni inşa edilecek yapısal sisteminin deprem performansının artırılmasında ve performans değerlendirmesi sonucu güçlendirilmesine karar verilen binalarda deprem yalıtımı kullanılabilir [21]-[23]. Yüksek performans hedefinin koyulduğu hastane vb. özel yapılarda geleneksel inşa yöntemleriyle kıyaslandığında yalıtım teknolojisi uygulama kolaylığı ve yapısal güvenlik açısından tasarımcıya birçok avantaj sunmaktadır. Yapının servis ömrü boyunca Türkiye gibi yüzölçümünün %90'ından fazlasının aktif deprem kuşağında yer aldığı bir ülkede kayıpların azaltılması ve deprem dirençli mamur çevrenin yaratılmasında pasif kontrol sistemleri önemli ekonomik kazanımlar sağlamaktadır. 1960'lardan bu yana araştırma projelerinde farklı tipte deprem yalıtım sistemlerinin davranışı araştırmacılar tarafından ölçeklendirilmiş ve gerçek ölçekli testler yardımıyla gözlemlenmiş ve yapısal davranışı temsil eden sayısal modelleme yöntemleri geliştirilmiştir [24]-[28].

Deprem yalıtım teknolojisinin yapısal performans üzerinde olumlu etkileri Japonya, Amerika, İtalya ve Yeni Zelanda gibi yalıtım teknolojisinin geliştirildiği ve uygulamada öncü olan ülkelerde yürütülen araştırmalardan ve depremlerden sonra elde edilen saha bulguları çerçevesinde somut örneklerle ispatlanmıştır [29]-[31]. İnşaat endüstrisi 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerine kadar yalıtımlı bina sayıları incelendiğinde yenilikçi bir inşaat tasarım yöntemi olarak sunulan deprem yalıtım teknolojisine mesafeli bir duruş göstermiştir. Deprem mühendisliği açısından önemli etkileri olan bu iki depremden sonra yalıtım teknolojisinin üstün performansının

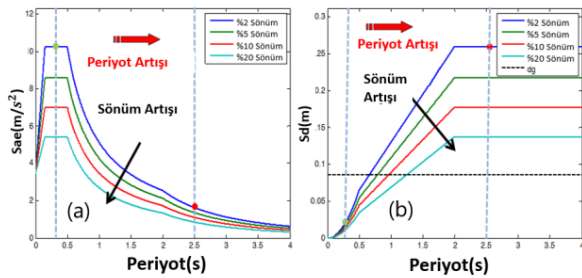
kanıtlanmasıyla yalıtımlı bina sayısı artmıştır. Deprem yalıtımlı bina sayısında benzer bir etki İtalya'da 2009 yılında meydana gelen Laquila depremi [32] ve Yeni Zelanda'da meydana gelen 2011 Christchurch depreminden [33] sonra gözlemlenmiştir. Yalıtım teknolojisinde öncü ülkeler arasında olan Japonya, deprem yalıtım sistemlerinin sadece özel tesislerde değil aynı zamanda konut tipi yapılarda da kullanımını teşvik etmek için hazırlanan onaylı kataloglar ve sıkı bir denetim mekanizmasıyla güvenlikten taviz vermeden prosedürleri hızlandırılması sonucunda artan konut uygulamalarıyla birlikte dünyada en çok deprem yalıtımlı konutun bulunduğu ülke haline dönüşmüştür.

Deprem yalıtım teknolojisi Türkiye'de ağırlıklı olarak yeni inşa edilen köprüler, havalimanı terminalleri, hastaneler, konutlar ve veri merkezlerinde kullanılmıştır. Türkiye'de ilk deprem yalıtımlı bina uygulaması 17 Ağustos 1999 Gölcük ve 12 Kasım 1999 Düzce depremlerinden sonra bir hastane binasında uygulanmıştır. 2011 Van depremi sonrasında hastane tipi kritik yapıların sadece yapısal sistemlerinin hasar seviyesinin kısıtlı tutulmasının işlevselliğinin korunması için yeterli olmadığı anlaşılmıştır [34]. Sağlık Bakanlığının 2013 Genelgesi [35] sonrasında ise 100 yatak kapasitesi üzeri olan, 2007 Afet Bölgelerinde Yapılacak olan Yapılar Hakkında Yönetmelik kapsamında birinci ve ikinci deprem bölgesinde yer alan sağlık tesislerinin inşasında deprem yalıtımının kullanılması zorunlu hale getirilmiştir. TBDY-2018'in taslak çalışmaları sırasında Yenidoğan ve Erdik dünyada kabul gören dört farklı yönetmeliği kullanarak tek modlu statik analizler açısından bir karşılaştırma yapmıştır [22]. 2018 yılından sonra ise kat ivmeleriyle ilgili değişikliklerle birlikte deprem yalıtımlı binaların tasarımında referans kaynak olarak TBDY-2018 kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler ışığında dünyada yer alan sismik yalıtımlı binalar arasında Türkiye'de yer alan Dr. Asaf Ataseven ve İstanbul'da inşa edilen Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi Kompleksleri, dünyanın en büyük taban yalıtımlı güçlendirilmiş ve yeni inşa edilmiş deprem yalıtımlı yapılarıdır [21]. 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonrasında yer yer sınırlı sayıda konutlarda kullanımına yönelik bir talep oluşmuştur. Deprem yalıtım birimi ve yapısal elemanların boyutlarının değişimi, yalıtım cihazlarının mecburi testleri dikkate alındığında tasarımcının yetkinliği ve projenin kısıtlarına göre %3-%12 arasında değişen ek maliyetler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca deprem yalıtımı konusunda yetişmiş mühendis sayısı, üniversitelerde deprem yalıtımı konusunda yetişmiş araştırmacı sayısının az olmasından dolayı Türkiye'de hastane binalarına göre konutlarda kullanımı kısıtlı kalmıştır [21].

2023 Kahramanmaraş Depremleri sonrasında Afet Bölgesi ilan edilen 11 ilin sınırları içerisinde yer alan 12 deprem yalıtımlı hastanenin göstermiş olduğu yapısal performans ulusal ve uluslararası camida büyük bir merak uyandırmıştır. Afet bölgesinde yer alan ve 2019 yılından sonra inşa edilen 100 yatak üzerinde kapasiteye sahip belirtilen deprem yalıtımlı hastaneler

TBDY-2018'de yer alan asgari kriterleri sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında özel yapı sınıfına giren deprem yalıtımlı hastaneler kendine has özellikleri olan 2023 Kahramanmaraş depremlerinin kayıtları (Yönelim, atım, yüksek yatay ve düşey yer ivmesi vb.) altında test edilmiştir.

Deprem yalıtım sistemi genel olarak altyapı ve üst yapı arasında oluşturulan yalıtım katmanı yardımıyla yapısal sistemin dinamik davranışında meydana gelen değişikliklerle birlikte yapılara etkileyecek deprem kuvvetlerinin azaltılmasını ve yer değiştirme taleplerinin üst yapı yerine yalıtım birimleri tarafından karşılanmasını amaçlamaktadır. Diğer bir deyişle yapısal olmayan elemanlar için önemli olan parametrelerden görel kat ötelemeleri ve kat ivmeleri tasarım depremi seviyesinde azaltılmaktadır. Deprem yalıtım sistemi yardımıyla hedeflenen bu olumlu etki ivme ve deplasman tasarım spektrumları kullanılarak gösterilmiştir. Şekil 2a'da yer alan grafik farklı sönüm oranlarında spektral ivme (S_{ae}) değerlerinde ve Şekil 2b'de yer alan spektral deplasman (S_d) değerlerinde meydana gelen değişikliği göstermektedir. Ortaya çıkan değişim ivmelerde ve deplasman talep parametrelerinde azalma neden olmaktadır.



Şekil 2. Deprem yalıtımının dinamik davranış açısından kazanımlarının grafiksel gösterimi[21], [24]

Türk bina deprem yönetmeliğinde (TBDY-2018) yalıtım sistemi ve yalıtım birimlerinin binanın tabanında kullanımıyla ilgili asgari şartlar tanımlanmıştır. Deprem yalıtımlı alçak (1-3 kat) ve orta yüksekliğe (4-8 kat) sahip konut yapılarında geleneksel binalara göre yalıtım periyodu 2-4 katı aralığında değişimler gösterebilmekte ve taban kesme kuvvetinde ve kat ivmelerinde ortaya çıkacak büyütme oranlarında önemli azalmalara neden olmaktadır.

Deprem yalıtımlı bir yapının tasarımında en önemli unsurlardan bir tanesi hedeflenen performans seviyesi ve bu hedefe yönelik seçilecek olan yalıtım sisteminin yer değiştirme talepleri altında kararlı bir davranış göstermesidir. Tasarım sırasında hesaplanan yer değiştirme talepleri yapının sismik boşluk olarak ifade edilen ve serbestçe hareket etmesi için gerekli olan asgari mesafeden yola çıkılarak bulunmalıdır. Bu değer yalıtım biriminin altında kalan altyapı sisteminin elemanlarına aktarılacak kesme kuvveti ve yalıtım birimlerinin geometrisine göre değişmektedir. Bu bağlamda, deprem yalıtımlı yapılarda hata oranının en aza indirilmesi ve dinamik davranışın yalıtım birimleri açısından gözlemlenerek istenilen kaliteli üretim hedeflerinin sağlanması için geleneksel yöntemlere

göre daha farklı bir test prosedürü uygulanmaktadır. Taban yalıtımlı binaların analizi, tasarımı ve test protokollerinin yer verildiği TBDY-2018'in 14. Bölümü hazırlanırken EN-15129 [36], EN-1337[37] ve ASCE/SEI 7-10'da[8]yer alan kurallar Türkiye inşaat pratiğine göre uyarlanmıştır. Deprem yalıtımlı yapıların tasarımı ve analizinde kullanılan Eurocode 8[38]'de TBDY-2018 yönetmelik çalışmaları sırasından detaylı olarak incelenmiştir.

Yapısal analiz modelleri

Yapıların deprem risk durumlarının tespit edilmesi amacıyla, deprem tehlikesiyle uyumlu olacak şekilde yapıların deprem performansının doğrusal veya doğrusal olmayan yöntemlerle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında yapısal performansın artırılması için uygulanan deprem yalıtımlı bina ve geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş betonarme moment aktaran çerçeve olmak üzere iki farklı yapısal sistem yürütülen analizlerle kıyaslanmıştır. Bu tip bir kıyaslamaya gidilmesinin ana nedenlerinden bir tanesi 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra yazar tarafından gerçekleştirilen saha incelemelerinde perde duvar içermeyen moment aktaran betonarme çerçeve sistemlerin yüksek deprem talep parametreleri altında göçmesi veya göçmenin önlenmesi performans düzeyine erişmiş olmasından kaynaklanmaktadır[3]. Bu açıdan bakıldığında yeni inşa edilecek veya mevcut bir binanın güçlendirilmesinde yenilikçi teknolojilerin kullanımıyla deneyimlenecek kazanımlar doğrusal olmayan yöntemlerle araştırılmıştır.

Değerlendirilecek olan iki farklı tip konut yapısından betonarme ankastre temelli olarak tasarlanacak yapısal sistem betonarme moment aktaran çerçeve olarak seçilmiştir. İkinci yapıysa yenilikçi teknolojilerin yapısal performans üzerinde etkisini anlamak ve uygulama sayısının artışı teşvik etmek amacıyla konut yapılarında deprem yalıtımlı betonarme moment aktaran çerçeve sistem olması tercih edilmiştir. Binaların deprem sırasında düşey ve yatay yükler altında davranışını etkileyen birçok etken ve belirsizlikler (deprem kaynak mekanizması özellikleri, ivme değerlerinin değişimi, zemin büyütmesi, hasar dağılımı vb.) mevcuttur. Deprem sırasında deprem kayıtlarının içeriği üzerinde kaynak özelliklerinin yaratacağı etkiler, binanın lokasyonunda yer alan jeolojik formasyonlar ve geoteknik koşullar ve yapısal sistemin mimarisi sonucu dikte edilen özellikleri binanın yapısal sisteminin tasarımının karmaşıklık düzeyine bağlı olarak değişen oranlarda bu belirsizlikleri arttırmaktadır. Bu açıdan her iki sistemin temel özellikleri TBDY-2018'de yer alan koşullara göre simetrik, düzensizlik içermeyecek şekilde oluşturulmuştur. Her iki sistemin özellikleri kısaca aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır.

Betonarme moment aktaran çerçeve

Türkiye'de yer alan bina stoğunun büyük bir oranı geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş olan ankastre temelli yapılardan oluşmaktadır. Geleneksel inşaat

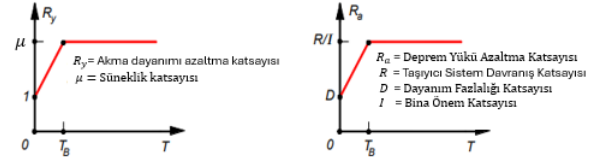
yapım tekniğinden kastedilen, yapı ve üst yapı yüklerinin zemine aktarıldığı temel sisteminin arasında herhangi bir ara yüzey elemanın yer almadığı ve sistem tarafından oluşturulan transfer mekanizması ile doğrudan bir yük aktarımının gerçekleştiği sistemlerden bahsedilmektedir. Yapılarda deprem talep parametreleri dikkate alınarak depreme dayanıklı yapı tasarımı felsefesine göre yapısal hasarın yapı elemanlarının belirlenen özel bölgelerinde oluşması hedeflenmektedir. Konut tipi yapılar geleneksel yöntemlere göre tasarlanarak analiz edilmesi durumunda 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve 475 yıl dönüş periyoduna sahip Tasarım depremi yer hareketi düzeyine (DD-2) göre tasarlanmaktadır. Türk Bina Deprem Yönetmeliğinde yapısal performansın belirlenmesi için “Kesintisiz Kullanım”, “Sınırlı Hasar”, “Kontrollü Hasar” ve “Göçmenin Önlenmesi” olmak üzere dört farklı performans hedefi tanımlanmıştır. Geleneksel ankastre temelli binalar için DD-2 deprem yer hareketi düzeyinde “Kontrollü Hasar” performans hedefinin sağlanması gerekmektedir. Diğer bir deyişle insanların can güvenliğinin sağlanması ve ortaya çıkacak hasarın öngörüldüğü şekilde onarılabilecek düzeylerde olması şartı sağlanmalıdır.

TBDY-2018’e göre depreme dayanıklı tasarlanan bir yapının büyük ve orta ölçekli depremlere maruz kalması durumunda elastik olmayan deformasyon yoluyla oluşacak hasarın kolon ve kirişlerin belirlenen özel bölgelerinde karşılanması amaçlanmaktadır. Bu nedenle, moment aktaran betonarme bir çerçevenin tasarımında süneklik ve kapasite tasarım ilkelerinin uygulanmasıyla elastik olmayan deformasyonlara direnme yeteneği ana değerlendirme kriteridir.

Bina yüksekliği 20 metre altında kalan orta yükseklikte veya birkaç kattan oluşan yapıların çok serbestlik dereceli bir sistem olarak doğrusal olmayan analizi sadece detaylı üstyapı tasarımıyla mümkün olabilir. Birinci modun hakim olduğu yapısal sistemlerde ise genel deprem davranışı (taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme talepleri) doğrusal olmayan elastik ötesi modellere dayalı yöntemler yardımıyla elde edilmektedir.

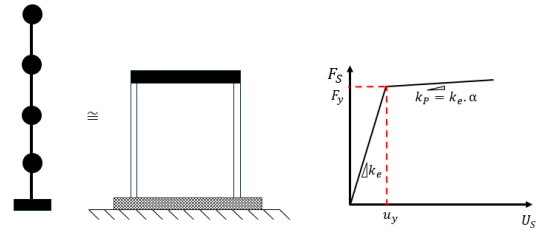
Bu kapsamda moment aktaran betonarme bir çerçeve olarak seçilen yapısal sistem elastik olmayan tek serbestlik dereceli bir betonarme bina olarak dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan analizler ön tasarım ve nihai tasarım aşamalarını kapsayacak şekilde differansiyel denklem takımlarının çözümüyle yapılmıştır. Tek serbestlik dereceli sistemin dinamik davranışının tanımlanabilmesi için yapının kütlesi, elastik ötesi davranışını gösteren çift doğrusal bir kuvvet-yerdeğiştirme zarf eğrisiyle temsil edilmiştir. Ekonomik çözümlerin elde edilmesi amacıyla TBDY-2018’de yer alan dayanıma göre tasarım çerçevesinde, modal tek serbestlik dereceli sistemin öngörülen süneklik kapasitesi, dayanım talebi ilişkisi ve buna bağlı olarak belirlenen deprem yükü katsayıları Şekil 3’te sunulmuştur. Zaman tanım alanında yürütülecek çalışmada kullanılacak olan moment aktaran

çerçevelerde taşıyıcı sistem davranış katsayısı, $R=8$ ve bina önem katsayısı, $I=1$ olarak alınmış ve çift eğrili sistemin özellikleri bu bağlamda belirlenmiştir.



Şekil 3. Kapasite tasarım ilkelerine göre belirlenen katsayıların hakim periyotla değişimi (TBDY-2018)

Şekil 4’te kapasite tasarım ilkelerine göre tasarlanan yapının doğrusal olmayan elastoplastik davranışını gösteren tek serbestlik dereceli sistem ele alındığında, Denklem 1’de verilen m , yapının kütlesini, c viskoz sönüm sabitini, $F_R(t)$ yapının rijitliği kullanılarak yapısal merkezleme kuvvetini hareket denkleminin bir bileşeni olarak temsil etmektedir. Şekil 4’te verilen k_e ve k_p sırasıyla elastik ve elastik ötesi rijitliği, α katsayısıysa k_p ’nin k_e ’ye oranını ifade etmektedir. Ankastre temelli sistem için α katsayısı 0.1 olarak alınmıştır.



Şekil 4. Eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ve çift doğrusal çevrim zarfı

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + F_R(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Denklem sisteminde eşdeğer sönüm oranı ve radyan cinsinden açılmal frekans kütleden bağımsız hale getirilirse Denklem 2’de yer alan forma dönüştürülmektedir. Denklem 1-2’de yer alan $\ddot{u}(t)$, $\ddot{u}_g(t)$, $\dot{u}(t)$ ve $u(t)$ tek serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminde sırasıyla, göreceli ivme, yer hareketi ivmesi, göreceli hız ve yer değiştirmenin zamana göre değişimini göstermektedir. Denklem 2’de yer alan ξ ve ω parametreleri tek serberstlik dereceli sistemin eşdeğer sönüm oranı ve açılmal frekans değerlerini ifade etmektedir.

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

Çözümlemede kullanılan Bouc-Wen modelinde [30-32] kullanılan parametreler ve detayları Bölüm 4.2’de deprem yalıtımlı bina için aktarılmıştır. Çözümlerde Matlab tarafından sunulan Sıradan Differansiyel Denklem (ODE) çözüm algoritması kullanılmıştır. Betonarme bina için sönüm oranı % 5 olarak alınmıştır.

Deprem yalıtımlı bina modeli

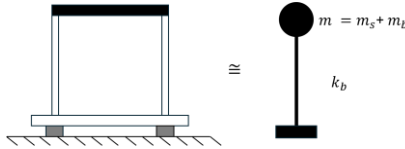
Deprem yalıtımlı ve geleneksel yöntemlere göre inşa edilmiş yapıların performans hedefleri TBDY-2018’e göre birbirinden farklılıklar içermektedir. Deprem

$$\frac{F(t)}{m} = \left(\frac{2\pi}{T_{1s}}\right)^2 u(t) + \frac{Q_d}{W} gz(t) \quad (6)$$

$$u_y \dot{z} + \gamma |\dot{u}(t)| z |z|^{n-1} + \beta \dot{u}(t) |z|^n - u(t) = 0 \quad (7)$$

Bouc-wen modelinde kullanılan β , γ ve n boyutsuz parametreleri çevrimlerin şeklini kontrol eden parametrelerdir [39]-[42] **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** Çift doğrulu zarf eğrisi ile uyumlu çevrimlerin elde edilmesi için gerekli düzenleme yansıtılmıştır.

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz 2475 ve 475 yıl dönüş periyoduna sahip sırasıyla DD-1 ve DD-2 deprem düzeyi için deprem yalıtımlı yapının TBDY-2018'de yer alan performans kriterleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Yapısal performans taban kesme kuvveti ve yerdeğiştirme talepleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çok serbestlik dereceli sistemlerin benzer şekilde uygulanmasıyla katlar arası görece ötelenme oranı ve sismik performans seviyesinin kabulüne göre değerlendirilmesi mümkündür. Yerdeğiştirme talebinde ortaya çıkan artışlar yalıtım birimi maliyetlerini etkilerken, kat ivmelerinde ortaya çıkacak azalmalar çok serbestlik dereceli sistemin detaylı analizlerini içerdiğinden dolayı bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Analiz sonuçlarının ve yapısal performansın irdelenmesinde zaman tanım alanında yerdeğiştirme belirlenirken etkin periyot deprem yönetmeliğinin önerdiği şekilde toplam taban kesme kuvvetinin belirlenmesinden faydalanan İvme-Yerdeğiştirme-Davranış-Spektrumundan (İYDS) TBDY-2018 yönetmeliğiyle uyumlu hibrit bir yaklaşım olarak benimsenmiştir.



Şekil 6. Rijit kütleyle sahip deprem yalıtımlı bina

Deprem yalıtımlı sistemlerde kullanılan cihazların tasarımında yeterli merkezlemenin TBDY-2018 asgari koşullarıyla sağlandığı kabul edilmiştir. İstenen bu ön şart sadece deprem yalıtım sisteminin doğal titreşim periyodu değeri ve akma dayanımının değil aynı zamanda deprem kayıtlarının özelliğine de bağlı olarak değişmektedir.

Üst yapı tasarımında kullanılan taban kesme kuvveti DD-2 deprem yer hareketi seviyesi için Denklem-8 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 8'de yer alan $S_{ae}^{(DD-2)}$, tasarım deprem yer hareketi seviyesi olan DD-2 spektrumunun T_D deprem yalıtım periyodundaki spektral ivme, W binanın deprem sırasındaki toplam kütleyle karşı gelen ağırlığı, η_D tasarım deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısını ve R , deprem yükü azaltma katsayısını göstermektedir. DD-1 deprem yer hareketi seviyesine karşı gelen parametrelerin değiştirilmesiyle en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın T_M

etkin titreşim periyodu için taban kesme kuvveti hesaplanabilmektedir.

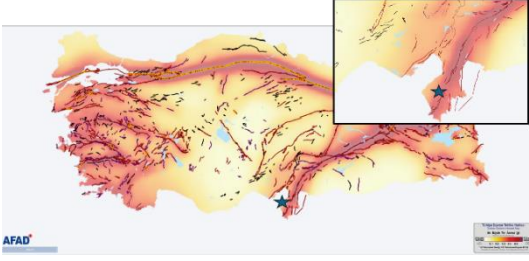
$$V_{D,M} = \frac{S_{ae}^{(DD-2)}(T_{D,M})W\eta_{D,M}}{R} \quad (8)$$

Sayısal analizlerde kullanılacak lokasyon seçimi ve afet bölgesinin depremselliği

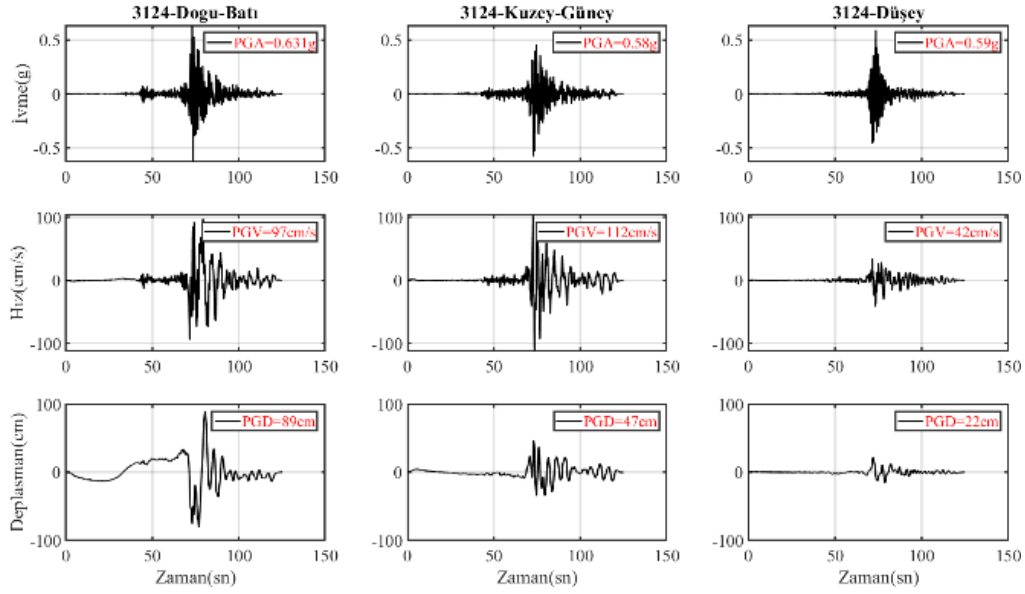
Türkiye'de son 30 yıllık süreçte yaşanan 1999 Gölçük ve Düzce depremleri, 2011 Van Depremleri, Doğu Anadolu fay hattında önemli kayıpların yaşandığı 2020 Elazığ ve Ege'de meydana gelen 2020 Bayraklı depremleri topluma deprem gerçeğini hatırlatmasına rağmen Kahramanmaraş depremleri son 124 yıllık süreçte Türkiye'yi etkileyen ve resmi istatistiklere dayalı olarak kayıplar açısından en büyük can ve ekonomik kaybın yaşandığı depremler olmuştur. Aynı gün içerisinde içinde gerçekleşen, AFAD tarafından merkez üssü Pazarcık, $M_w=7.7$ ve merkez üssü Elbistan, $M_w=7.6$ olarak açıklanan iki büyük deprem geniş bir coğrafyayı etkilemiş ve resmi rakamlara göre 53.347 kişinin ölümüne ve 107.213 kişinin yaralanmasına neden olmuştur. Beklenen senaryodan farklı bir durumun ortaya çıkaran bu iki deprem risk azaltımından afet yönetimine kadar eksiklerimizin gün yüzüne çıkmasına neden olmuştur. Ardı sıra gerçekleşen ana şoklar, büyük artçılar, depremlerin oluş mekanizmaları incelendiğinde kendine has kaynak özellikleri, deprem kayıtlarının yüksek ivme, hız ve spektral ivmelere ulaşması, afet bölgesinde yer alan bazı illerde yerel zemin koşullarının olumsuzlukları ve deprem kayıtlarının uzun güçlü yer hareketi sürelerine sahip olması yapısal sistemler üzerinde ciddi talep parametreleri ortaya çıkartarak bina hasarının artmasına neden olmuştur. Afet bölgesi ilan edilen 11 il arasında Kahramanmaraş, Hatay ve Gaziantep illeri deprem mühendisliğinin özel konularının birebir gözlemlendiği ve yıkımın en şiddetli olduğu iller olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bölgede konumlanmış deprem yalıtımlı hastane binalarının olması ve oldukça fazla sayıda deprem kaydının afet bölgesi sınırlarında elde edilmesi, deprem yalıtımlı hastanelerde gözlemlenen yüksek yapısal performans, bu teknolojinin konutlarda kullanımının pratik yaklaşımlar sunularak standartlaştırılmasını gerektirmektedir. Çalışmalarda kullanılacak olan kayıtların seçimi ve ölçeklendirmesinde inşaat alanı olarak Hatay'da yer alan AFAD 3124 nolu güçlü yer hareketi istasyonu seçilmiştir (Şekil 7). Seçilen istasyondan elde edilen zaman tanım alanında İvme-Hız-Deplasman grafikleri, deprem kayıtlarının frekans içeriği ve deprem yalıtımlı yapıların tasarımında kullanılan tasarım spektrumlarıyla kıyaslanmış davranış spektrumları sırasıyla Şekil 8-10'da

gösterilmiştir.

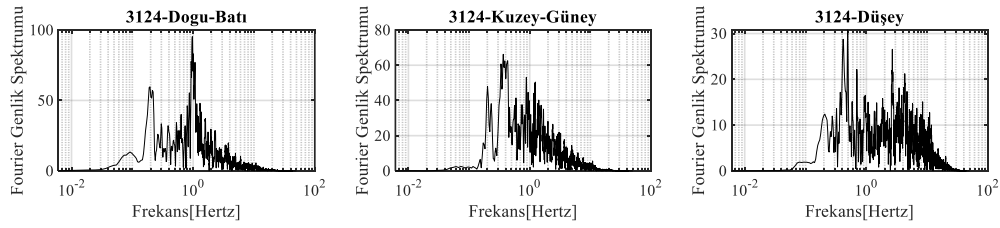
Şekil 7. Yapısal sistemler için seçilen konum [35]



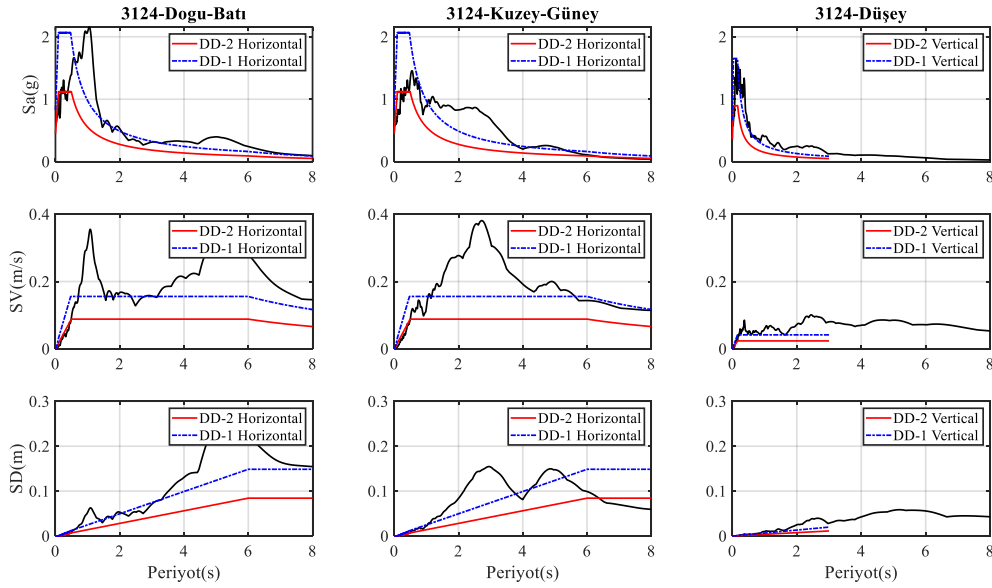
Şekil 8'de elde edilen yüksek ivme değerlerine ek olarak, Şekil 10'da AFAD-3124 istasyonundan alınan yatay ve düşey kayıtlarının spektral ivme, hız ve deplasman değerlerinin DD-2 ve DD-1 deprem yer hareketi düzeylerini aştığı görülmektedir[43].



Şekil 8. AFAD 3124 İstasyonundan elde edilen İvme-Hız-Deplasman grafikleri



Şekil 9. AFAD 3124 kayıtlarının frekans içerikleri



Şekil 10. TBDY-2018 DD-1 ve DD-2 Deprem yer hareketi seviyeleriyle AFAD-3124 kaydından elde edilen davranış spektrumunun kıyaslanması

Deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi

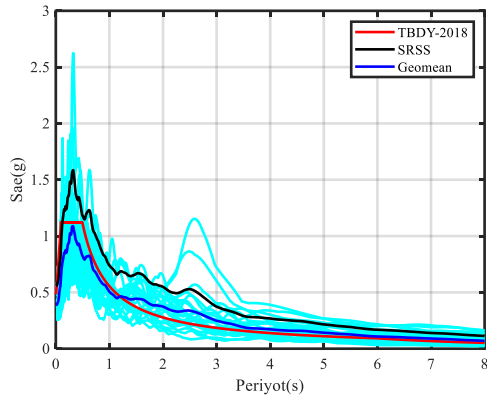
Bilgisayar teknolojisinin hızlı gelişimi sonrası zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Girdi dosyası olarak kullanılacak deprem kayıtları üç farklı şekilde elde edilebilir. Bunlardan birincisi spektrum uyumlu yapay girdi dosyaları oluşturmak ve ikinci yöntemse deprem kaynak özelliklerinin kullanıldığı benzeşim yöntemiyle kayıtların elde edilmesidir. Fakat bu iki yöntemin doğru bir şekilde kullanılması özel uzmanlık gerektirmesi ve endüstride çalışan mühendisler tarafından kullanımının zor olmasından dolayı çok tercih edilmemektedir. Üçüncü yöntem olarak veri tabanlarında yer alan ulusal veya uluslararası deprem izleme istasyonlarında kaydedilmiş kayıtların kullanılması mühendisler tarafından tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında da yapısal analizler açısından TBDY-2018'e göre herhangi bir kısıtlamanın olmaması ve özel bir uzmanlık gerektirmemesinden dolayı üçüncü yöntem tercih edilmiştir. Deprem kayıtlarının seçiminde spektral şekil dikkate alınarak doğrusal ölçekleme uygulanmıştır.

Hedef spektrum olarak seçilen inşaat alanı için 2475 ve 475 yıllık dönüş periyoduna sahip 50 yılda aşılma olasılığı %2 ve %10 olan en büyük deprem yer hareketi düzeyi(DD-1) ve tasarım deprem yer hareketi düzeyi(DD-2) için Türkiye Deprem Tehlike haritasından elde edilen kısa periyot spektral parametresi S_{DS} , bir saniye değerinde elde edilen spektral ivme S_{D1} , sabit deplasman bölgesinin başladığı sabit $T_L=6s$ değeri ve Z_D zemin sınıfı dikkate alınarak inşaat alanı olarak seçilen AFAD 3124 nolu güçlü yer hareketi istasyonunun konumu için Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterildiği gibi DD-1 ve DD-2 spektrumları hesaplanmıştır[43].

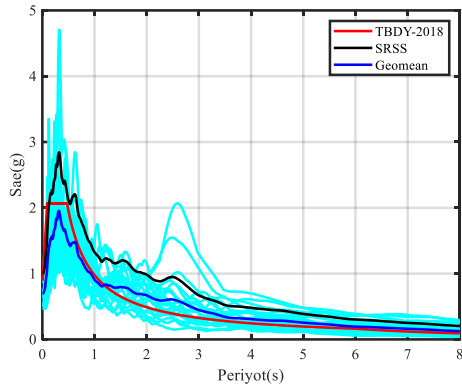
Deprem kayıtlarının seçiminde pratikte Türkiye'de sıklıkla başvurulan PEER yer hareketi veritabanı kullanılmıştır [44]. Kayıt seçimi ve ölçeklendirilmesi özel bir uzmanlık alanı olduğundan endüstride çalışan mühendislerin tercihen uyguladığı deprem büyüklüğü, zemin sınıfı ve faya veya yırtılmanın ortaya çıktığı mesafeye olan uzaklık baz alınarak kayıt çifti seçimi yapılmıştır. Diğer bir deyişle deprem yönetmeliğinde aranan deprem kayıtlarının seçiminde asgari koşulların sağlanması için herhangi bir özel ölçeklendirme ve seçim yöntemi uygulanmadan, sadece depremin büyüklüğü, zemin sınıfı ve uzaklık temelinde tanımlanan kriterleri sağlayacak, tasarım spektrumunun şekliyle uyumlu %5 sönüm oranı altında gerçekleştirilen lineer ölçeklendirme kullanılarak kayıt seçimi yapılmıştır. Diferansiyel denklem takımları kullanılarak zaman tanım alanında tek yönlü olarak uygulanacağından ve TBDY-2018'de etkin deprem yükü yönteminde kullanılan katsayılar değerlendirilerek, deprem kayıt çiftinin seçiminde geometrik ortalamalarına göre doğrusal ölçeklendirme tercih edilmiştir. Kayıtların seçimi ve ölçeklendirmesi yapılırken TBDY-2018'de yer alan periyot aralığında tanımlanan spektral değerler eşit ağırlıklı olarak atanmıştır.

Deprem kayıtlarının seçiminde TBDY-2018'e göre elde edilen tasarım spektrumuyla uyumlu 11 deprem kayıt çiftinin seçiminde, betonarme moment aktaran çerçeve sistemi için hakim titreşim periyodunun 0.2-1.5 katının ve deprem yalıtımlı konut yapısının hakim titreşim periyodunun 0.5-1.25 katının incelendiği periyot aralığı seçim yapılırken kullanılmıştır. Deprem yalıtımlı yapılar hakim titreşim periyotları karşılaştırıldığında geleneksel yapılara göre daha uzun periyotlu yapılar olmasından dolayı kayıtlar taranırken seçiminin yapılacağı periyot aralığı DD-1 seviyesinde daha geniş bir periyot aralığına sahiptir. Kayıt

seçiminde Kahramanmaraş ilinde meydana gelen depremlerden önce öngörülen senaryo depreminin büyüklüğü, zemin sınıflandırmasına göre kayma dalgası hızının 360 m/s-800 m/s aralığında değişimini dikkate alan hedef spektrumla uyumlu kayıtlar aranmıştır. DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi düzeyleri için spektral şeklin uyumlu olmasından dolayı aynı kayıt seti hedef spektrumla uyumlu olacak şekilde farklı katsayılarla lineer ölçeklendirme işlemine tabi tutulmuştur. Ölçeklendirme sonrası seçilen kayıt setinin tüm kayıtları, kayıt çiftlerinin geometrik ortalamaları (Geomean) ve karelerinin karekökünün (SRSS) ortalamalarıyla karşılaştırması Şekil 11-12’de gösterilmiştir.

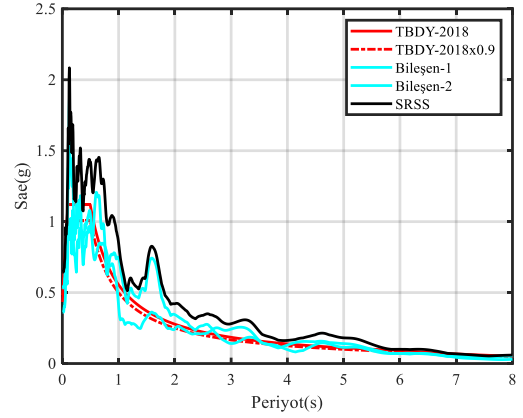


Şekil 11. DD2-Deprem yer hareketi düzeyi ve seçilen deprem kayıtlarının davranış spektrumu



Şekil 12. DD1-Deprem yer hareketi düzeyi ve seçilen deprem kayıtlarının davranış spektrumu

Örnek olması açısından yapılan ölçeklendirme prosedürüne göre Imperial Valley-06 Delta istasyonundan alınan kayıtları Türkiye Sismik Tehlike Haritasından elde edilen parametrelere göre elde edilmiş DD-2 tasarım spektrumuyla kıyaslanmış hali Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13. DD2-deprem yer hareketi düzeyine göre ölçeklendirilmiş Imperial Valley depremi yatay bileşenlerinin davranış spektrumu

Tablo 1. Doğrusal olmayan analizler için seçilen kayıtlar

Deprem	Mw	Deprem İstasyonu	Kayıt Bileşeni	Rjb (km)
Imperial Valley-06	6.53	Delta	DLT262 DLT352	22.03
Victoria Mexico	6.33	Chihuahua	CHI102 CHI192	18.53
Superst. Hills-02	6.54	El Centro Imp. Co. C.	ICC000 ICC090	18.2
Landers	7.28	North Palm Springs	FHS000 FHS090	26.84
Chi-Chi_Taiw.-04	6.2	CHY030	CHY030N CHY030E	30.46
Chi-Chi_Taiw.-04	6.2	CHY101	CHY101E CHY101N	21.62
El Mayor-C_Mexico	7.2	Calexico Fire Station	CXO360 CXO090	19.12
El Mayor-C_Mexico	7.2	El Centro Array #11	E11360 E11090	15.36
Darfield_N.Z.	7	Christchurch C. College	CCCCN26W CCCCN64E	19.89
Darfield_N.Z.	7	Christchurch Hospital	CHHCN01W CHHCS89W	18.4
Darfield_N.Z.	7	Papanui High School	PPHSS33W PPHSS57E	18.73

Veri tabanında yer alan kayıtlar arasından seçim yapılırken, kayıtların özellikle herhangi bir hız itkisi içermemesi ve belirli bir depremin özelliklerinin kayıt setinde hakim etkiye sahip olmamasına özen gösterilmiştir. Hız itkisinin depremin kaynak özelliklerine göre farklılıklar içereceği ve sahaya özel tehlike analizlerinde dikkate alınması özel bir durum olduğundan dolayı bu çalışmanın dışında bırakılmıştır.

Sayısal analiz sonuçları

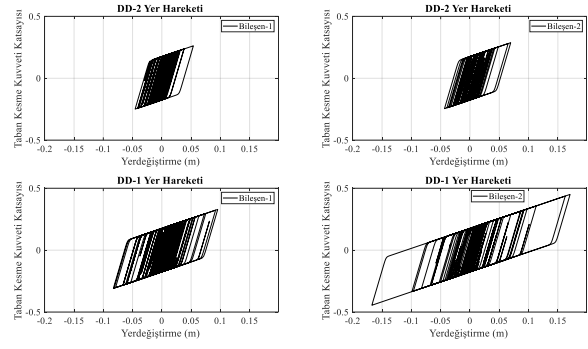
Yürütülen bu çalışma kapsamında, iki farklı yapısal sistemin performansları kıyaslanmış ve en doğru sonuçları verdiği kabul edilen doğrusal olmayan dinamik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılırken girdi dosyası olarak bir önceki bölümde kayıt seçimi ve ölçeklendirme detayları paylaşılan depremler altında hazırlanan diferansiyel denklem düzenlemeleriyle pratik ve hızlı bir değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Performans değerlendirme yöntemleri arasında doğrusal olmayan dinamik analizlerin tek serbestlik dereceli modellerle araştırıldığı birinci modun hakim olduğu geleneksel

moment aktaran çerçevelerden oluşan konut tipi, simetrik, düzenli yapılar ve deprem yalıtımlı sistemler için doğru sonuçlar vermektedir. Doğrusal olmayan statik analizlere göre uygulamada mühendisler tarafından uygulanan doğrusal olmayan dinamik analizlerin kullanımının sınırlı kalmasının ana nedenleri arasında zaman tanım alanında analizlerin yapılmasının zaman alıcı, maliyetli ve zor olması algısıdır. Fakat, bu çalışmada aktarıldığı gibi herhangi bir paket program veya ticari uygulamaların kısıtlarından bağımsız bir yaklaşımla belirli yapısal sistemlerin performansına dair önemli öngörüler sunan hızlı çözümler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan statik yöntemlerle kıyaslandığında deprem kayıtlarının frekans içerikleri, yapının göstereceği çevrimsel dinamik davranış ve kayıttan kayda değişen davranış özelliklerini yansıtmaması açısından çıktılar sunan hızlı yöntemdir.

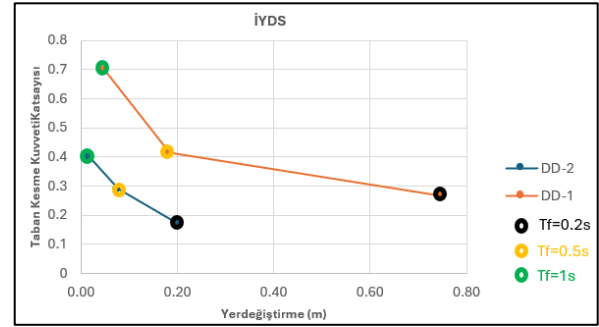
Betonarme moment aktaran çerçeve sistem

Betonarme moment aktaran çerçevenin tasarımı TBDY-2018'e göre DD-2 deprem yer hareketi seviyesi dikkate alınarak Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, $R=8$, Dayanım fazlalığı katsayısı, $D=3$ ve elastik ötesi rijitliğin elastik rijitliğine oranı 0.1 alınarak zaman tanım alanında gerçekleştirilmiştir. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde DD-2 tasarım depremi seviyesinin üzerinde birçok kaydın elde edilmesinin avantajıyla zaman tanım alanında analizler için seçilen deprem kaydı çiftleri DD-1 deprem yer hareketi seviyesine göre ölçeklendirilerek, yer değiştirme talepleri incelenip, sahada kaydedilen AFAD-3124 istasyonu kayıtlarının sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yapısal sistem için referans olarak doğal titreşim periyodu $T=0.2, 0.5, \text{ ve } 1s$ alınarak ortaya çıkacak davranış farklılıkları moment aktaran betonarme çerçeve sistemler için hesaplanmıştır. İkincil rijitliğin birinci rijitliğe oranı 0.1 kabul edilmiştir. $T=0.5s$ doğal titreşim periyoduna sahip betonarme moment aktaran çerçevenin DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi seviyesinde kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 14'te gösterilmiştir. Toplamda 132 zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sunulan pratik model yardımıyla göreceli olarak kısa bir sürede tamamlanmıştır. Yerdeğiştirme taleplerinin değerlendirmesinde her bir bileşenden elde edilen sonucun karelerinin karekökü alınarak hesaplanmıştır.

Moment aktaran betonarme çerçeve sistem ve deprem yalıtımlı betonarme moment aktaran çerçeveler için gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerden elde edilen ortalama yerdeğiştirme değerleri ve yapısal sistem tasarımında kullanılan taban kesme kuvvetleri sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 18'de gösterilmiştir. Seçilen deprem kayıtları altında elde edilen eğriler mühendislere ön tasarım ve nihai tasarım aşamasında grafiksel olarak kıyaslanacak veriler sunmaktadır.



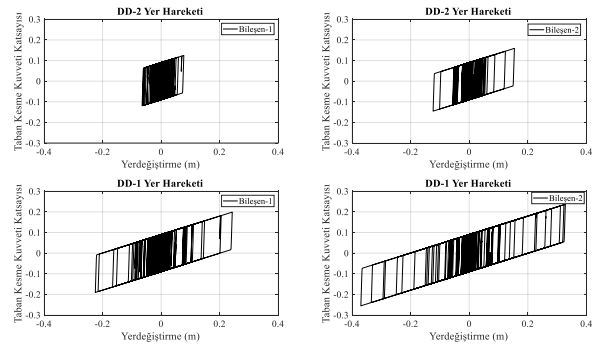
Şekil 14. DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde yalıtımlı yapının Landers kaydının iki bileşeni altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri



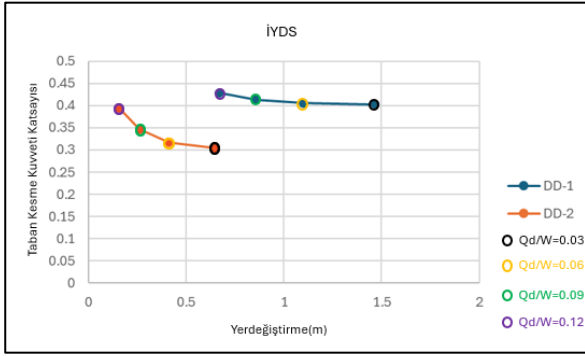
Şekil 15. Zaman tanım alanında ankastre temelli moment aktaran çerçeve için elde edilen talep parametrelerinin ortalamaları

Deprem yalıtımlı betonarme çerçeve sistem

Deprem yalıtımlı betonarme çerçeve için yalıtım sisteminin periyodu 3s olarak tasarlanırken karakteristik dayanımının yapının toplam ağırlığına oranı dört farklı yalıtım sistemi için göz önüne alınmıştır. Deprem yalıtım sistemi için Qd/W oranı 0.03, 0.06, 0.09 ve 0.12 alınıp, zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde kullanılmıştır. Bu dört sistem için DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde toplamda 176 kayıt altında yapılan analizler değerlendirilmiştir. DD-2 ve DD-1 seviyelerinde kullanılan doğrusal olmayan tek serbestlik dereceli sistemin davranışı Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde yalıtımlı yapının Landers kaydının iki bileşeni altında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri



Şekil 17. Deprem yalıtımlı yapının DD-1 ve DD-2 yer hareketi seviyesinde İYDS yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçları

Ankastre temelli yapısal sistemler için elde edilen değerler arasında özellikle $T=1s$ periyoda sahip bir binada geleneksel yöntemlere göre boyutlandırma ve tasarımı açısından zorlayıcı olacaktır. Deprem yalıtımı sayesinde ankastre temelli yapılar için yüksek olan yerdeğiştirme talepleri yalıtım sistemi tarafından karşılanarak aynı zamanda üst yapının tasarımında kullanılacak kesme kuvveti %40-42 arasında sınırlandırılmıştır. Ölçeklendirilmiş olan 11 kayıt çifti dikkate alınarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde en büyük deprem yer hareketi seviyesinde $T=0.2s$ periyoda sahip ankastre temelli sistemin taban kesme kuvveti DD-1 deprem yer hareketi seviyesinde yaklaşık olarak % 38-42 oranında azalmıştır.

2023 Kahramanmaraş depremlerinde Hatay ilinde seçilen konumdan alınan kayıtlar altında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları, doğrusal olmayan analizlerde kullanılan itki içermeyen kayıtlardan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında dört farklı deprem yalıtım sistemi için DD-1 seviyesinde seçimi yapılan kayıtların ortalama yerdeğiştirme değerlerini Qd/W değerlerinin 0.09, 0.06, 0.03 arasında değişmesi durumunda sırasıyla yaklaşık olarak %7-18.5 oranında aştığı gözlemlenmiştir. Qd/W oranının en yüksek olduğu yalıtım sistemi için yerdeğiştirme değerleri %14 daha düşük değerler vermiştir. Benzer şekilde üst yapının tasarımında kullanılacak olan kesme kuvvetinde Qd/W değerinin 0.09'dan 0.03'e değişiminde kayıt setinden elde edilen değere göre %20-98 arasında değişen daha yüksek değerler elde edilirken en yüksek orana sahip sistem için yaklaşık % 12 daha düşük değer elde edilmiştir.

Sonuç

Son 80 yıllık süreçte 1939 Erzincan depreminden başlayarak önemli kayıpların yaşanması sonrasında deprem yönetmelikleri değişen aralıklarla güncellenmiştir. Depreme dirençli kentlerin oluşturulmasında yenilikçi teknolojilerin kullanımı ve rasyonel yaklaşımların niceliksel tespiti göreceli olarak büyük avantajlar sunmaktadır. Yapısal sistemlerin işlevsellikleri dikkate alındığında, toparlanma periyodu olarak tanımlanan sürecin kısaltılması ve bir binaya

uygulanacak bakım veya onarım masraflarının azaltılması için gerekli olan yapısal performans iyileştirilmelerini amaçlayan yaklaşımlar dünyada kabul görmüş modern yönetmeliklerde halen standartlaştırılmamıştır. Sağlık Bakanlığının 2013 yılında yayınlanan genelgesinden sonra ülkemizde kullanımı artan pasif kontrol sistemleri arasında bulunan deprem yalıtım teknolojisi için TBDY-2018'te gerekli olan tasarım ve analiz şartları açıklanmıştır.

Bu çalışma kapsamında deprem yalıtımlı sistemlerin tasarım hedeflerinin ve değerlendirmesini hızlandıracak pratik ve hızlı bir değerlendirme yöntemi okuyucuya sunulmuştur. TBDY-2018'e göre seçimi ve ölçeklendirmesi gerçekleştirilen kayıt seti altında ortaya çıkan deprem talebi, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde Hatay ili sınırlarında bulunan DD-1 tasarım deprem yer hareketi seviyesini aşan inşaat alanı için hesaplanan deprem talepleriyle yapısal güvenlik ve performan açısından kıyaslanmıştır.

Ankastre temelli yapıya ve deprem yalıtımlı üst yapıya etkileyen taban kesme kuvveti katsayısı ve yerdeğiştirme talepleri zaman tanım alanında seçilen deprem yer hareketlerine göre değerlendirilmiştir. Deprem yalıtımlı yapılarda güvenli sınırdan kalmak amacıyla zaman tanım alanında yerdeğiştirme değerleri hesaplanırken taban kesme kuvvetinin İvme-Yerdeğiştirme-Davranış-Spektrumuyla belirlenmiştir. Zaman tanım alanında toplamda 316 doğrusal olmayan analiz deprem yalıtımlı ve ankastre temelli konut tipi yapıların genel davranışlarını kıyaslamak için gerçekleştirilmiştir. Kahramanmaraş depremlerinde yüksek depremselliğin gözlemlendiği bir konumda elde edilen deprem kayıtları altında sahaya özel durumların dikkate alınmaması durumunda ortaya çıkacak olumsuzluklar ise kullanılacak tasarım parametreleri ve analiz yöntemlerinin kullanımının gerekliliğiyle gösterilmiştir.

Analiz sonuçları deprem kayıtlarının seçiminden ölçeklendirilmesine, sayısal modellemede kullanılan modellerin yetkinliğini sorgulatmıştır. Çalışma kapsamında deprem yalıtımlı sistemler için hızla dayalı çevrimsel yükleme koşulları ve deprem kayıtlarının ortogonal yönlerde etkileşimli plastisite modelleri dikkate alınmamıştır. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hız itkisi içeren yakın saha depremlerinin ilerleyen süreçte araştırmacılar tarafından deprem yalıtımlı sistemler açısından daha detaylı bir şekilde ve farklı istasyonların dahil edilerek incelenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada analizlerde kullanılan konum için AFAD sismik tehlike harita verileri ve belirtilen konumdan AFAD veritabanı tarafından sağlanan deprem kayıtları kullanılmıştır. Çalışmanın yazar tarafından çalışmanın akışı ve kavramlarının geliştirilmesi aşamasında değerli yorumlarıyla destek olan Dr. Jones'a şükranlarımı sunar. Makalenin değerlendirme sürecinde yorumlarıyla çalışmanın zenginleştirilmesine

katkı sağlayan ve değerli zamanlarını ayıran hakemlere ayrıca teşekkür ederim.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

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

Yazar Katkıları

Makalede yer alan tüm analizler ve sayısal analizler için geliştirilen yazılımlar yazar tarafından hazırlanmıştır.

Kaynaklar

- [1] Kahramanmaraş ve Hatay Depremleri Raporu (2023). Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı
- [2] [Büyük Depremler - B.Ü. KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi \(boun.edu.tr\)](https://www.boun.edu.tr)
- [3] C. Yenidoğan, "6 Şubat 2023 Depremleri ve Saha Gözlemlerine Dayalı Bina Hasarları Hakkında Ön Değerlendirme", tjce, vol. 35, no. 5, 2024, doi: 10.18400/tjce.1335742.
- [4] Di Sarno, L.; Yenidogan, C.; Erdik, M. Field evidence and numerical investigation of the Mw = 7.1 October 23 Van, Tabanlı and the Mw > 5.7 November Earthquakes of 2011. Bull. Earthq. Eng. 2013, 11, 313–346.
- [5] Hancılar, U., C.Tüzün, C.Yenidoğan, M.Erdik, 2010. ELER Software-A new tool for urban loss assessment, Natural Hazards and Earth System Sciences, December 2010
- [6] Afet ve Acil Durum Başkanlığı,(2018). TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete; 30364, 2018.
- [7] İmar ve İskan Bakanlığı (1975). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [8] ASCE-07, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, 2010.
- [9] Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures(ASCE 7-16), (2017). American Society of Civil Engineers.
- [10] BSL. Building Standard Law of Japan, 2000.
- [11] Midorikawa, Mitsumasa, et al. "Development of seismic performance evaluation procedures in Building Code of Japan." Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, Paper. No. 2215. 2000.
- [12] Yenidogan, C.; Yokoyama, R.; Nagae, T.; Tahara, K.; Tosauchi, Y.; Kajiwara, K.; Ghannoum, W. Shake table test of a full-scale four-story reinforced concrete structure and numerical representation of overall response with modified IMK model. Bull. Earthq. Eng. 2018, 16.
- [13] ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, Redwood City (1996)
- [14] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (1997). Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Ankara.
- [15] Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007(DBYBHY-2007), (2007).
- [16] Aydınoglu, N.M., Celep, Z., Özer, E., Özyayın, K., (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Eğitim Sunumları, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- [17] Sucuoğlu H., "New improvements in the 2019 building earthquake code of Turkey", Turk. J. Earthq. Res. 1(1), 63-75. 2019
- [18] Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmacı H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. 1/1.250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Özel Yayınlar Serisi, Ankara-Türkiye.
- [19] AFAD (2018) Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-1>
- [20] TDBH, 1996. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- [21] Yenidogan, C., 2021. Earthquake-resilient design of seismically isolated buildings: A review of technology. Vibration, 4(3), 602-647.
- [22] Yenidogan, C., & Erdik, M. (2016). A comparative evaluation of design provisions for seismically isolated buildings. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90, 265-286.
- [23] Yenidogan, C.; Erdik, M. The State of art in seismic isolation and energy dissipation devices, Vol. 83, No.2, pp. 49–59. J. Jpn. Soc. Seism. Isol. (Menshin) 2014,83, 49–59.
- [24] Yenidogan, C. Karma Deprem Yalıtım Sistemlerinin Deneysel Performans Değerlendirmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 23(69), 767-779.
- [25] Yenidogan, C.; Uckan, E.; Erdik, M. Shake Table Tests of a Passive-Hybrid Isolation System. In Proceedings of the Second Conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Istanbul, Turkey, 9–11 September 2013.
- [26] Takaya K, Ota K, Yenidogan C, et al. Comprehensive wood dwelling tests for Post-and-Beam and Shear-Wall structures reflecting

- foundation boundaries. *Earthq Eng Resil.* 2024; 3: 5-32. doi:10.1002/eer2.66
- [27] Nagae T, Uwadon S, Yenidogan C, et al. The 2019 full-scale shake table test program of wood dwellings. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September 27-October 2, 2021.
- [28] Takahashi T, Nagae T, Uwadon S, et al. Stiffness, ultimate strength capacity and cyclic loading deterioration characteristics of two different wood-structure dwellings following the current Japanese practice. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September 27-October 2, 2021.
- [29] AIJ, Preliminary Reconnaissance Report of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake (English edition), Architectural Institute of Japan, Tokyo, 1995.
- [30] Stewart, J. P., Conte, J. P., & Aiken, I. D. (1999). Observed behavior of seismically isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 125(9), 955-964.
- [31] Pan, P., Zamfirescu, D. A. N., Nakashima, M., Nakayasu, N., & Kashiwa, H. (2005). Base-isolation design practice in Japan: introduction to the post-Kobe approach. *Journal of Earthquake Engineering*, 9(01), 147-171.
- [32] Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M., Salvatori, A. (2014). Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use. In: Ansal, A. (eds) *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, vol 34. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07118-3_14
- [33] Whittaker, D. (2015, September). Recent developments in seismic isolation in New Zealand (2015). In *14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*.
- [34] Di Sarno, L., Yenidogan, C. & Erdik, M. Field evidence and numerical investigation of the Mw=7.1 October 23 Van, Tabanlı and the MW>5.7 November earthquakes of 2011. *Bull Earthquake Eng* 11, 313–346 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9417-0>.
- [35] Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı 2013, 3 Sayılı Genelgesi. Deprem Yalıtımlı olarak İnşa Edilecek Yapılara Ait Proje ve Yapım İşlerinde Uyulması Gereken Asgari Standartlar, 2013.
- [36] European Standard EN 15129:2010 for Anti-seismic Devices, European Committee for Standardization, November 2010.
- [37] EN, BS. "1337-3; Structural Bearings-Part3: Elastomeric Bearings." British Standards Institution: London, UK (2005).
- [38] Eurocode, 2004. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, European Committee for Standardization.
- [39] Bouc R (1967) Forced vibrations of a mechanical system with hysteresis. In: Proc 4th conf on nonlinear oscillations, Prague, Czechoslovakia
- [40] Bouc R (1971) Modèle mathématique d'hystérésis. *Acustica* 21:16–25. (A mathematical model for hysteresis)
- [41] Wen YK. Approximate method for nonlinear random vibration. *Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE)* 1975; 102(4): 389–401.
- [42] Kikuchi, M., Black, C. J., and Aiken, I. D. 2008. "On the response of yielding seismically isolated structures." *Earthquake Eng. Struct.Dyn.*, 37(5), 659–679.
- [43] AFAD – Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (2023). Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi, AFAD-TADAS, <https://tadas.afad.gov.tr>
- [44] Ancheta, T., et al., [2013], "PEER NGA-West2 Database," Report No. PEER 2013/03, University of California, Berkeley, May.