



Betonarme binalarda sismik izolatör ve viskoz sönümleyici kullanılması ve deprem davranışına etkisinin nümerik olarak incelenmesi

Numerical investigation of the effect of using seismic isolators and viscous dampers on earthquake behavior in reinforced concrete buildings

Burak Çakıl¹ , Ömer Faruk Osmanlı^{2,*} , Muhammet Karaton³

^{1,2,3} Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 23119 Elazığ Türkiye

Öz

Depreme dayanıklı bina tasarımı, yapısal hasarı ve can kaybını azaltmayı amaçlayan inşaat mühendisliğinin kritik bir alanıdır. Pasif kontrol sistemleri can kaybını ve yapısal hasarları önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak bu sistemlerin birlikte kullanımı üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, betonarme binalarda kullanılan yapısal kontrol sistemleri incelenmiş ve farklı sistemlerin birlikte kullanılmasının deprem tepkileri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. 10 katlı bir betonarme bina için ankastre mesnetli, ankastre mesnet + viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili sistemler modellenmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne uygun olarak SAP2000 programında gerçekleştirilmiştir. Bulgular, sismik izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanımının kat deplasmanlarını önemli ölçüde azalttığını ortaya koymaktadır. Göreli kat deplasmanları dikkate alındığında, viskoz sönümleyicilerin ve sismik izolatörlerin birlikte kullanıldığı yapılarda, sadece viskoz sönümleyicili yapılara göre %30'dan fazla azalma gözlemlenmiştir. Sismik izolatör sisteminin kullanıldığı yapı sistemleri, kat ivme değerleri açısından viskoz sönümleyici kullanılan yapı sistemlerine kıyasla daha fazla azalma sağlamaktadır. Ayrıca, bu sistemlerin dikkate alınan tüm parametreler üzerinde tekil olarak da etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Betonarme binalar, Pasif kontrol sistemleri, Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, Viskoz sönümleyici

1 Giriş

Türkiye'nin aktif bir deprem kuşağında yer alması, yapı mühendisliğinde deprem güvenliğini daima öncelikli bir mesele haline getirmiştir. Ülkede geçmişte yaşanan büyük depremler, binaların depremlere karşı dayanıklılığını sağlama gereksinimini yeniden gündeme getirmiştir [1,2]. Deprem yarattığı can ve mal kayıplarını minimuma indirmek amacıyla, yapıların sismik performansını iyileştiren yeni mühendislik yaklaşımlarına duyulan ihtiyaç giderek büyümektedir. Bu bağlamda, yapısal kontrol sistemleri, deprem etkilerini azaltmak ve binaların güvenliğini artırmak için son yıllarda yaygın olarak

Abstract

Seismic-resistant building design is a critical aspect of civil engineering aimed at minimizing structural damage and loss of life. Passive control systems significantly reduce loss of life and structural damage. However, studies on the combined use of these systems are limited. In this study, structural control systems used in reinforced concrete buildings were examined and the effects of using combined different systems on earthquake responses were compared. A 10-story reinforced concrete building was modeled with fixed support, fixed support + viscous dampers, seismic isolation, and seismic isolation + viscous dampers. Nonlinear time-history analyses were conducted using the Turkish Seismic Code and SAP2000 software. The results demonstrate that combining seismic isolators and viscous dampers significantly reduces both story displacements and inter-story drifts. Considering the relative floor displacements, a decrease of more than 30% was observed in structures where viscous dampers and seismic isolators were combined, compared to structures with only viscous dampers. Structures utilizing seismic isolation systems demonstrate a significant reduction in floor acceleration values compared to structures employing viscous dampers. Furthermore, it has been observed that these systems have a significant individual impact on all considered parameters.

Keywords: Reinforced concrete structures, Passive control systems, Lead rubber bearing, Viscous damper

kullanılan yenilikçi çözümler sunmaktadır. Yapısal kontrol sistemleri, deprem sırasında binaların maruz kaldığı kuvvetleri kontrol etmek veya bu kuvvetlerin yapısal elemanlar üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan teknolojilerdir. Temelde pasif, aktif, yarı aktif ve hibrit sistemler olarak sınıflandırılan bu sistemlerin her biri farklı koşullarda etkili olmaktadır. Pasif kontrol sistemleri, bir enerji harcamadan veya dışarıdan bir müdahale olmadan yapının deprem gibi dış kuvvetlere karşı titreşimlerini azaltarak çalışır. Pasif kontrol sistemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biri viskoz sönümleyicilerdir [3]. Viskoz sönümleyiciler, yapının hareketi sırasında ortaya

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ofosmanli@firat.edu.tr. (Ö. F. Osmanlı)

Geliş / Received: 07.12.2024 Kabul / Accepted: 18.02.2025 Yayınlanma / Published: 15.04.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1597724

çıkan enerjiyi sönümleyerek yapının hasar görmesini engeller. Ayrıca, sismik izolasyon sistemleri de pasif kontrol yöntemleri arasında dikkat çekmektedir. Bu sistemler, binayı temelden ayırarak depremin neden olduğu yatay hareketleri binaya daha az ileterek yapının görece daha az etkilenmesini sağlar [4,5]. Depremler sırasında, özellikle yüksek katlı binaların güvenliği ve stabilitesi, sadece yapının malzeme özelliklerine bağlı değildir; aynı zamanda yapı sisteminin tasarımı ve kullanılan mühendislik çözümleri de büyük bir öneme sahiptir. Bu noktada pasif kontrol sistemleri, hem maliyet etkinliği hem de uygulama kolaylığı ile öne çıkmaktadır. Viskoz sönümleyiciler ve sismik izolasyon sistemlerinin bir arada kullanılması, yapıların titreşim performansını önemli ölçüde artırarak, deprem güvenliği açısından büyük bir avantaj sağlar [6]. Bu tür sistemler, özellikle deprem kuşağında yer alan Türkiye gibi ülkelerdeki yapı projelerinde yaygın olarak kullanılmalıdır. Viskoz sönümleyicilerin binaların titreşimlerini azaltmadaki başarısı, mekanik prensipler ve yapısal analizlerle desteklenmiştir. Constantinou ve Symans [7] enerji sönümleyicilerin yapısal performansı artırmadaki rolünü detaylı bir şekilde ele almış, sönümleyicilerin yapıların görece kat ötelemelerini, katlardaki ivmeleri ve plastik kesit dönmelerini azaltarak dayanıklılığı artırabileceğini belirtmiştir. Özellikle viskoz sönümleyicilerin deprem anındaki enerji sönümleme kapasitesinin yüksek olduğu vurgulanmış ve bu sistemlerin, yapıların dinamik davranışlarını nasıl olumlu etkilediği üzerinde durulmuştur. Gemen [8] pasif kontrol sistemlerinin dinamik yükler altındaki etkinliğini incelemiştir. Bu çalışmada, özellikle yüksek katlı binalar gibi büyük yapılarda pasif kontrol sistemlerinin maliyet etkinliği ve uzun vadeli performansı vurgulanmıştır. Çeşitli uluslararası uygulamalardan elde edilen veriler ışığında, pasif kontrol sistemlerinin kullanıldığı projelerde daha düşük bakım maliyetleri ve artan yapısal güvenlik sağlandığı görülmüştür. Gemen ayrıca, bu sistemlerin depremlerin yanı sıra rüzgar yükleri gibi diğer dinamik yükler karşısında da etkili olduğunu belirtmiştir. Işık [9] sürtünmeli izolatörler ile viskoz sönümleyicilerin bir arada kullanıldığı sistemlerin deprem yükleri altındaki davranışlarına odaklanmıştır. Bu çalışmada, sürtünme katsayısının değiştirilmesiyle yapıların farklı deprem koşulları altında nasıl tepki verdiği araştırılmıştır. İki farklı yapı modeli üzerinde yapılan analizlerle, sürtünmeli izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin uyumlu bir şekilde kullanıldığında, yapıların enerji sönümleme kapasitesinin nasıl arttığı detaylandırılmıştır. Işık'ın bulguları, bu iki sistemin birlikte kullanımının yapısal güvenlik açısından önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir. Ras ve Boumechra [10] viskoz sönümleyici eklenen binaların performansını inceleyerek, bu tür sistemlerin yapısal güvenliği nasıl iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmalarında, sönümleyici kullanılan binalarda yer değiştirme oranlarının %62 oranında azaldığı, en çok gerilen elemanlarda ise moment ve kesme kuvvetlerinde %45'ten fazla azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, sönümleyici kullanılan binaların daha az hasar görme eğiliminde olduğunu ve büyük deprem yükleri altında bile stabilitesini koruyabileceğini ortaya koymuştur. Özellikle çok katlı

binalarda bu tür sistemlerin sağladığı güvenlik avantajları çalışmada detaylı olarak analiz edilmiştir. Mohebbi vd. [11] doğrudan yer değiştirmeye dayalı bir tasarım yöntemi kullanarak, viskoz sönümleyicilerin üst yapıların dinamik performansını nasıl iyileştirdiğini analiz etmişlerdir. Öztürk [12] Türkiye'deki mevcut okul yapılarının viskoz sönümleyicilerle güçlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Üç bloklu bir okul binası üzerinde yapılan analizlerde, viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı modellerde burulma katsayılarının ve görece kat ötelemelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle düzensiz yapı planına sahip binalarda sönümleyici elemanların kullanılmasıyla, yapının daha dengeli bir şekilde yük taşıdığı ve sismik taleplerin etkin bir şekilde azaltıldığı gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada sönümleyici elemanların sürekli katlara yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiş, bu yerleşimin özellikle burulma etkisi yüksek yapılarda daha etkili sonuçlar verdiği vurgulanmıştır.

Geleneksel yöntemlerle inşa edilen ankastre mesnetli binalara kıyasla sismik izolasyon sistemleri ve viskoz sönümleyici kullanılarak inşa edilen binaların sismik tepkileri önemli ölçüde azalmaktadır [13, 14]. Bu azalma, kullanılan yöntem, cihaz türü ve yerleştirme konfigürasyonlarına göre değişkenlik göstermektedir. Literatürdeki çalışmalarda genellikle ankastre mesnetli yapı ile pasif kontrol sistemlerinden herhangi birinin kullanılması durumu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Pasif kontrol sistemlerinin beraber kullanılması üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır [6]. Bu çalışmada, yapısal pasif kontrol sistemlerinden kurşun çekirdekli kauçuk izolator ve viskoz sönümleyicinin beraber kullanılması durumu farklı kombinasyonlarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla 10 katlı betonarme bir bina farklı mesnetlenme yöntemleri ile modellenmiş ve doğrusal olmayan sismik analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, bina ankastre mesnetli olarak modellenmiştir. Daha sonra, aynı bina ankastre mesnetle birlikte viskoz sönümleyicili olarak modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Üçüncü modelde bina, sismik izolatörlü olarak tasarlanmış; son olarak ise bina, sismik izolatörle birlikte viskoz sönümleyicili olarak modellenmiştir. Sismik izolator türü olarak hem uygulamada hem de literatürdeki çalışmalarda yaygın olarak kullanılması sebebiyle kurşun çekirdekli kauçuk izolator seçilmiştir. Viskoz sönümleyici olarak ise yine uygulamada yaygın olarak kullanılan bir firmanın sönümleyici tiplerinden biri seçilmiştir. Bu dört farklı yapı modelinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan nümerik analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, toplam deplasman, görece kat deplasman ve katlarda meydana gelen ivme sonuçları karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Yapısal kontrol sistemleri

Yapısal kontrol sistemleri, deprem kuvvetleri karşısında yapıların sönümleme kapasitelerini artırmayı hedeflemektedir. Doğal afet durumlarında işlevini sürdüreceği olan köprüler, hastaneler ve enerji santralleri gibi kritik yapıların tasarımında farklı bir yaklaşım gereksinimi ortaya çıkmıştır. "Yapı kontrol sistemi" adı verilen bu

sistemler, binalarla birlikte hareket eden ve yapım aşamasında veya sonrasında yerleştirilen cihazlar aracılığıyla dinamik kuvvetlere karşı direnç gösterebilen bir mekanizmaya sahiptir. Bu cihazlar, deprem nedeniyle oluşan deplasman ve kesit zorlanmalarını belirli bir seviyede tutarak yapının daha güvenli hale gelmesini sağlar [15].

Yapısal kontrol sistemleri 4 temel gruba ayrılmaktadır ve bu sınıflandırma Şekil 1’de gösterilmektedir.

- I. Pasif kontrol sistemler
- II. Aktif kontrol sistemler
- III. Karma kontrol sistemler
- IV. Yarı aktif kontrol sistemler

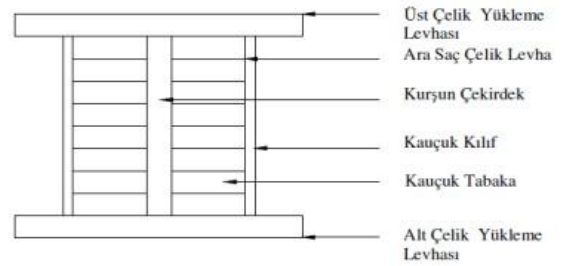
Çalışmada pasif kontrol sistemleri kullanılacağından diğer yapısal kontrol sistemlerine ayrıca değinilmemiştir.

2.2 Pasif kontrol sistemleri

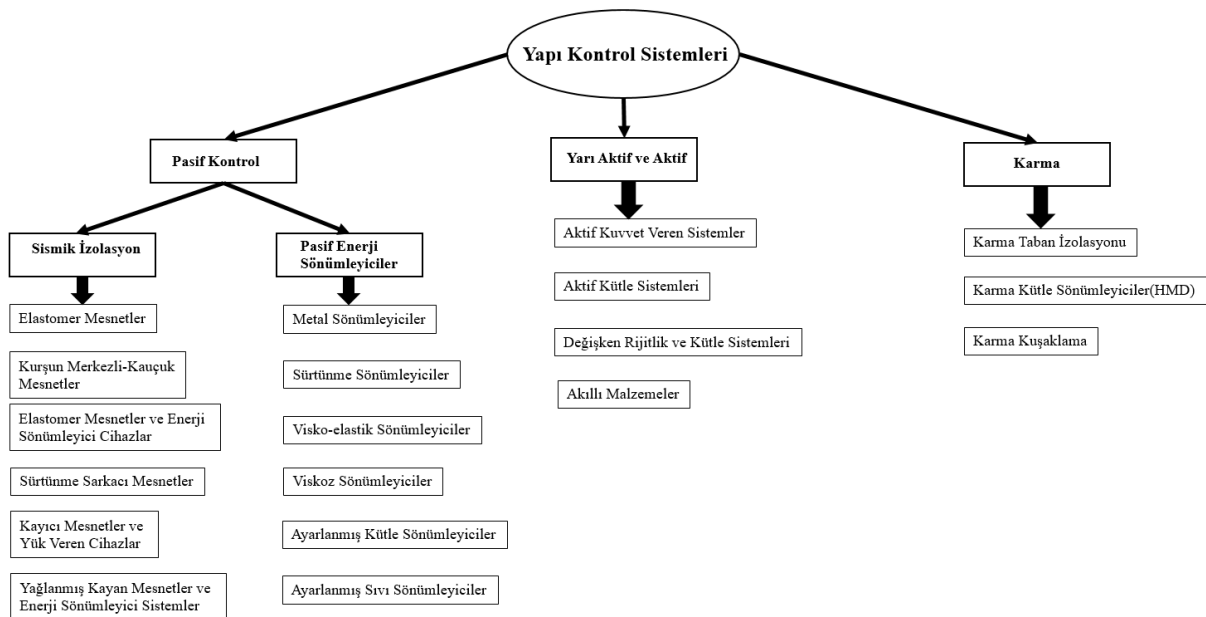
Bu sistemler, yapıya eklenen özel elemanlar aracılığıyla sisteme giren enerjiyi ya ısıya dönüştürür ya da enerjiyi üzerine alarak sönümleme sağlar. Bu sistemlerin hesaplamaları basit olup, maliyetleri de aktif kontrol sistemlerine nazaran düşük seviyededir [16]. Pasif kontrol sistemlerinde dışarıdan bir kuvvet uygulanmadığı için bir güç kaynağına ihtiyaç duyulmaz. Ancak, bu sistemler aktif kontrol yöntemleri kadar etkili değildir. Yapılar, ömürleri boyunca karşılaşılabilecekleri olası deprem büyüklükleri dikkate alınarak tasarlanır; ancak tasarlanan seviyeden daha büyük bir deprem meydana geldiğinde yapıda büyük deplasmanlar oluşabilir. Pasif kontrol sistemleri, sismik izolasyon sistemler ve pasif enerji sönümleyiciler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Sismik izolasyon sistemleri ise genellikle temel ile yapı arasına yerleştirilerek, zeminden gelen kuvvetlerin yapıya aktarımını sınırlar. Pasif enerji sönümleyiciler ise sisteme eklenen araçlarla yapının enerji yutma kapasitesini artırır [9]. Bu çalışmada, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ve viskoz sönümleyiciler üzerinde durulacağı için diğer yapısal kontrol sistemlerine ayrıca yer verilmemiştir.

2.2.1 Kurşun çekirdekli kauçuk tipi izolatörler (LRB)

Kurşun çekirdekli kauçuk tip izolatörler (LRB), ilk olarak 1970’li yılların sonlarına doğru Yeni Zelanda’da tanıtılmış ve kullanılmaya başlanmıştır [18]. O zamandan itibaren bu izolatörler, Japonya ve ABD gibi ülkelerde sismik izolasyon amacıyla geniş çapta kullanılmıştır [19]. Şekil 2’de izolatörün kesit görünümü verilmiştir. Yapısal açıdan incelendiğinde, düşük sönüm sağlayan kauçuk mesnetlerin merkezine kurşun çekirdek eklenerek sönüm oranı artırılan elastomer esaslı bir sistem olduğu görülmektedir. Bu sistemin sönüm oranı %15 ile %35 arasında değişmektedir. Kurşun kauçuk mesnetlerin yatay kuvvet-deformasyon ilişkisi ise Şekil 3’de gösterildiği üzere iki aşamalı bir davranış sergilemektedir [20]. Şekil 3’de K_{eff} izolatörün etkin rijitliğini, K_d akma sonrası rijitliği, d_y akma yer değiştirmesini ve Q_d ise yerdeğiştirmenin sıfır olduğu andaki kuvvet kesişim değerini göstermektedir ve kurşunun akma dayanımı ile kurşun çekirdeğin kesit alanı çarpımı yardımıyla elde edilmektedir.

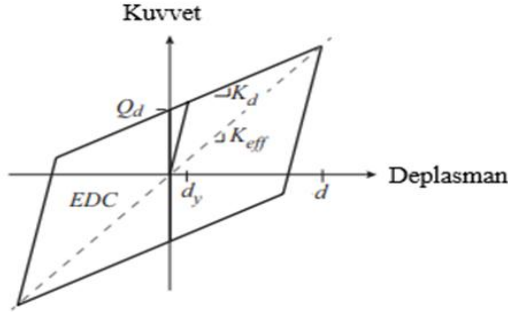


Şekil 2. LRB tipi izolatörün kesit görünümü [21]

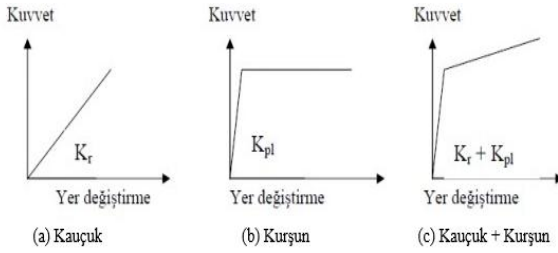


Şekil 1. Yapısal kontrol sistemleri [17]

LRB tipi izolatörlerde, kurşun elemanı elastomer mesnetin rijitliğini artırıcı bir etkide bulunur. Bu mesnetler, düşük yük seviyelerinde, hem yatay doğrultuda hem de dikey doğrultuda sert bir davranış sergilerler. Kurşun çekirdek, dışarıdan çelik levha katmanlarıyla sarılır ve kayma gerilmesi altında şekil değiştirerek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Kurşunun akma dayanımı 10 MPa olup, bu değer üzerine çıkıldığında mesnetin yatay rijitliği önemli ölçüde düşer. Kurşunun plastik şekil değiştirmesi ile ortaya çıkan sönüm, histeretik bir döngü ile modellenmektedir [22].



Şekil 3. LRB tipi izolatörün kuvvet-deplasman davranışı [23]



Şekil 4. LRB tipi izolatörün kuvvet yer değiştirme ilişkisi [24]

Kurşun çekirdek, mesnetin enerji yutma kapasitesini artırarak yatay yer değiştirmeyi sınırlar. LRB tipi izolatörler, kurşunun sönümleyici etkisi ile kauçuğun dengeleyici özelliklerini birleştirir. Bu kombinasyon, deprem sırasında mesnette biriken enerjiyi kullanarak, deprem sonrası yapıyı eski haline döndürebilecek bir kuvvet sağlar. Kompozit bir yapıya sahip olan kurşun çekirdekli kauçuk mesnet, kurşunun ve kauçuğun özelliklerini bir araya getiren bir davranış sergiler (Şekil 4). Ancak, kurşun çekirdekli izolatörün deformasyona uğradıktan sonra test edilemiyor olması, bu izolatör türünün en önemli dezavantajı olarak ifade edilmektedir [25].

Kauçuk izolatör kullanılarak inşa edilen yapıların lineer olmayan analizlerinde sismik izolatörler için kullanılan parametrelerin TBDY-2018'e göre hesabında ilk olarak izolatörün etkin rijitliği (K_{eff}) aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [26]:

$$K_{eff} = \frac{F}{D} \quad (1)$$

Burada F izolatöre etki eden yatay kuvveti, D ise bu kuvvet etkisi altında meydana gelen yatay yer değiştirmeyi göstermektedir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin akma dayanımı (F_y) ise yaklaşık olarak karakteristik dayanıma (F_Q) eşit olup,

$$F_Q \cong F_y = A_p \tau_{yp} \quad (2)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu denklemde A_p kurşun çekirdeğin alanını, τ_{yp} ise kurşun malzemenin kayma akma gerilmesini göstermektedir [26]. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin başlangıç rijitliği (k_1), akma sonrası rijitlik (k_2) elde edildikten sonra hesaplanmaktadır ve başlangıç rijitliği, yaklaşık olarak akma sonrası rijitliğin 10 katı olarak belirlenmektedir [27, 28]. Akma sonrası rijitlik değeri Denklem 3 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$k_2 = G_v (A_r / T_r) \quad (3)$$

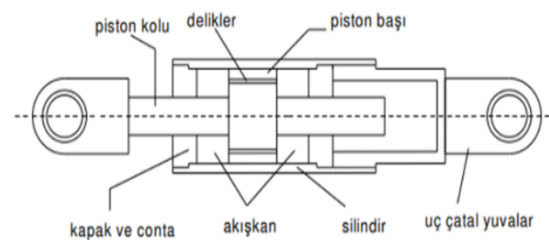
Bu denklemde G_v elastomer malzemenin kayma modülünü, A_r yüke maruz elastomer katmanlardan yalnızca birinin yüzey alanını, T_r ise toplam elastomer kalınlığını göstermektedir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin düşey rijitlik (k_v) hesabında ise Denklem 4 kullanılmaktadır.

$$k_v = \frac{E_v A_r}{T_r} \quad (4)$$

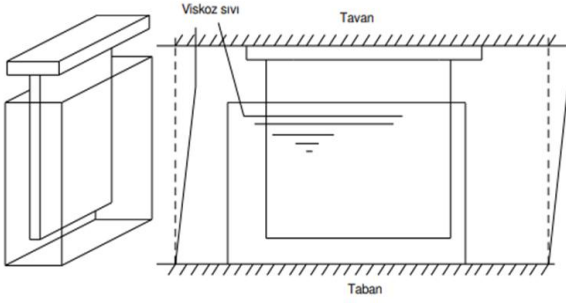
Burada E_v düşey rijitlik modülünü göstermektedir [26].

2.2.2 Viskoz sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler genellikle bir piston ve içinde silikon ya da yağ bulunan bir silindirden oluşur. Piston, yağ içerisinde hareket ettiğinde deprem kuvvetlerine karşı sönümleme sağlar. Bu cihazların yapıya entegre edilmesiyle kat ötelenmeleri %30 ile %70 arasında azaltılabilir. Şekil 5'te bu sistemin en kesiti gösterilmektedir [8].



Şekil 5. Viskoz sönümleyici sistemlerin en kesiti [8]



Şekil 6. Viskoz sönümleme duvarının çalışma mekanizması [8]

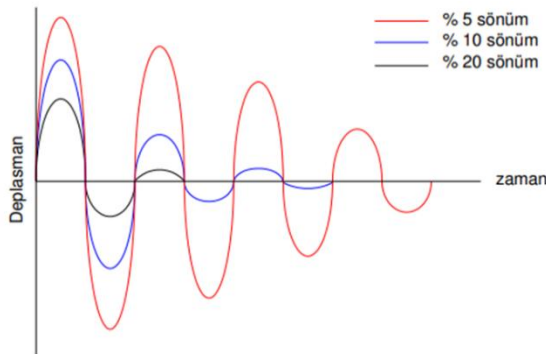
Ayrıca, "viskoz sönümleme duvarı" adı verilen bir tasarım da bulunmaktadır. Bu sistemde, çelik bir plak, içerisinde viskoz sıvı olan dikdörtgen bir çelik konteynerin içinde hareket eder. Bu çelik plak üstteki döşemeye, konteyner ise alt döşemeye sabitlenir. Bu düzenleme Şekil 6' da gösterilmiştir [29].

Viskoz sönümleyicilerde ortamın sıcaklığı yükseldikçe enerji sönümleme kapasitesi azalır. Viskoz sıvının viskozitesi arttıkça, sönümlenen enerji miktarı da artar. Viskoz sönümün dinamik reaksiyon üzerindeki tesiri Şekil 7' de gösterilmiştir [8].

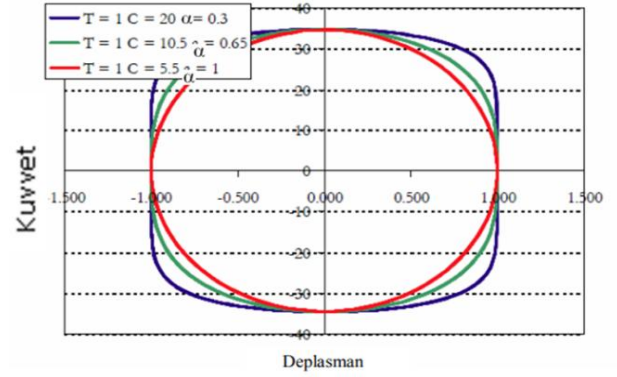
Viskoz sönümleyiciler göreceli hız farkına dayanarak bir kuvvetle tepki verirler. Bu cihazlarda sıklıkla akışkanlar, araç amortisörlerindeki gibi kullanılır. Uygulanan kuvvetin hızı düşük olduğunda çok az direnç gösterirler, ancak hız arttıkça direnç de artar. Viskoz sönümleyiciler, Denklem 5' de verilen bağıntıyla tanımlanabilir [30].

$$F_D = CV^\alpha \quad (5)$$

Bu denklemde F_D sönüm kuvveti, V akışkanın rölatif hızı, C sönüm katsayısı ve α ise hız üstel karakter olarak adlandırılmaktadır. Uygulamada, α sabitinin 0.3-1 aralığında alınabileceği belirtilmiştir. α katsayısı 1 olarak ayarlandığında sönümleyici doğrusal, daha düşük değerlerde ise doğrusal olmayan olarak sınıflandırılır. Aynı sönüm sabitindeki hız bağımlı sönümleyicilerde, α katsayısı düştükçe sönümlenen enerji miktarı da azalır. Şekil 8' de, eşit enerji sönümleme kapasitesine sahip sönümleyicilerde, C ve α parametrelerinin değişimi gösterilmektedir [31].



Şekil 7. Viskoz sönümün dinamik reaksiyon üzerindeki tesiri [8]

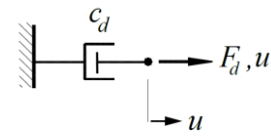


Şekil 8. C ve α parametrelerinin eşit enerji sönümleme kapasitesine sahip sönümleyicilerde değişimi [31]

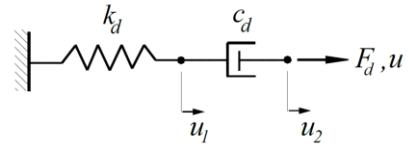
Denklem 5 yardımıyla tanımlanan viskoz sönümleyiciler titreşim frekansının 4 Hz den düşük olduğu sistemler için kullanılmaktadır ve saf (pure) viskoz sönüm modeli olarak adlandırılmaktadır [32]. Bu model Şekil 9' da verilmiştir. Daha yüksek frekans değerlerine sahip sistemler için ise Maxwell modeli kullanılmaktadır. Bu model ise yüksek frekans değerinden kaynaklanan rijitliği temsil eden yay modeli ile temsil edilmektedir ve Şekil 10' da gösterilmiştir. Maxwell modelinde ise sönüm kuvveti F_D Denklem 6 yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$F_D = \lambda \frac{dF_D(t)}{dt} = C_0 \frac{du_d(t)}{dt} \quad (6)$$

Bu denklemde, $dF_D(t)$ kuvvetin zamana göre değişimini $du_d(t)$ eksenel rölatif hızı, λ viskoz sönümleyicideki geri bırakma (gevşeme) zamanını göstermektedir. C_0 ise frekansın sıfır olduğu andaki sönüm katsayısını ifade etmektedir [32].



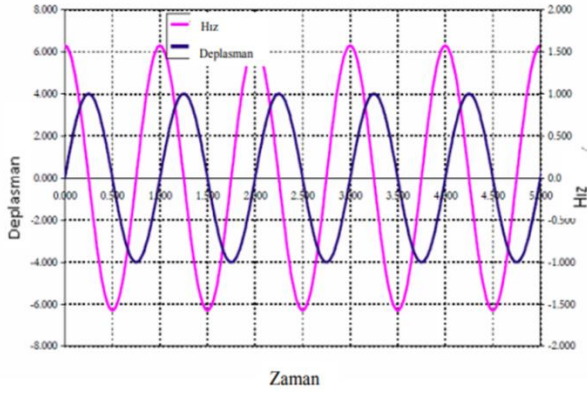
Şekil 9. Saf (pure) viskoz modeli [32]



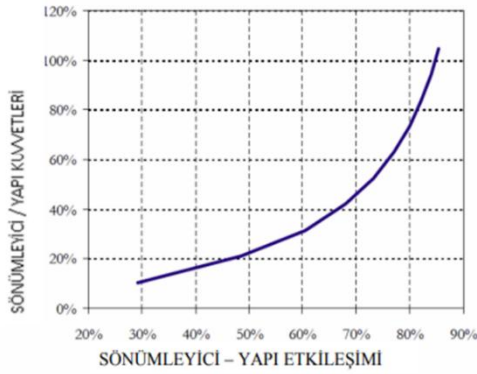
Şekil 10. Maxwell modeli [32]

Viskoz sönümleyicilerin en önemli avantajlarından biri, düşük hızlarda çok az direnç göstererek yapılarda rijitlik artışına neden olmamalarıdır. Doğrusal sönümleyicilerde, atalet kuvvetlerinin maksimum olduğu an ile sönümleyicinin tepki kuvvetlerinin maksimum olduğu an farklıdır. Bu faz farkı Şekil 11' de gösterilmektedir [33].

Doğrusal sönümleyicilerde maksimum sönümleyici kuvvetleri ve maksimum atalet kuvvetleri ters fazlı olurken, lineer olmayan sönümleyicilerde ve hızın yüksek olduğu durumlarda, bu iki kuvvetin maksimum noktaları faz olarak birbirine yaklaşır. Bu da sönümleyici kuvvetler ile yapı atalet kuvvetleri arasındaki etkileşimi artırır. Bu ilişki Şekil 12' de gösterilmektedir [31].



Şekil 11. Deplasman ve hız fazları [31]



Şekil 12. Yapı ve sönümlenen enerji ile sönümleyici arasındaki etkileşimin değişimi [31]

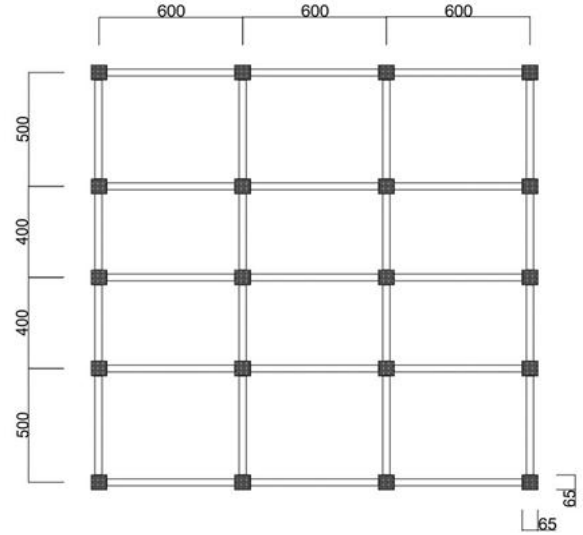
2.3 Yapıların modellenmesi

Bu çalışma kapsamında, aynı kat planına sahip toplam dört tip yapı, TBDY-2018 [26] esas alınarak modellenmiştir. Binaların her biri 10 katlı, konut tipi betonarme yapılardır ve kat yüksekliği 3 m, toplam yapı yüksekliği ise 30 m olarak belirlenmiştir. Kat oturum alanı 324 m² olan bu yapılar, ankastre mesnetli, ankastre mesnet + viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili olarak dört farklı şekilde oluşturulmuştur. Yapıların taşıyıcı sistemi, 65 cm x 65 cm kesitinde kolonlar ve 40 cm x 70 cm kesitinde kirişlerle tasarlanmış, döşeme kalınlığı ise 15 cm olarak belirlenmiştir. Kullanılan beton C30/37 sınıfında olup elastisite modülü $E_c=32000$ MPa, donatı çeliği ise S420 sınıfında olup elastisite modülü $E_s=210000$ MPa'dır. Kat kalıp planı Şekil 13' te verilmiştir.

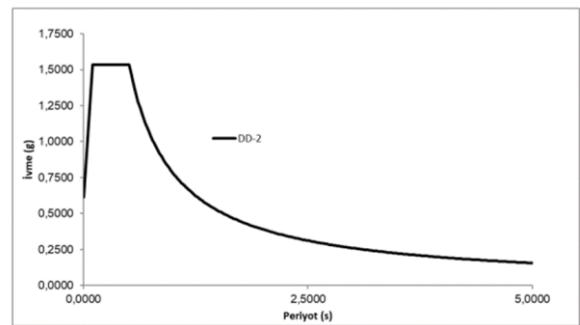
Modelleme ve analizlerde SAP2000 sonlu elemanlar programı [34] kullanılmış, yapı elemanları çubuk sonlu eleman modeli ile idealize edilmiştir. Zemin sınıfı ZD, bina önem katsayısı $I=1$, ve hareketli yük katılım katsayısı $n=0.3$ olarak dikkate alınmıştır. Yapı üzerindeki ölü yük 2 kN/m²

ve hareketli yük 2 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Dinamik analizler, TBDY-2018'de belirtilen zaman tanım alanında analiz yöntemiyle gerçekleştirilmiş, deprem ivme kayıtları bu yönetmelik doğrultusunda seçilmiş ve elastik tasarım spektrumuna uygun olarak ölçeklendirilmiştir.

Analiz sonuçlarında, yapıların toplam kat deplasmanları, göreceli kat deplasmanları ve katlarda meydana gelen ivme değerleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, sismik izolatörler için literatürde ve uygulamada sıklıkla kullanılan kurşun çekirdekli kauçuk izolatör seçilmiştir. Viskoz sönümleyiciler için ise uygulamada yaygın olarak kullanılan viskoz sönümleyici belirlenmiş ve bu sönümleyicinin üretildiği firmanın paylaştığı olduğu parametreler dikkate alınmıştır. Sismik izolatör parametreleri TBDY-2018'e göre hesaplanmış, viskoz sönümleyiciler için ise uygulamada yaygın olarak kullanılan firmaya ait veri föyünden alınan optimum tasarım parametreleri tercih edilmiştir. [26, 35]. Bu kapsamda, farklı yapı tiplerinin deprem performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



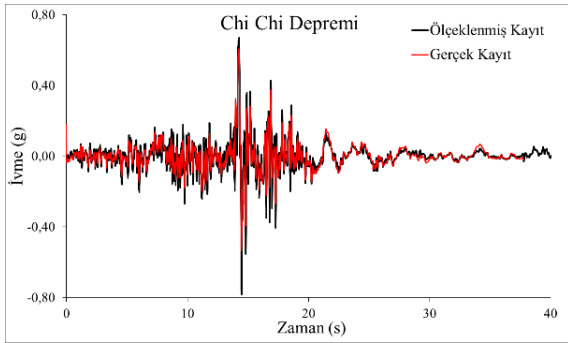
Şekil 13. Modellenen yapının kalıp planı (cm)



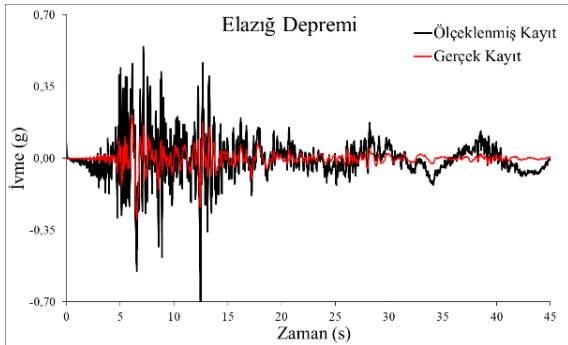
Şekil 14. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 elastik tasarım spektrum eğrisi

Elazığ ili Sivrice ilçesi 38.483225° enlem, 39.311038° boylam konumunda tasarlanacak yapının analizinde kullanılacak olan elastik tasarım spektrumları AFAD Sismik Tehlike Haritası veri tabanından alınmıştır [36]. Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) için AFAD Sismik Tehlike

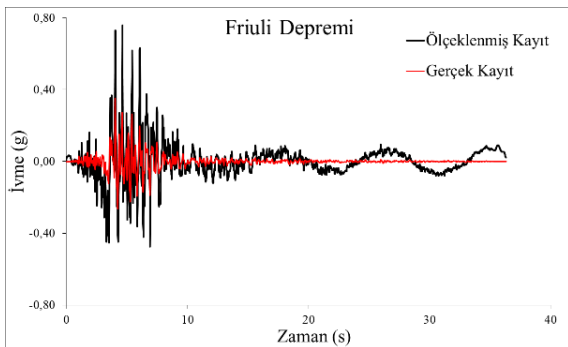
Haritasından faydalanılarak elde edilen $S_{DS}=1.462$ ve $S_{DI}=0.742$ değerleri belirlenmiştir. DD-2 düzeyi elastik tasarım spektrumu Şekil 14’te gösterilmiştir. 10 katlı konut yapısı tasarlanırken yapının taşıyıcı sistemi süneklik düzeyi yüksek çerçeve sistem, döşeme sistemi ise plak döşeme olarak modellenmiştir. Yapı analizinde analiz programı olarak SAP2000 programı kullanılmıştır. Yönetmeliğimizde belirtildiği gibi, 11 adet deprem kaydı kullanarak SeismoMatch’de bu depremlerin ivme kayıtları Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2’ye göre ölçeklendirilmiştir [37]. Ölçeklendirilen depremlerin ivme-zaman grafikleri Şekil 15 ile Şekil 25 arasında sunulmuştur. DD-2 düzeyinde oluşan davranış spektrum eğrisi ise Şekil 26’da belirtilmiştir.



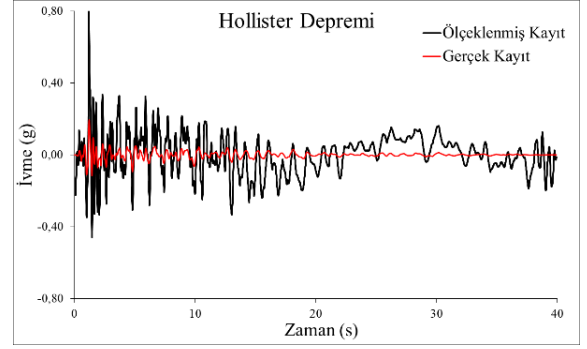
Şekil 15. Chi Chi depremi ivme-zaman grafiği



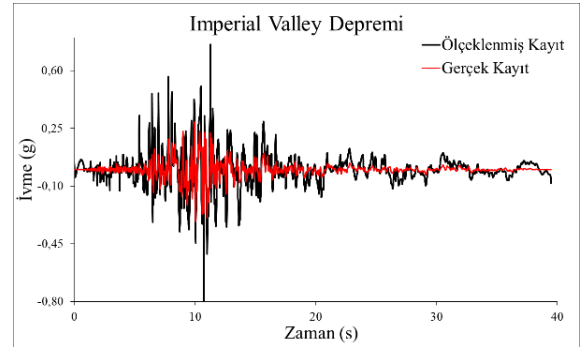
Şekil 16. Elazığ depremi ivme-zaman grafiği



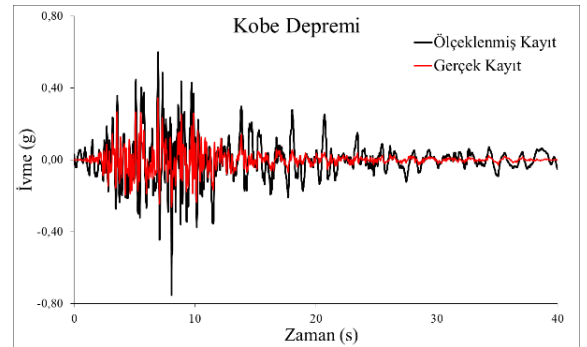
Şekil 17. Friuli depremi ivme-zaman grafiği



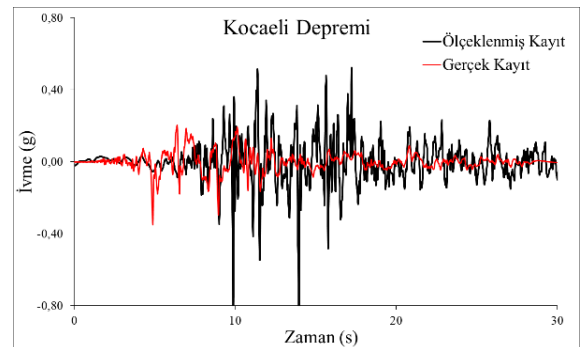
Şekil 18. Hollister depremi ivme-zaman grafiği



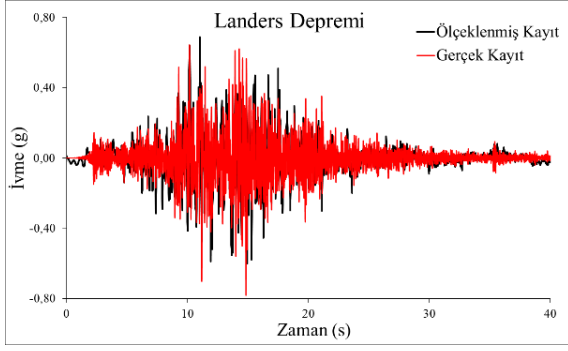
Şekil 19. Imperial Valley depremi ivme-zaman grafiği



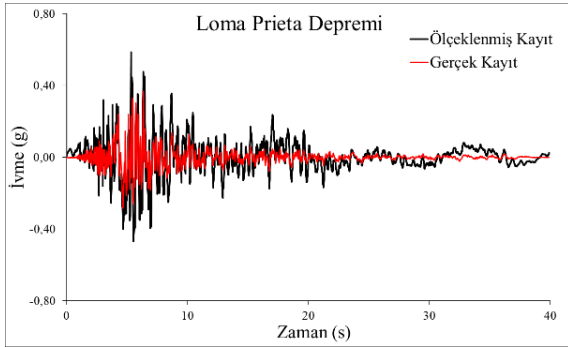
Şekil 20. Kobe depremi ivme-zaman grafiği



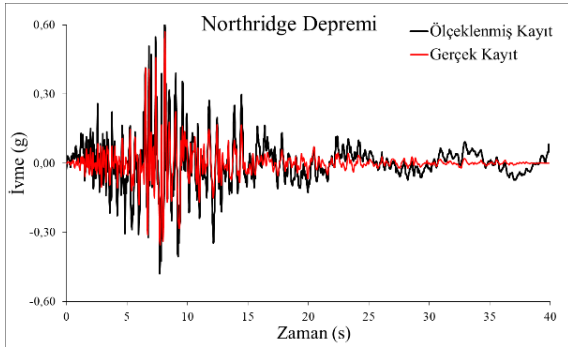
Şekil 21. Kocaeli depremi ivme-zaman grafiği



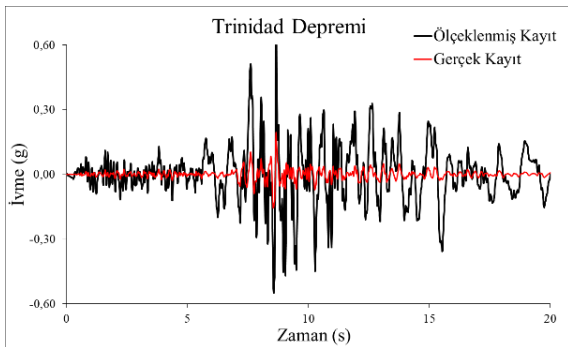
Şekil 22. Landers depremi ivme-zaman grafiği



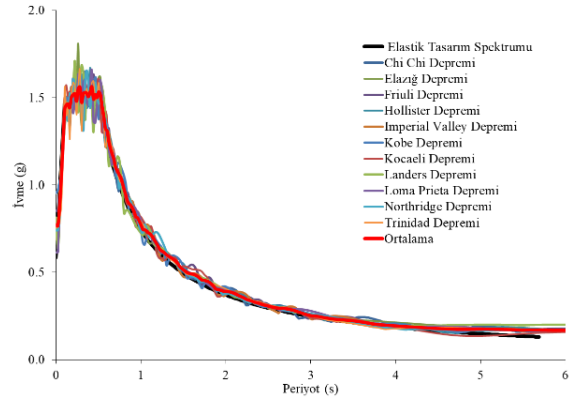
Şekil 23. Loma Prieta depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 24. Northridge depremi ivme-zaman grafiği



Şekil 25. Trinidad depremi ivme-zaman grafiği

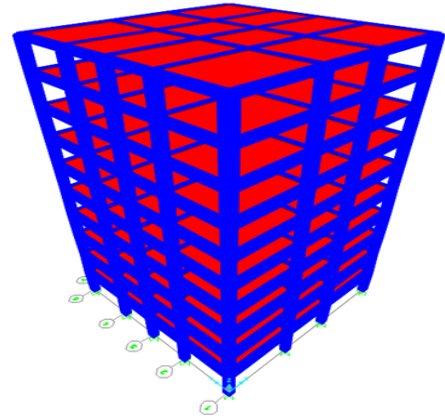


Şekil 26. DD-2 düzeyi davranış spektrum eğrisi

Depremlerin ivme-zaman grafikleri yeniden oluşturulmuş ve TBDY-2018’ de belirtildiği gibi SAP2000 sonlu elemanlar programında yapılara zaman tanım alanında uygulanarak doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapıların mimarisinde, kolon yerleri ve kesitleri değiştirilmemiştir. Dört yapının da mimari özellikleri aynıdır. Yapının bulunduğu bölgedeki zemin sınıfı, literatürdeki yapılan araştırmalar referans alınarak ZD olarak kabul edilmiştir [38, 39]. Ölü ve hareketli yükler, yapının tasarımı açısından kolaylık sağlaması amacıyla üniform olarak uygulanmıştır. Her dört yapıda da duvar yükü kullanılmamıştır.

2.3.1 Ankastre mesnetli yapının modellenmesi

Bölüm 2.3’ de verilen parametrelere göre modellenen ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 27’ de verilmiştir.



Şekil 27. Ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 1’ de, kütle katılım oranlarına bağlı olarak değişen periyotlar, mod numaralarıyla beraber tablo şeklinde sunulmuştur. Kütle katılım oranlarına bakıldığında 1. modun yapısal harekete katkısının x yönünde %79, ikinci modun katkısının y yönünde %80 mertebesinde olduğu görülmektedir. Yapının zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilirken, kütle katılım oranı yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine göre %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 1. Ankastre mesnetli yapının modal kütle katılım oranları

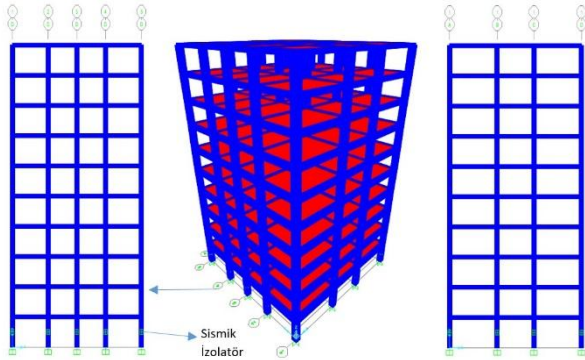
Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.140929	0.79119	0	0
2	0.98726	0	0.79781	0
3	0.944682	0	0	8.316E-20
4	0.360498	0.10186	1.859E-18	2.037E-17

2.3.2 Sismik izolatörlü yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de verilen parametrelere göre tasarlanan kurşun çekirdekli sismik izolatörlü yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 28' de verilmiştir. İzolatörde kullanılacak parametrelerin hesabı için TBDY-2018 dikkate alınmıştır. İzolatöre ait parametreler Tablo 2' de verilmiştir. İzolatörler zemin katta her kolonun orta kısmına konulmuştur. Toplamda 20 adet sismik izolatör kullanılmıştır.

Tablo 2. Sismik izolatör için hesaplanan parametreler [26]

Yalıtım Birimi Özellikleri			
Parametre	Birim	DD-2	DD-1
Düşey rijitlik(K_v)	kN/mm	911.544	911.544
Efektif rijitlik(K_{eff})	kN/mm	3.105	1.11
Akma dayanımı(F_Q)	kN	166.93	61.802
Akma sonrası rijitlik(K_2)	kN/mm	2.494	1.042
Akma öncesi rijitlik(K_1)	kN/mm	24.939	10.418
Akma deplasmanı(D_y)	mm	7.437	6.592



Şekil 28. Sismik izolatörlü yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 3' te, kütle katılım oranlarına göre değişen doğal titreşim periyotları, mod numaralarıyla birlikte gösterilmiştir. Kütle katılım oranları göz önüne alındığında, birinci modun yapısal harekete x yönünde %97, ikinci modun ise y yönünde %98 oranında katkıda bulunduğu görülmektedir. Yapının zaman tanım alanı analizinde, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 3. Sismik izolatörlü yapının modal kütle katılım oranları

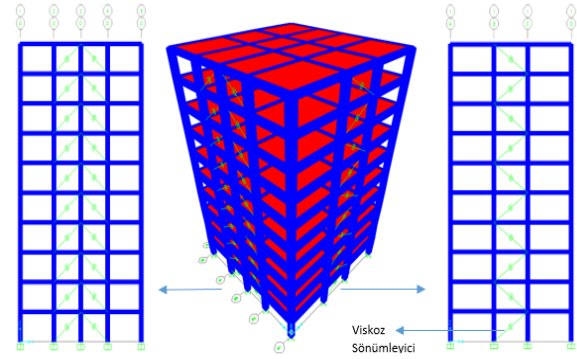
Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.937196	0.97092	0	0
2	1.846301	0	0.97961	0
3	1.707141	0	0	0
4	0.525264	0.02266	0	2.167E-18

2.3.3 Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de verilen parametrelere göre tasarlanan ankastre mesnetli yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 29' da verilmiştir. Viskoz sönümleyici için gereken parametreler, uygulamada en sık kullanılan sönümleyici parametrelerinden hazır olarak alınmıştır. Viskoz sönümleyicilere ait parametreler Tablo 4' te verilmiştir. Viskoz sönümleyiciler simetrik olacak şekilde, x doğrultusundaki orta açıklığa 1 adet, y yönündeki 2 orta açıklığının her birine ise 1' er adet koyulmuştur. Toplamda 60 adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır.

Tablo 4. Viskoz sönümleyici için kullanılan parametreler [35]

Rijitlik(kN/m)	Sönüm katsayısı(kNs/m)	Sönüm üstel sabiti(α)
313200	3132	0.4



Şekil 29. Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 5' te, kütle katılım oranlarına göre değişen doğal titreşim periyotları, mod numaralarıyla birlikte gösterilmiştir. İncelemeler sonucunda, birinci modun yapısal harekete x yönünde %79, ikinci modun ise y yönünde %80 oranında katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapının zaman tanım alanında yapılan analizde, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.

Tablo 5. Ankastre + viskoz sönümleyicili yapının modal kütle katılım oranları

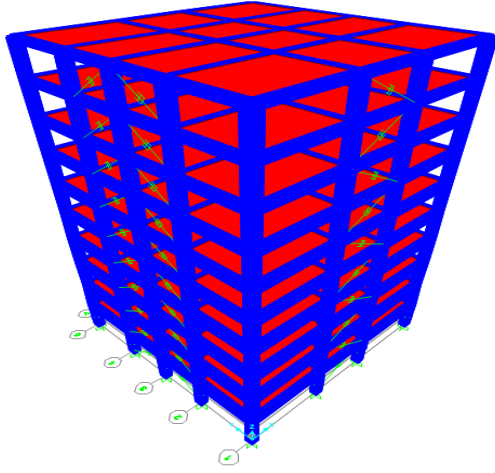
Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.140929	0.79119	0	0
2	0.98726	0	0.79781	0
3	0.944682	0	0	8.316E-20
4	0.360498	0.10186	1.859E-18	2.037E-17

2.3.4 Sismik izolasyonlu + viskoz sönümleyicili yapının modellenmesi

Bölüm 2.3' de belirtilen özelliklere göre tasarlanan kurşun çekirdekli sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli Şekil 30' da verilmiştir. İzolatörde kullanılacak parametreler sismik izolatörlü yapının modelinde kullanılan sismik izolatörün aynısıdır. Seçilen viskoz sönümleyici' de ankastre + viskoz

sönümleyicili yapının modellenmesinde kullanılan viskoz sönümleyici ile aynıdır. Viskoz sönümleyiciler simetrik olacak şekilde, x doğrultusundaki orta açıklığa 1 adet, y yönündeki 2 orta açıklığın ise her birine 1' er adet koyulmuştur. Her kata aynı şekilde yerleştirilmiştir. Toplamda 60 adet viskoz sönümleyici kullanılmıştır.

Tablo 6' da, kütle katılım oranlarına bağlı olarak değişen periyotlar, mod numaralarıyla birlikte tablo şeklinde sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, birinci modun yapısal harekete x yönünde %97, ikinci modun ise y yönünde %98 düzeyinde katkı sağladığı tespit edilmiştir. Yapının zaman tanım alanındaki analiz sırasında, kütle katılım oranı en yüksek olan birinci ve ikinci modların periyot değerlerine %5 oranında sönüm uygulanmıştır.



Şekil 30. Sismik izolatörlü + Viskoz sönümleyicili yapının sonlu elemanlar modeli

Tablo 6. Sismik izolatörlü + Viskoz sönümleyicili yapının modal kütle katılım oranları

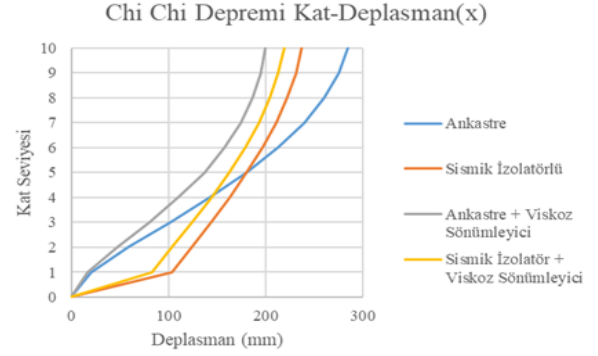
Mod	Periyot(s)	x doğrultusu	y doğrultusu	z doğrultusu
1	1.937196	0.97092	0	0
2	1.846301	0	0.97961	0
3	1.707141	0	0	0
4	0.525264	0.02266	0	2.167E-18

3 Bulgular ve tartışma

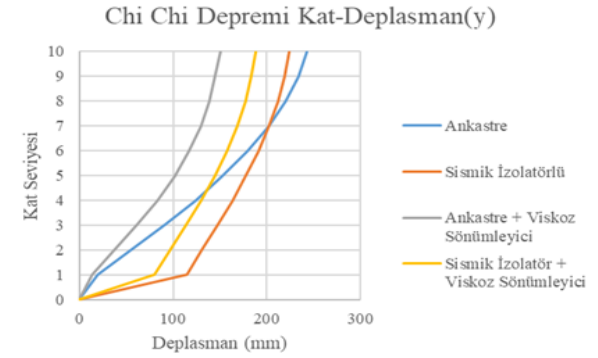
Yapılara, TBDY-2018' de belirtildiği gibi 11 adet deprem kaydı x ve y yönlerinde etki ettirilerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Kat seviyesi-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması;

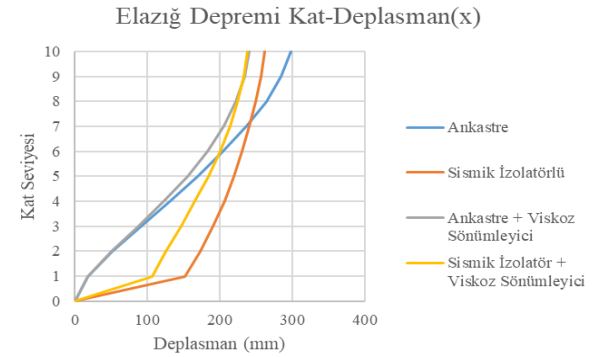
Analizlerin sonucunda, kat seviyelerine göre elde edilen deplasman değerleri her depremin x-y doğrultuları için ayrı olmak suretiyle Şekil 31 - Şekil 52' de görülmektedir. Ayrıca 11 depremin kat seviyelerine göre ortalama deplasman değerleri hem x hem de y doğrultuları için sırasıyla Şekil 53 ve Şekil 54' te sırasıyla gösterilmektedir.



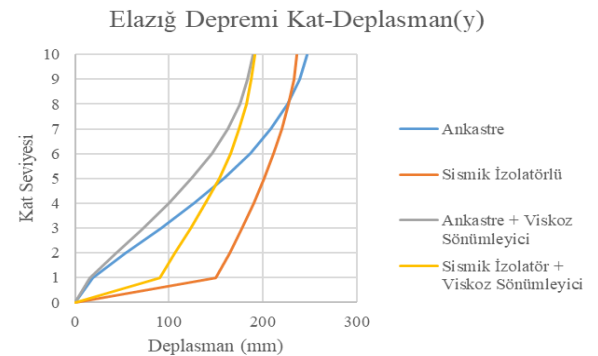
Şekil 31. Chi Chi depremi x doğrultusu kat-deplasman grafiği



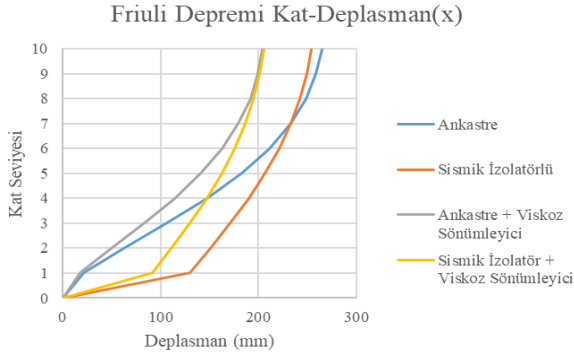
Şekil 32. Chi Chi depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



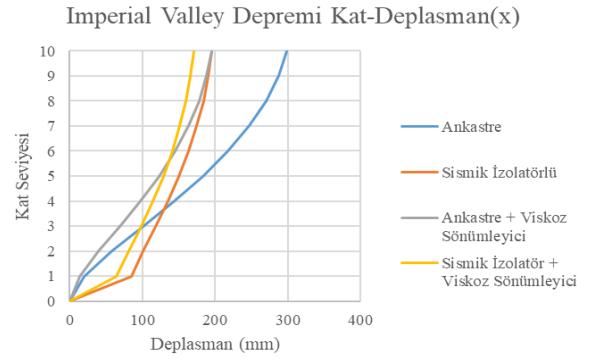
Şekil 33. Elazığ depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



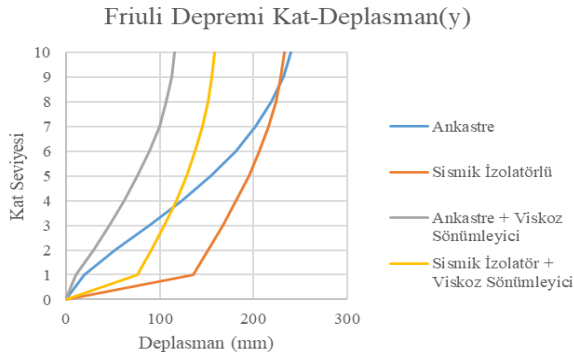
Şekil 34. Elazığ depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



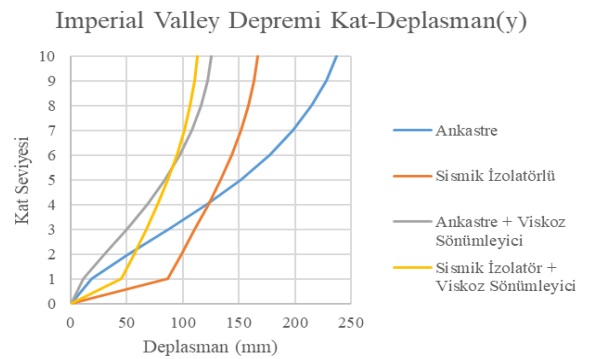
Şekil 35. Friuli depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



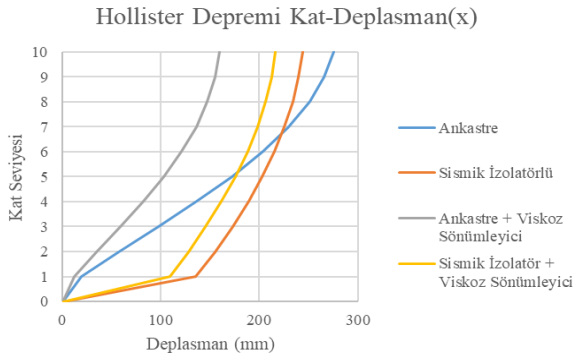
Şekil 39. Imperial Valley depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



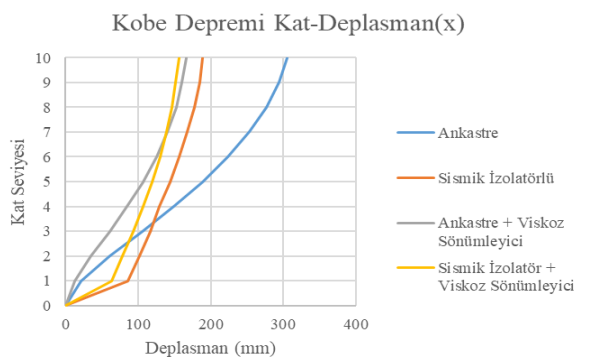
Şekil 36. Friuli depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



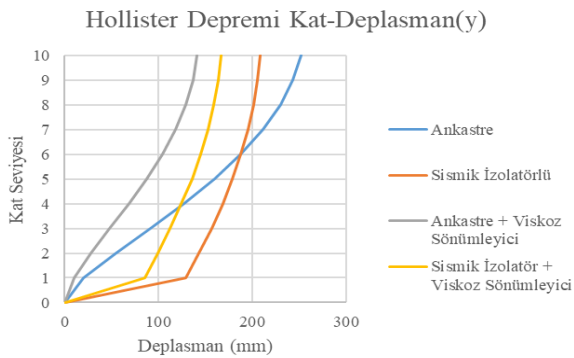
Şekil 40. Imperial Valley depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



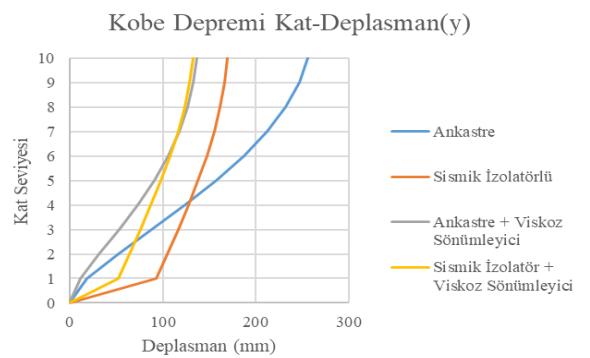
Şekil 37. Hollister depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



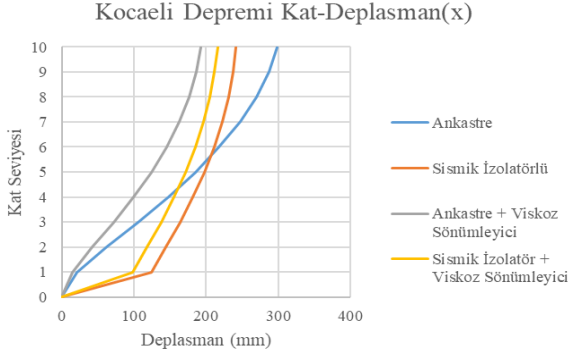
Şekil 41. Kobe depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



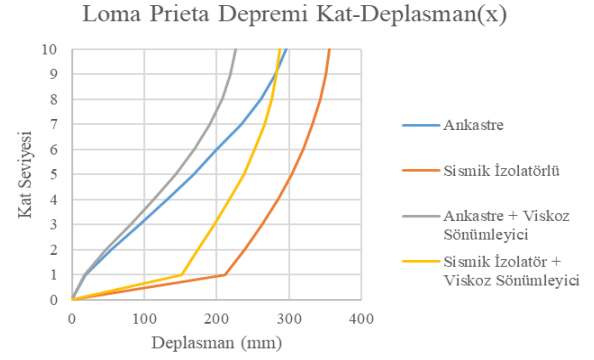
Şekil 38. Hollister depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



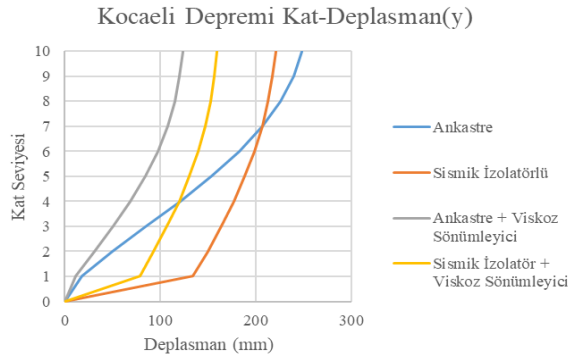
Şekil 42. Kobe depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



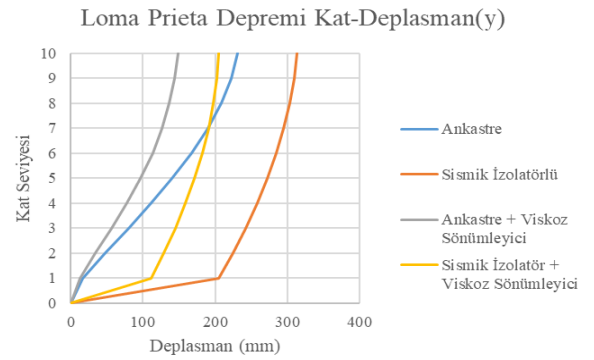
Şekil 43. Kocaeli depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



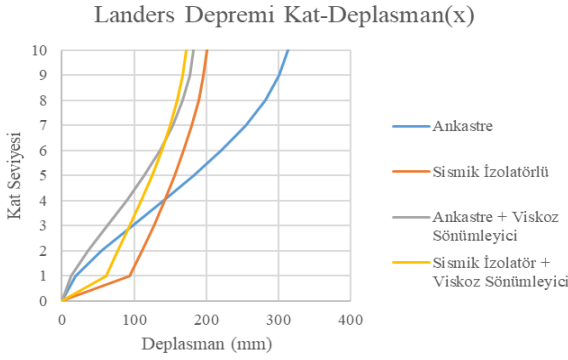
Şekil 47. Loma Prieta depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



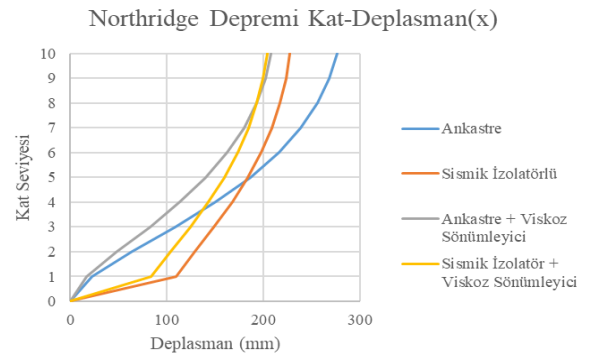
Şekil 44. Kocaeli depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



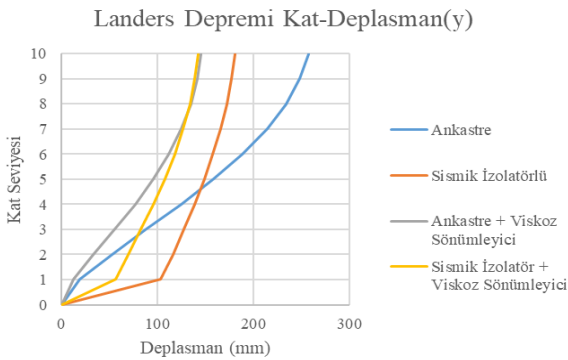
Şekil 48. Loma Prieta depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



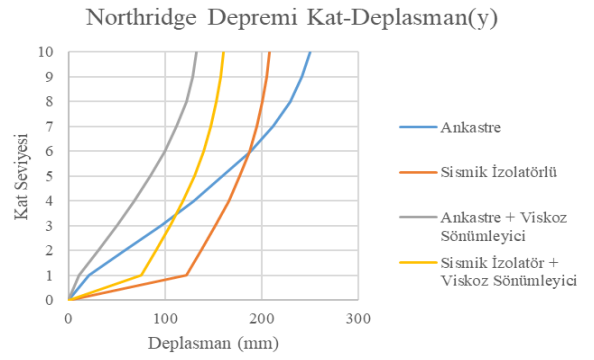
Şekil 45. Landers depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



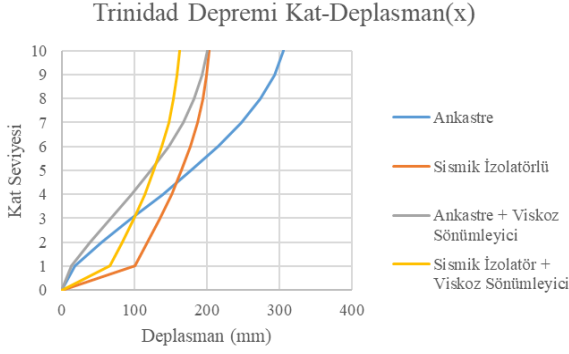
Şekil 49. Northridge depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



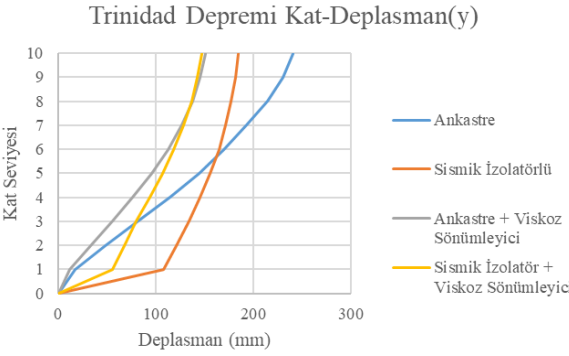
Şekil 46. Landers depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



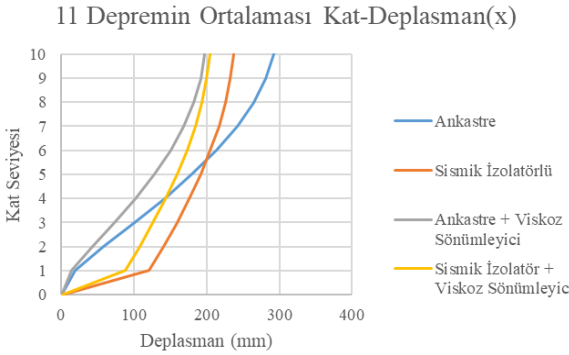
Şekil 50. Northridge depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



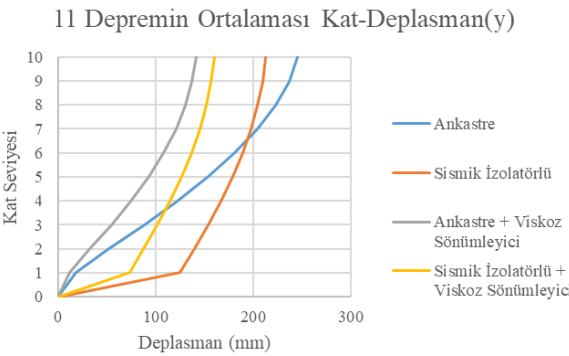
Şekil 51. Trinidad depremi x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 52. Trinidad depremi y doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 53. 11 depremin ortalaması x doğrultusu kat- deplasman grafiği



Şekil 54. 11 depremin ortalaması y doğrultusu kat- deplasman grafiği

Analizlerin sonuçları, yapıların deplasman değerlerinin ortalama nasıl değiştiğini incelemek amacıyla tablo halinde sunulmuştur. Tablo 7’ de, ankastr mesnetli yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile ankastr + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Ankastr mesnetli yapıda, viskoz sönümleyici; farkların ortalamalarına göre deplasman değerlerinde x yönünde %26.19 oranında, y yönünde ise %35.91 oranında azalma sağlamıştır. Benzer şekilde, sismik izolatörlü yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Sismik izolatör ve viskoz sönümleyicinin beraber kullanılması durumunda, farkların ortalamalarına göre, x yönünde %16.13 oranında; y yönünde ise %27.36 oranında yalnızca izolatör kullanılan yapıya göre azalma sağlamıştır.

Tablo 7. Kat seviyelerine göre deplasman değerlerindeki ortalama farklar

Kat Seviyesi	Ortalama			
	Ankastr ile Ankastr + Viskoz Sönümleyicili		Sismik İzolatörlü ile Sismik İzolatörlü + Viskoz Sönümleyicili	
	Fark(%)		Fark(%)	
	x	y	x	y
0	0	0	0	0
1	24.96	35.60	26.57	41.54
2	25.97	37.09	23.20	37.51
3	26.86	37.94	20.43	34.02
4	27.67	38.73	18.23	31.20
5	28.42	39.38	16.64	29.00
6	29.20	40.06	15.50	27.31
7	30.14	40.68	14.77	26.11
8	30.99	41.35	14.34	25.29
9	31.68	41.90	14.02	24.72
10	32.18	42.25	13.72	24.28
Ortalama	26.19	35.91	16.13	27.36

Tablo 8. Kat seviyelerine göre deplasman değerlerindeki maksimum farklar

Kat Seviyesi	Maksimum			
	Ankastr ile Ankastr + Viskoz Sönümleyicili		Sismik İzolatörlü ile Sismik İzolatörlü + Viskoz Sönümleyicili	
	Fark(%)		Fark(%)	
	x	y	x	y
0	0	0	0	0
1	41.22	49.51	34.71	48.48
2	41.92	49.68	29.99	44.35
3	42.53	48.03	26.71	40.31
4	43.03	49.59	24.57	38.36
5	43.49	50.81	23.03	36.87
6	43.97	50.82	21.92	35.81
7	44.44	50.90	21.13	35.14
8	44.92	51.07	20.56	34.85
9	45.33	51.36	20.12	34.70
10	45.62	51.65	19.72	34.60
Maksimum	45.62	51.65	34.71	48.48

Yapılara ayrı ayrı etki ettirilen 11 deprem sonucunda oluşan deplasman değerleri arasındaki farkların maksimum değerlerinin nasıl değiştiği ise **Tablo 8'** de verilmiştir. Ankastre mesnetli yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile ankastre + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri arasındaki farkların yüzde olarak maksimum değeri her kat için karşılaştırılmıştır. Farkların maksimum değerlerine göre, ankastre mesnetli yapıda; viskoz sönümleyici, deplasman değerlerinde x yönünde 10.katta %45.62 oranında, y yönünde ise 10. katta %51.65 oranında azalma sağlamıştır. Benzer şekilde, sismik izolatörlü yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve her kat seviyesindeki deplasman değerleri arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Farkların maksimumlarına göre, sismik izolatörlü yapıda; viskoz sönümleyici, deplasman değerlerinde x yönünde 1.katta %34.71 oranında, y yönünde ise 1. katta %48.48 oranında azalma sağlamıştır. Sonuç olarak viskoz sönümleyicinin ankastre mesnetli yapılarda deplasmanı son katta daha efektif azaltırken, sismik izolatörlü yapılarda deplasmanı izolatör seviyesinde daha efektif azalttığı ortaya konulmuştur. Bu sonuçlar, viskoz sönümleyicilerin hem ankastre mesnetli yapılar hem de izolatörlü yapıların deplasman değerleri için etkili olduğunu göstermiştir.

Görelî-deplasman sonuçları karşılaştırılması;

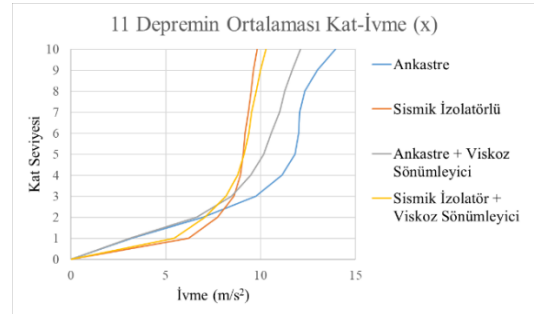
Yapıda kullanılan sismik izolatörler, zemin kat kolonlarının orta bölgelerinde konumlandırıldığından, izolatör seviyesinde oluşan deplasmanlar ve izolatör seviyesine göre birinci katta meydana gelen görelî deplasmanlar dikkate alınmamıştır. Diğer katlarda oluşan görelî kat deplasmanları dikkate alındığında ise sismik izolatörlü yapılarda, ankastre mesnetli yapılara göre önemli ölçüde azalmalar gözlemlenmiştir. Analizlerin sonuçları, yapıların görelî kat-deplasman değerlerinin ortalama nasıl değiştiğini incelemek amacıyla tablo halinde sunulmuştur. **Tablo 9'** da, ankastre mesnetli yapının her deprem ve kat seviyelerindeki görelî kat-deplasman değerleri ile sismik izolatörlü yapının görelî kat-deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Farkların ortalamalarına göre, sismik izolatörlü yapıda ankastre mesnetli yapıya göre görelî kat-deplasman değerlerinde x yönünde %56.82 oranında, y yönünde ise %61.19 oranında azalma görülmüştür. Benzer şekilde, ankastre + viskoz sönümleyicili yapının her deprem ve kat seviyelerindeki görelî kat-deplasman değerleri ile sismik izolatör + viskoz sönümleyicili yapının görelî kat-deplasman değerlerindeki farkların ortalaması yüzde olarak karşılaştırılmıştır. Farkların ortalamalarına göre, sismik izolatörlü + viskoz sönümleyicili yapıda ankastre + viskoz sönümleyicili yapıya göre görelî kat-deplasman değerlerinde x yönünde %34.29 oranında; y yönünde ise %30.28 oranında azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar, sismik izolasyon sistemlerinin hem ankastre mesnetli yapılar hem de viskoz sönümleyici kullanılan yapıların görelî kat deplasman değerleri için etkili olduğunu göstermiştir.

Tablo 9. Kat seviyelerine göre görelî kat-deplasman değerlerindeki ortalama farklar

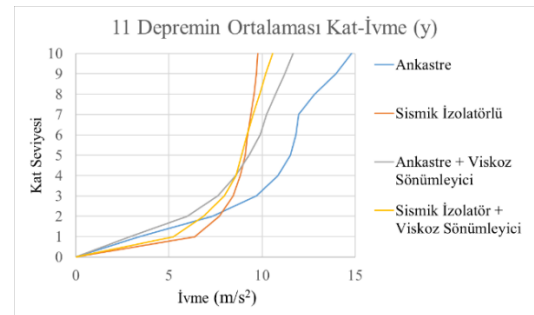
Kat Seviyesi	Ortalama			
	Ankastre ile Sismik İzolatörlü		Ankastre + Viskoz Sönümleyicili ile Sismik İzolatörlü + Viskoz Sönümleyicili	
	Fark (%)		Fark (%)	
	x	y	x	y
0				
1				
2	48.09	55.51	32.05	31.24
3	55.74	60.78	38.48	35.18
4	58.56	61.98	39.79	34.55
5	59.23	62.42	39.52	34.12
6	59.30	63.07	38.44	33.45
7	59.34	62.77	36.97	32.35
8	58.47	62.56	34.58	29.56
9	57.46	62.08	29.54	25.84
10	55.15	59.52	19.21	16.28
Ortalama	56.82	61.19	34.29	30.28

Kat seviyesi - ivme sonuçları karşılaştırılması;

Nümerik analizlerde kullanılan tüm modeller için hem x hem de y doğrultuları için kat ivme değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar grafik halinde x ve y doğrultuları için sırasıyla **Şekil 55** ve **56'** da verilmiştir. Bu grafiklerden görüldüğü üzere ankastre mesnetli yapıya viskoz sönümleyici veya sismik izolatör eklenmesi durumunda her iki doğrultu için de kat ivme değerleri genel olarak önemli ölçüde azalmaktadır. Hem sismik izolatör hem de viskoz sönümleyici kullanılan modelde ise kat ivme değerleri genel olarak yine azalmaktadır. Yapısal kontrol sistemlerinin bina içerisindeki yerleşimi ve sismik izolatörlerin bulunduğu katta yüksek deplasmanlara müsaade etmesi alt katlardaki ivme değerlerindeki artış sebep olmuştur.



Şekil 55. 11 depremin ortalaması x doğrultusu kat- ivme grafiği



Şekil 56. 11 depremin ortalaması y doğrultusu kat- ivme grafiği

Tüm bulgular değerlendirildiğinde literatürdeki çalışmalara kıyasla viskoz sönümleyicilerin yapının farklı yönlerine tek veya çift olarak yerleştirilmesi ve bu düzenlemelerin izolatörle beraber kullanıldığında yapının deprem tepkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, viskoz sönümleyiciler ve kurşun çekirdekli kauçuk sismik izolatörlerin, 10 katlı betonarme bir binanın deprem etkisi altında sismik davranışının nasıl etkilediği kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ankastre mesnetli, viskoz sönümleyicili, sismik izolatörlü ve bu iki sistemin kombinasyonundan oluşan binaların sismik tepkileri incelenmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) esas alınarak yapılan zaman tanım alanı analiz sonuçları, kat deplasmanları ve görelî kat deplasmanları açısından değerlendirilmiştir.

Ankastre mesnetli yapılara viskoz sönümleyici eklenmesi, yapıda meydana gelen ortalama deplasman değerlerinde x yönünde %26.19, y yönünde ise %35.91 oranında azalma sağlamıştır. Sismik izolatörlü yapılarda ise viskoz sönümleyicinin eklenmesiyle, yapıda meydana gelen ortalama deplasman değerlerinde x yönünde %16.13, y yönünde ise %27.36 oranında azalma elde edilmiştir. Maksimum kat deplasman farkları incelendiğinde, viskoz sönümleyicilerin ankastre mesnetli yapılarda son katta %45.62 (x yönünde) ve %51.65 (y yönünde) oranında, sismik izolatörlü yapılarda ise izolatör seviyesinde %34.71 (x yönünde) ve %48.48 (y yönünde) oranında azalma sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre, viskoz sönümleyicilerin hem izolatör kullanılmayan hem de izolatör kullanılan yapılarda etkili olduğu belirlenmiştir. Ancak bu etkiler ankastre mesnetli yapılarda üst katlarda daha yüksek mertebelerdeyken izolatörlü yapıda daha düşük kat seviyelerinde gerçekleşmektedir. Görelî kat deplasmanları açısından bakıldığında, sismik izolatörlerin ankastre mesnetli yapılara göre x yönünde %56.82, y yönünde ise %61.19 oranında azalma sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, viskoz sönümleyicilerin ve sismik izolatörlerin birlikte kullanıldığı yapılarda, sadece viskoz sönümleyicili yapılara göre x yönünde %34.29, y yönünde ise %30.28 oranında azalma gözlemlenmiştir. Kat ivme değerleri açısından değerlendirme yapıldığında, ankastre mesnetli yapıya viskoz sönümleyici, sismik izolatör veya her ikisinin birlikte eklenmesi durumunda her kat ivme değerleri genel olarak önemli ölçüde azalmaktadır.

Bu bulgular, sismik izolatörlerin ve viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanıldığında betonarme yapı performansını önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Çalışmanın bulguları, yapısal kontrol sistemlerinin, depreme dayanıklı yapı tasarımında kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Viskoz sönümleyiciler ve sismik izolatörler, betonarme binaların deprem sırasında maruz kalacağı deplasmanları ve görelî kat deplasmanlarını azaltarak, yapısal hasarları ve dolayısıyla can ve mal kayıplarını minimize edebilir. Sismik izolasyon sistemleri uygulamada ve literatürde yüksek katlı betonarme yapılarda genellikle kullanılmamaktadır. Bu sistemlerin viskoz sönümleyicilerle beraber kullanılmasının özellikle yüksek

katlı betonarme binaların deprem tepkilerine etkisi hem uygulama mühendisleri için hem de bu konu üzerinde çalışan araştırmacılar için önemli bir araştırma konusudur. Bu tür yapısal kontrol sistemlerinin, özellikle yüksek betonarme binalarda ve deprem riski yüksek bölgelerde kullanımı, yapıların güvenliğini artırarak toplumların deprem sonrası toparlanma sürecini hızlandırabilir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda, farklı bina yüksekliklerine, farklı kat planlarına ve farklı zemin özelliklerine sahip betonarme binalarda yapısal kontrol sistemlerinin beraber kullanılması ve bu sistemlerin ekonomik ve farklı tip yapı sistemleri için uygulanabilirliği konularının incelenmesi faydalı olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] O. İnce, Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023. Engineering Failure Analysis, 156, 107799, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107799>
- [2] A. Özmen, O. İnce, Ö.F. Taş, M. Atar, O.E. Ozbulut, E. Sayın, Seismic performance assessment of structures in Malatya Province after 6 February 2023 Turkey earthquake sequences. Natural Hazards, 1-34, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07017-x>
- [3] A.R. Zare, M. Ahmadzadeh, Design of passive viscous fluid control systems for nonlinear structures based on active control. Journal of Earthquake Engineering, 23(6), 1033-1054, 2019. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1342295>
- [4] M. Komur, T. Karabork, I. Deneme, Nonlinear Dynamic Analysis of Isolated and Fixed-Base Reinforced Concrete Structures. Gazi University Journal of Science, 24(3), 463-475, 2011.
- [5] C. Zhang, A. Ali, L. Sun, Investigation on low-cost friction-based isolation systems for masonry building structures: Experimental and numerical studies. Engineering Structures, 243, 112645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112645>
- [6] A.H. Deringöl, E.M. Güneyisi, Influence of nonlinear fluid viscous dampers in controlling the seismic response of the base-isolated buildings. Structures, 34, 1923-1941, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.106>
- [7] M.C. Constantinou, M.D. Symans, Seismic response of structures with supplemental damping. The Structural Design of Tall Buildings, 2(2), 77-92, 1993. <https://doi.org/10.1002/tal.4320020202>
- [8] Z. Germen, Yapısal kontrol sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [9] T. Işık, Yapılarda sürtünmeli elemanlar ile viskoz sönümleyicilerin birlikte uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006. <http://hdl.handle.net/11527/6941>

- [10] A. Ras, N. Boumechra, Study of nonlinear fluid viscous dampers behaviour in seismic steel structures design. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 8635-8648, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1460-5>
- [11] M. Mohebbi, M. Noruzvand, H. Dadkhah, K. Shakeri, Direct displacement-based design approach for isolated structures equipped with supplemental fluid viscous damper. *Journal of Building Engineering*, 45, 103684, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103684>
- [12] D. Öztürk, Viskoz sönümleyici elemanların mevcut bir okul yapısının sismik davranışı üzerindeki etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2022. <https://hdl.handle.net/11499/39687>
- [13] J.W. Jung, M.K. Kim, J.H. Kim, Experimental study on the floor responses of a base-isolated frame structure via shaking table tests. *Engineering Structures*, 253, 113763, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113763>
- [14] M. Dolce, D. Cardone, F.C. Ponzio, Shaking-table tests on reinforced concrete frames with different isolation systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(5), 573-596, 2007. <https://doi.org/10.1002/eqe.642>
- [15] M. Dikmen, Deprem etkisindeki bitişik binalarda çarpışma etkisini önlemek için viskoz sönümleyicilerin optimum tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [16] E. Sansarcı, Yapısal kontrol sistemleri ve sıvı sönümleyicilerin yapılarda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [17] Ü. Aldemir, E. Aydın, An active control algorithm to prevent the pounding of adjacent structures. In: *Vibration Problems ICOVP 2005*. Springer Netherlands, 33-38, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5401-3_7
- [18] W.H. Robinson, A.G. Tucker, A lead-rubber shear damper. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 10(3), 151-153, 1977. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.10.3.151-153>
- [19] I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry, *An Introduction to Seismic Isolation*; John Wiley and Sons Inc, 1993, New York, NY, USA.
- [20] B. Çakıl, Betonarme Bir Dupleks Binanın Sismik İzolasyonsuz ve İzolasyonlu Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
- [21] M. Çağlar Camgöz, Taban İzolasyonlu Sistemler. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002. <https://hdl.handle.net/11527/10854>
- [22] E. Sevim, Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [23] G.P. Warn, K.L. Ryan, A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. *Buildings*, 2(3), 300-325, 2012. <https://doi.org/10.3390/buildings2030300>
- [24] T. Toprak, Burulma Düzensizliği Olan Yapılarda Sismik İzolasyon Kullanımının Deprem Yükleri Altındaki Davranışa Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012. <http://hdl.handle.net/11527/6643>
- [25] F. Naeim, J.M. Kelly, *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & Sons Inc, 1999, USA.
- [26] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [27] Z. Kanbir, C. Alhan, G. Özdemir, Üstyapı sönüm oranının deprem etkisindeki kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimli binalardaki etkilerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 25(2), 655-665, 2022.
- [28] E. Güngör, E. Yıldırım, K.E. Demirhan, Köprülerde Kullanılan Kurşun Çekirdekli Kauçukizolatörler İçin Ce Sertifikalandırılması ve Üretim Kontrol Değerlendirilmesi. 4. Köprüler ve Viyadükler Sempozyumu, 1-2 Kasım, 2019, Ankara.
- [29] S.S. Tezcan, A. Erkal, Seismic base isolation and energy absorbing devices. Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, 2002.
- [30] D. Lee, D.P. Taylor, Viscous damper development and future trends. *The structural design of tall buildings*, 10(5), 311-320, 2001. <https://doi.org/10.1002/tal.188>
- [31] M. D. Güler, Üç Katlı Çelik Bir Yapının Performansının Belirlenmesi ve Viskoz Sönümleyiciler İle Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015. <http://hdl.handle.net/11527/13861>
- [32] Y. Durgun, Mevcut betonarme yapıların deprem performanslarının belirlenmesi ve viskoz akışkanlı sönümleyiciler ile güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016. <http://hdl.handle.net/11527/25572>
- [33] H.K. Miyamoto, A.S. Gıllan and A Wada. State of the art design of steel moment frame buildings with dampers. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. pp. 12-17, Beijing, China, 2008.
- [34] SAP2000. Integrated finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.
- [35] Taylor Devices. Taylor Fluid Viscous Damper C-Values Datasheet, North Tonawanda, NY 14120, <https://www.taylordevices.com/>
- [36] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. Erişim tarihi: 01.04.2020. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>
- [37] SeismoArtif. A Computer Program for Generating Artificial Earthquake Accelerograms Matched to a Specific Target Response Spectrum. 2020. <https://seismosoft.com/products/seismoartif/>
- [38] K.Ö. Çetin, M. İlgaç, G. Can, E. Çakır, B. Söylemez. Preliminary report on engineering and geological effects of the January 24, 2020 magnitude 6.7 earthquake in Elazığ, Turkey, 2020.

[39] E Çakır, K.Ö. Çetin, M İlgaç, G Can, A Elsaid, B Söylemez, F Cuceoglu, Z Gülerce, S Aydın, A Askan, M Gor. Geotechnical aspects of reconnaissance findings after 2020 January 24th, M6.8 Sivrice–Elazığ–

Turkey earthquake. Bulletin of Earthquake Engineering, 19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01112-1>

