

Deprem Yalıtımlı Tank Tasarımında Yönetmeliklerin Doğrusal Olmayan Analiz Prensiplerinin İrdelenmesi

Samet KILIÇ^{1*} 

Öz

Endüstriyel tanklarda, depremlerde hasarları engellemek için, günümüzde sismik yalıtım kullanılmaktadır. Sismik yalıtım, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerektirir. Yalıtımlı tanklar için doğrusal olmayan analiz prensipleri Eurocode8, ASCE7-16 ve diğer kodlarda detaylı olarak verilmiştir ve binalara benzer yapılar için tanımlanan kurallar tanklar için önerilmiştir. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde, yalıtımlı tankların tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne yönlendirme yapılmaktadır. Yaygın tank tasarım kodlarına Eurocode8 Part4, API 650 ve New Zeland Yönetmeliği örneklerdir. Bu yönetmeliklerde sismik yalıtım esaslarından bahsedilmiş fakat tüm tasarım prensipleri tanımlanmamış, ilgili ülkelerin deprem yönetmeliklerine atıfta bulunulmuştur. Tank ve deprem yönetmelikleri kıyaslandığında, doğrusal olmayan analiz prensiplerinin sismik yalıtımlı tanklar için uyumsuzluğu görülmüştür. Bu çalışmada, mevcut yönetmeliklerin sismik yalıtım prensipleri incelenmiştir. Bir adet atmosferik basınçlı, 10m yüksekliğinde, içerisinde su bulunduran çelik tank boyutlandırılıp, uygun yalıtım sistemi tasarımı yapılmış ve doğrusal olmayan analizler için ANSYS kullanılarak, deprem yalıtım sistemleri değerlendirilmiştir. Taban kesme kuvvetleri, yalıtım birimi çekme kuvvetleri, hidrodinamik tank duvarı gerilmeleri ve çalkalanma dalgası yüksekliği sonuçları deprem ölçekleme metotları kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bunlar sonucunda, deprem ölçekleme yöntemlerinin elde edilen sonuçları değiştirdiği, yalıtım biriminin çekme ve basınç kuvveti kapasitelerinde yer değiştirmiş izdüşüm alanının belirleyici olduğu, yalıtım sisteminin tanklarda darbesel mod üzerinde etkili olduğu, devinimsel modda olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tank sismik tasarımı, Taban yalıtımı, Deprem kaydı ölçekleme, Yapı sıvı etkileşimi, Çelik tanklar, Silindirik kabuklar.

The Investigations of Nonlinear Analysis Principles of Codes in Base-Isolated Tank Design

Abstract

Seismic isolation is used today to prevent damage to industrial tanks during earthquakes. Seismic isolation requires nonlinear time-history analysis. Nonlinear analysis principles for seismically isolated tanks are detailed in Eurocode8, ASCE7-16 and other codes and the rules defined for structures similar to buildings are also recommended for tanks. In the Turkish Pipeline Systems and Liquid Storage Tanks Earthquake Regulation, the design of seismically isolated tanks is directed to the Türkiye Building Seismic Code-2018. Examples of common tank design codes are Eurocode8 Part4, API 650 and the New Zealand Regulation. In these regulations, seismic isolation principles are mentioned, but not all design principles are defined, and references are made to the earthquake regulations of the relevant countries. When tank and earthquake regulations are compared, it is seen that nonlinear analysis principles are incompatible for seismically isolated tanks. In this study, seismic isolation principles of current regulations are examined. An atmospheric pressure, 10m high, steel tank containing water is dimensioned, an appropriate isolation system was designed, and isolation systems are evaluated using ANSYS for non-linear analysis. Base shear forces, isolation unit tensile forces, hydrodynamic tank wall stresses and sloshing wave height results are evaluated by comparing earthquake scaling methods. Consequently, it is concluded that earthquake scaling methods change the results obtained, that the displaced projection area is decisive in the tensile and compression force capacities of the isolation unit, and that the isolation system is effective on the impulsive mode in tanks and not on the convective mode.

Keywords: Tank seismic design, Base isolation, Ground motion scaling, Fluid structure interaction, Steel tanks, Cylindrical shells.

¹Star Yazılım Mühendislik ve Danışmanlık, İstanbul, Türkiye, kilicsamet123@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 03.11.2023

Kabul/Accepted: 09.05.2024

Yayın/Published: 18.06.2024

1. Giriş

Günümüzde sismik yalıtım, paslanmaz çelik ve çelik lifli beton gibi katkı malzemeler (Öztürk ve ark., 2021) ve katodik koruma gibi yöntemler kullanılarak, depremlerde tank hasarlarını önlemek hedeflenmektedir. Mevcut olan tank, silo gibi hazneli yapılarda içerisinde bulunan malzeme seviyesini azaltma da bir iyileştirme metodu olarak olabilmektedir (Kılıç, 2023). Ayrıca tanklarda karbon lifli polimerle burkulma kapasitesinin artırılması yönelik deneysel çalışmalar mevcuttur (Aydın ve ark., 2022; Kılıç, 2021; Maali ve ark., 2019). Sismik yalıtım ise, bina tipi yapılarda (Sagiroglu ve ark., 2018; Güler ve Alhan, 2019) kullanıldığı gibi endüstriyel yapılarda da değerlendirilmektedir (Gökçe ve ark., 2021; Güler ve Alhan, 2021; Güler ve Alhan, 2024). Tanklarda sismik yalıtım, gelişmiş sonlu elemanlarla modellemeler, sıvı-yapı etkileşimli çözümler ve zaman tanım alanında analizler gerektirir ve bu analizler, yaygın olarak kullanılmaktadır (Çelebi ve ark., 2023; Maali ve ark., 2018). Uluslararası kodlarda, tanklar için binalarda kullanılan sismik yalıtım prosedürünün izlenmesi önerilmektedir (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003; NZSEE, 2009). Ayrıca, Türkiye'de yakın zamanda geliştirilen Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDTDY, 2021) yalıtımsız tanklar için tüm analiz yöntemleri açıklanmakta ve sismik yalıtım tasarım esasları için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) atıfta bulunmaktadır. Tanımlanan analiz prosedürleriyle (deprem kaydı seçimi, ölçeklenmesi, sönümü, yalıtım sistemi hedef deplasman, rijitlik seçimi vb.) ilgili binalar için birçok bilimsel çalışma olmasına rağmen tanklar için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

Avrupa normları (Eurocode8, 2003) 10.2.'ye göre bir yapının taban yalıtım tasarımı binalarda, tanklarda ve silolarda aynıdır. Zaman tanım alanında bir analiz gerektiğinde, üç adet sismik kayıt kullanılması yeterlidir (Eurocode8, 2003). Aynı yönetmelikte 10.6.'da önem sınıfı IV olan binalarda, potansiyel deprem büyüklüğü $M_w \geq 6,5$ olan, aktif faydan uzaklığı 15 km'den daha az olan yapılarda sahaya özgü spektrumlar önerilmektedir. Çelik tankların darbesel titreşim modu için sönüm oranı %2 ve devinimsel titreşim modu için sönüm oranı %0,5 olarak alınması belirtilmektedir. Sert olmayan zeminlerde, tankların darbesel sönüm oranlarının belirlenmesinde zemin-temel-tank sisteminin etkileşimi sonucu gerçekleşen etkili sönüm oranı dikkate alınmalıdır (Eurocode8, 2003). Amerikan Petrol Enstitüsü'nün tasarım yönetmeliği (API 650, 2020) kapsam kısmında sismik yalıtımlı tankların bu ekin kapsamı dışında kaldığı ifade edilmektedir. Bunun yanında bu ekte yer alan tasarım prosedürleri, darbesel modu için %5 sönümlü tepki spektrumuna ve devinimsel modu için %0,5 sönümlü spektruma dayanmaktadır. Tank, zemin sınıfı F tipi sahada bulunduğu, yer hareketinin sahaya özel tespiti gereklidir (API 650, 2020). Amerikan tasarım yönetmeliği (ASCE7, 2016) 9.13.4.6.4'te zaman tanım alanında analizi için en az üç deprem kaydı kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. 9.12.6.3.3'te taban yalıtımlı tankların tasarım yer değiştirmeleri buna göre hesaplanan

kuvvetler ve diğer tasarım parametreleri için 9.13.3 veya 9.13.4'te binalarda taban yalıtım esaslarının kullanılması tavsiye edilmektedir. Yeni Zelanda yönetmeliğinde yapı-sıvı etkileşimini temsil eden esnek kütle, rijit darbesel kütle ve devinimsel kütle olmak üzere toplam üç kütleli basitleştirilmiş model kullanılmaktadır (NZSEE, 2009). Bu çalışma kapsamında incelenen diğer yönetmeliklerde iki kütleli model önerilmektedir (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003). Devinimsel mod için %0,5, darbesel mod için %5 sönüm önerilirken, zemin-yapı etkileşiminden kaynaklanan ek radyasyon sönümlemesinin de dikkate alınması bu yönetmelikte belirtilmektedir. C5.1 kapsam bölümüne taban yalıtımlı tankların dahil olmadığı belirtilmiştir (NZSEE, 2009). Ülkemizde kullanılan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) 1.1.7'de ise "Binalar ve bina türü yapıların dışında kalan köprüler, barajlar, kıyı ve liman yapıları, tüneller, boru hatları, enerji nakil hatları, nükleer tesisler, doğal gaz depolama tesisleri gibi yapılar, tamamı yer altında bulunan yapılar ve binalardan farklı hesap ve güvenlik esaslarına göre projelendirilen diğer yapılar bu yönetmeliğin kapsamı dışındadır." ifadesi yer almaktadır. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDTDY, 2021) deprem yalıtımlı tankların analiz ve hesap esasları bölüm 6'da verilmiş ancak bu bölümün sadece hesaplarda tank ve sıvının dinamik davranışıyla ilgili modelleme esaslarının verildiği, bu kapsam dışındaki tüm hususlar için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) atıfta bulunmaktadır. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDTDY, 2021) zaman tanım alanında hesap için seçilecek deprem kaydı takımlarının sayısı en az yedi olması gerektiği belirtilirken, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) 14.14.4.4'te "doğrusal olmayan hesap her deprem yer hareketi seviyesinde ve her doğrultuda 5.7.2.1'e göre en az on bir kayıt çifti için tekrarlanacak, ilgili deprem seviyesinde ve doğrultuda yapılan hesaplarda elde edilen en büyük değerlerin ortalamaları tasarıma esas değer olarak dikkate alınacaktır." ibaresi yer almaktadır. Bunların yanında ilgili yönetmelikte, özel deprem yalıtımı veya enerji sönümleme sistemleriyle donatılmış tankların yer alacağı sahalar için sahaya özel deprem tehlikesi çalışması yapılarak ilgili deprem yer hareketi spektrumlarının oluşturulması gerekliliği yazılmıştır. Sönüm ise şöyle tariflenmiştir: "Yerel Zemin Sınıfı ZA veya ZB olan sahalarda bulunan tankların darbesel titreşim modu için çelik tanklar ve ön germeli betonarme tanklarda sönüm oranı %2 ve betonarme tanklarda %5 olarak alınacaktır. Sert olmayan zeminlerde yer alan tankların darbesel sönüm oranlarının belirlenmesinde zemin-temel-tank sisteminin etkileşimi sonucu gerçekleşen etkili sönüm oranı göz önüne alınacaktır. Devinimsel titreşim modu için sönüm oranı %0,5 olarak alınacaktır." Tablo 1'de yukarıda incelenen yönetmeliklerde kullanılması önerilen sönüm oranları, kullanılan kütle sayısı özetlenmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde, deprem kayıtlarının ölçeklemesi için spektrumla uyumlu hale getirme yanında basit ölçekleme metodunun da kullanılabileceği belirtilmektedir (TBHSSDTDY, 2021). Yalıtımlı tanklarda deprem ölçeklendirme yöntemlerinin karşılaştırılmasıyla ilgili çalışmalar çoğaltılmalıdır.

Tablo 1. Seçilen tankın donam sac kalınlıkları.

Yönetmelik	Sönüm (Darbesel)	Sönüm (Devinimsel)	Kütle Sayısı
ASCE7, 2016	% 5	% 0,5	2
Eurocode8, 2003	% 2	% 0,5	2
NZSEE, 2009	% 5	% 0,5	3
TBHSSDTDY, 2021	% 2	% 0,5	2

Son yıllarda taban yalıtımlı tanklara ait gelişmiş sonlu elemanlar ve yapı-sıvı etkileşimli çalışmalar yaygınlaşmaktadır. Aslam tarafından hazırlanan çalışmada, yer hareketlerine maruz kalan eksenel simetrik tankların çalkantı dalgalarını tahmin etmek için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır (Aslam, 1981). Sismik olarak yalıtılmış silindirik sıvı depolama tanklarının akışkan-yapı etkileşimi dikkate alınarak değerlendirilmesine yönelik birleşik bir çalışma bir başka yalıtım sistemleri kullanılan tanklarla ilgili çalışmaya örnektir (Shekari ve ark., 2009). Chen ve Xue, açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan OpenFOAM kullanılarak, dolun seviyesi, uyarma frekansı ve genliğinin sıvı çalkantısı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir dizi sayısal simülasyon gerçekleştirmiştir (Chen ve Xue, 2018). Paolacci yükseltilmiş tanklarda iki farklı taban yalıtım sisteminin etkinliğini araştırmıştır (Paolacci, 2015). Spritzer ve Güzey dünyada yaygın olarak kullanılan tank tasarım yönetmeliklerini doğrusal tasarım ilkeleri bakımından incelemiştir (Spritzer ve Güzey, 2017). Kanyılmaz ve Castiglioni, depremlerin etkilerini azaltmak için yükseltilmiş siloların altında yalıtım birimlerinin kullanımını araştırmıştır (Kanyılmaz ve Castiglioni, 2017). Dinçer, tanklarda yapı-sıvı etkileşimini gözeterik depremlerin neden olduğu çalkantı üzerinde çalışmıştır (Dinçer, 2019). El-Centro depremine maruz kalan silindirik çelik su depolarının yön-deformasyon analizi yapı-sıvı etkileşimi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir (Çelik ve ark., 2018).

Taban yalıtımlı tankların zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri için deprem ölçeklendirme yöntemleri üzerine araştırmalar sınırlıdır ve yönetmelikler arasında kabullerde önemli farklar vardır. Ayrıca tanklarda kullanılan yalıtım sistemleri için kuvvet-yer değiştirme istemi hesaplamaları yönetmeliklerde taşıyıcı sistemi binalara benzeyen yapılar için uygundur. Ülkemizdeki yönetmeliklerde kapsamla ilgili ek çalışmalara ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, doğrusal olmayan analiz prensiplerinin ve ölçekleme yöntemlerinin etkilerini karşılaştırmak için üç farklı yöntemde deprem kayıtları ölçeklenmiştir. Taban yalıtım etkisini araştırmak için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) dikkate alınarak yalıtım sistemi tasarlanmıştır. Tasarım ilkeleri birbirine benzediği için kuvvet & yer değiştirme grafiği Avrupa ve Amerikan yönetmelikleri (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003) ilkelerini de sağlayacak şekilde seçilmiştir. Sonrasında yapı-sıvı etkileşimi dikkate alınarak doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Tankların sismik tepkisini anlamak için tankların taban kesme kuvvetleri, yalıtım birimi yer değiştirmeleri, hidrodinamik gerilmeler ve çalkalanma dalgası yükseklikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarla taban yalıtımı tasarımında doğrusal olmayan analizler prensipleri belirlenirken tanklar için daha uygun yaklaşımlar belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Tank ve Yalıtım Sisteminin Ön Tasarımı ve Sayısal Model Doğrulanması

Amerikan Petrol Enstitüsü'nün tasarım yönetmeliği (API 650, 2020) ve Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDDTY, 2021) kullanılarak devinim ve salınım periyotları bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Tankın çapı 20 m, yüksekliği 10 m'dir. İçerisindeki sıvının su olduğu varsayılmış ve yüksekliği 9 m olarak belirlenmiştir. Çelik malzeme olarak S275JR kullanılmıştır. Amerikan Petrol Enstitüsü'nün tasarım yönetmeliği API 650'ye göre denklem (1) ve denklem (2) ile hesaplanan darbesel periyot 0,15 sn., devinimsel periyot ise 4,82 saniyedir (API 650, 2020). Burada T_c devinimsel, T_i darbesel periyodu, D tank çapını, ρ yoğunluğu, K_s devinimsel periyot hesaplama katsayısını, H yüksekliği, t_u eşdeğer tank duvar kalınlığını, E elastisite modülünü göstermektedir.

$$T_c = 1.8K_s\sqrt{D} \quad (1)$$

$$T_i = \left(1/\sqrt{2000}\right) \left(C_i \times H / \sqrt{t_u/D}\right) \left(\sqrt{\rho}/\sqrt{E}\right) \quad (2)$$

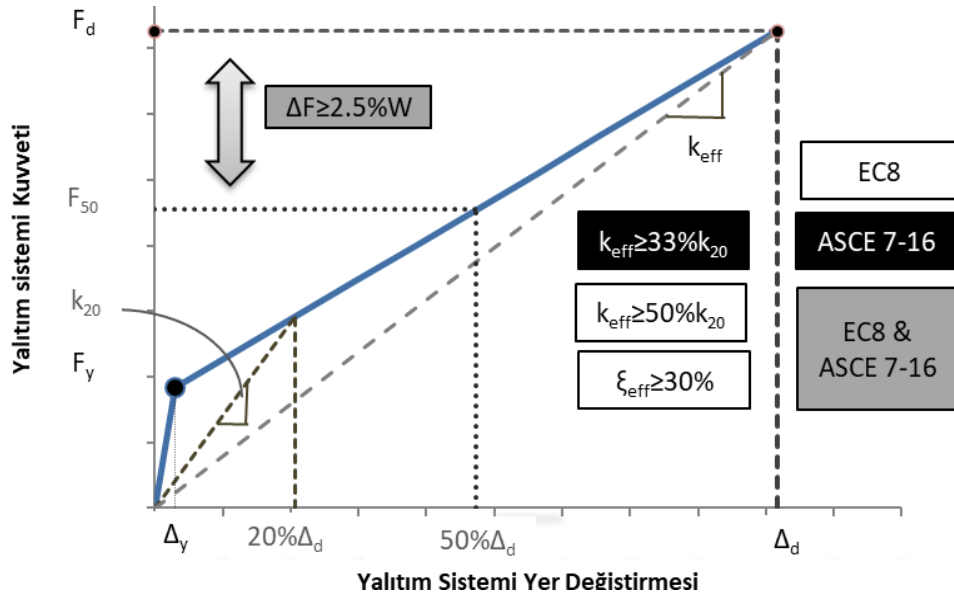
Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'ne (TBHSSDDTY, 2021) göre denklem (3) ve denklem (4) ile hesaplanan tankın darbesel periyodu 0,15 sn., devinimsel periyodu ise 4,81 saniyedir. Tasarımlar için deprem bölgesi olarak Gebze Organize Sanayi Bölgesi kullanılmıştır (URL-3, 2020). Çalışmadaki tankın donam sac kalınlıkları Tablo 2'de sunulmuştur. Burada σ tank cidarında oluşan gerilmeleri, F_y akma gerilmesini, t_{min} hesapla bulunan sac kalınlığını, R tank yarıçapını, C_c devinimsel periyot hesaplama katsayısını, C_i darbesel periyot hesaplama katsayısını, t_w eşdeğer tank duvar kalınlığını, göstermektedir.

$$T_i = C_i \times H \left(\rho \times R / t_w \times E\right) \quad (3)$$

$$T_c = C_c\sqrt{R} \quad (4)$$

Tablo 2. Seçilen tankın donam sac kalınlıkları.

Özet	σ_{T+} (MPa)	σ_{T-} (MPa)	$F_y*0.9*E$	t_{min}	Kalınlık
Donam1 (0-2m)	145,3	67,8	195,2	7.7 mm	10 mm
Donam2 (2-4m)	115,7	48,3	195,2	6.1 mm	8 mm
Donam3 (4-6m)	112,2	41,2	195,2	4.5 mm	6 mm
Donam4 (6-8m)	67,3	20,8	195,2	2.7 mm	6 mm
Donam5 (8-10m)	21,8	1,0	195,2	0.9 mm	6 mm



Şekil 1. Yalıtım sistemi kuvvet & yer değiştirme grafiği belirleme kuralları (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003).

Deprem yalıtım sistemi ön tasarımına ilişkin parametrelerin hesaplanması amacıyla tanklara uygun kuvvet-yer değiştirme grafikleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre belirlenmiştir. Ayrıca bulunan kuvvet & yer değiştirme grafiği Avrupa ve Amerikan yönetmelikleri (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003) şartlarını da sağlayacak şekilde belirlenmiştir. (Şekil 1) Kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimi seçilmiştir. Kurşun çekirdek çapı 25 cm, tüm çapı 60 cm olan 60 adet yalıtım birimi kullanılmıştır. Yalıtım biriminin etkin akma dayanımı 55 kN, etkin akma yer değiştirme 1,2 cm, başlangıç (elastik) rijitliği 4673 kN/m, ikincil (elastik ötesi) rijitlik ise 467 kN/m ve hedef yer değiştirme 29 cm seçilmiştir. Hedef yer değiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik 638 kN/m olarak hesaplanmıştır. Hesaplarda alt ve üst sınırlar dikkate alınmamış, nominal rijitlik kullanılmıştır. Etkin sönüm oranı %18 olarak belirlenmiştir. Yalıtım sisteminin düşey rijitliği TBDY'de (TBDY, 2018) elastomer yalıtım birimleri için tanımlanan denklemlerle hesaplanmıştır. Çekme ve basınç altında aynı rijitlik olduğu varsayılmış ve düşey ekseninde doğrusal yaylar ile modellenmiştir. Düşey rijitlik 8217396 (kN/m) olarak hesaplanmıştır.

2.1. Sonlu Eleman Modeli Kabulleri

Sonlu elemanlar modelindeki en önemli husus yapı-sıvı etkileşimini tanımlamaktır. Bu tanımlama ANSYS'te "Explicit Dynamic" analizde Eulerian ve Lagrangian cisimleri arasındaki etkileşim kullanılarak modellenebilmektedir (ANSYS, 2018). Bir diğer yöntem ise "Fluent" ve "Transient Structural" analizlerini yapıp bunları "Coupled" analizle birleştirmektir. Bu çalışma kapsamında ikinci olarak tariflenen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem için çalkantı hareketini ANSYS Fluent'te tanımlamak amacıyla rastgele yatay sinüzoidal dalga tanımlanmıştır (ANSYS, 2018). Daha sonra tank duvarları ile sıvı arasında arayüzler (interface) tanımlanmıştır. Arayüz modeli

olarak keskin (sharp) tip kullanılmıştır. Yer çekimi için, 1 g'lik bir dikey ivme uygulanmıştır. Tank yapısı, ANSYS Transient'te kabuk elemanları (Shell 281) kullanılarak modellenirken, sıvı alanı (Solid 186) elemanları kullanılarak modellenmiştir (ANSYS, 2018). Her düğümde, kabuk elemanların altı serbestlik derecesi vardır: üçer öteleme ve dönme. Akışkan elemanların düğüm noktası başına dört serbestlik derecesi vardır: x, y ve z yönlerindeki ötelemeler ve basınç (Moslemi ve Kianoush, 2016). Yalıtım birimlerini, ANSYS Workbench yazılımına tanıtmak için "COMBIN14" elemanları kullanılmış, doğrusal olmayan davranışı tanıtabilmek için bu elemanlar büyük şekil-değiştirme kapasitesi olan "COMBIN39" a dönüştürülmüştür (ANSYS, 2018). Yalıtım biriminin aksenel (dikey) davranışını modellemek için, doğrusal elastik yay kullanılmıştır. (COMBIN 14). Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz için Newmark yöntemi kullanılmıştır. Modellemelerde malzemelerin doğrusal olmayan davranışları dikkate alınmıştır. İki analiz birbirine "Coupled" analizle birleştirilmiştir. Bu sayede akış analizinden elde edilen kuvvet bileşenleri, yapısal tasarıma aktarılmakta, bu kuvvetlerden elde edilen şekil değiştirmeler de akış analizine geri iteratif olarak aktarılmaktadır. Bu varsayımlara dayalı olarak, ANSYS'te doğrusal olmayan modeller oluşturulmuştur (ANSYS, 2018). Bu matematiksel modellerde kullanılacak akışkan alanının kılavuz denklemleri ve sonlu eleman formülasyonu aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır (Kılıç, 2022). Buna göre, tabanın rijit olduğu varsayılmaktadır. Akışkanın sıkıştırılmaz ve viskoz olmadığı; akış lamine olduğu önemli varsayımlardır. Her noktada Laplace denklemi sağlandığı varsayılır.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (5)$$

$$\phi = \phi(x, y, z, t) \quad (6)$$

Denklem (5) ve (6), zamana bağlı sınır koşulları ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözülür. Burada akışkanla temas halindeki katının sınırının yüzeyine normal olan yön farkı d/d_n , tank duvarının normal hızı v_n ile gösterilir (Denklem (7)).

$$d\phi/dn = v_n \quad (7)$$

Serbest yüzey için denklem (8), denklem (9)'te, Bernoulli kanunu geçerlidir (Pal ve ark., 2017).

$$d\phi/dt + g\delta = -1/\rho p_0 \quad (8)$$

$$d\delta/dt - d\phi/dy = 0 \quad (9)$$

g yerçekimi ivmesini, ρ sıvı yoğunluğunu, $y=f(x,z,t)$ serbest yüzey denklemini ve $p_0(x,z,t)$ yüzey basıncını ifade etmektedir. Yukarıdaki iki denklemden δ çıkarılarak, tek bir denklem (10)

bulunur. Serbest yüzeyde, çoğu durumda p_0 =sabit olduğu varsayılır, bu nedenle dp_0/dt kaybolur ve denklemler, aşağıdaki denklem (11)'e dönüşür (Pal ve ark., 2017). B_2 sıvının serbest yüzeyini göstermektedir. Galerkin Sonlu Elemanlar Metoduna dayanarak, bilinmeyen alan değişkeni ϕ denklem (12) ile ifade edilir (Kılıç, 2022).

$$d^2\phi/dt^2 + g d\phi/dy = 1/\rho dp_0/dt \quad (10)$$

$$d^2\phi/dt^2 + g d\phi/dy = 0 \text{ on } B_2 \quad (11)$$

$$\phi = \sum_1^n N_j(x, y, z)\phi_j(t) \quad (12)$$

N_j şekil fonksiyonlarını, $\phi_j(t)$ ise alan değişkenini, ϕ zamana bağlı düğüm değerlerini ifade eder. Tipik bir düğüm için denklemlerde ϕ yerine koyulursa denklem (13) elde edilir. Akışkan içermeyen yüzey kütle matrisi, akışkan rijitlik matrisi ve akışkan vektörü sırasıyla M_f , K_f ve F_p 'dir.

$$[M_f]\{\ddot{\phi}\} + [K_f]\{\phi\} = \{F_p\} \quad (13)$$

Hesaplanan ϕ değerleri, belirtilen herhangi bir zaman adımında çalkantı yer değiştirmesini denklem (14) ile ve hidrodinamik basıncı denklem (15) ile türetmek için kullanılır (Pal ve ark., 2017).

$$\delta = -1/g d\phi/dt \quad (14)$$

$$p = -\rho d\phi/dt \quad (15)$$

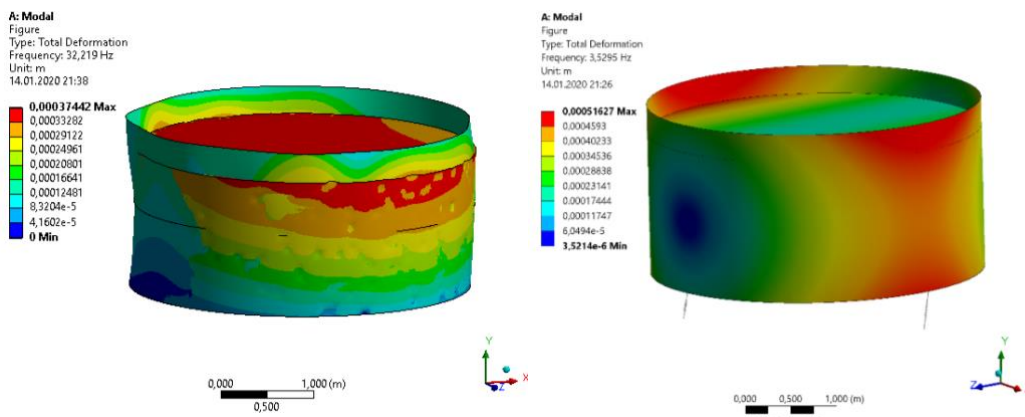
Eleman rijitlik ve kütle matrisleri Gauss kareleme metodu kullanılarak sayısal olarak hesaplanır ve daha sonra tank duvarının global $[K_s]$ ve $[M_s]$ matrislerini elde etmek için denklem (16)'da gösterildiği gibi birleştirilir Tank duvarının genelleştirilmiş düğüm ivmeleri ve yer değiştirmeleri sırasıyla $\{d\}$ ve $\{d\}$ ile gösterilir. Birleştirilmiş sıvı-elastik sistem için $\{F\}$ genelleştirilmiş kuvvet vektörüdür ve denklem (17) ile ifade edilebilir (Pal ve ark., 2017). $\{F_e\}$ dış düğüm kuvvetlerini ve $\{F_p\}$ sıvı salınımı tarafından oluşturulan basıncın bir sonucu olarak tank duvarı tarafında uygulanan düğüm kuvvetlerini ifade eder. Bu denklemler sistemi, birleştirilmiş yapı sıvı sistemini tanımlayan birleştirilmiş ikinci mertebeden adi diferansiyel denklemlerdir. Bu denklem kümeleri çözülür ve iki alan arasındaki etkileşim etkisi, bulunur.

$$[M_s]\{\ddot{d}\} + [K_s]\{d\} = \{F\} \quad (16)$$

$$\{F\} + \{F_e\} = \{F_p\} \quad (17)$$

2.2. Sayısal Modellemenin Doğrulanması

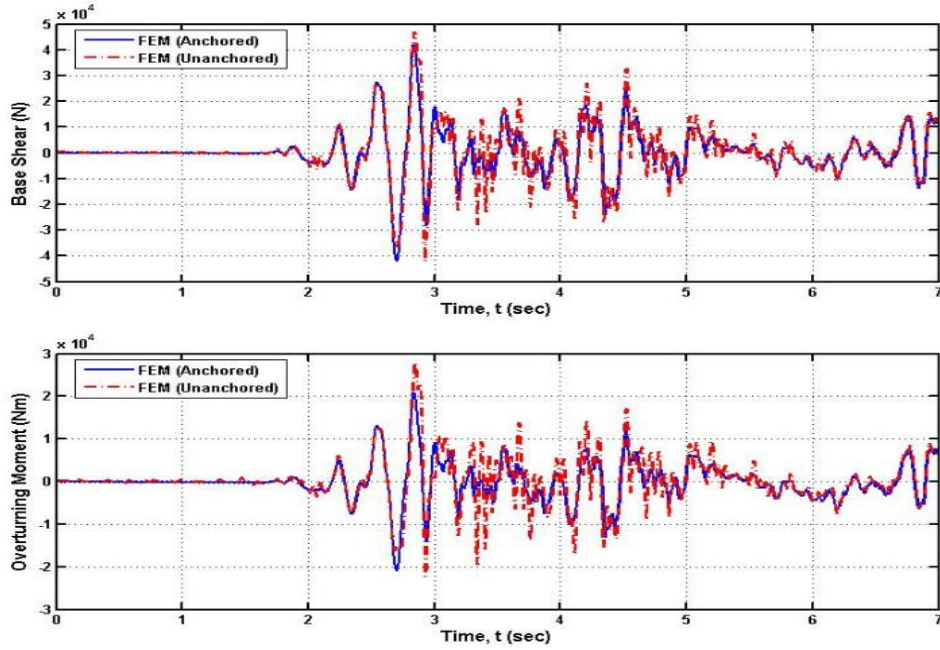
Sayısal modeli doğrulamak için Özdemir ve arkadaşları tarafından yapılan tankın doğrusal elastik olmayan geometrik ve malzeme davranışlarını ve içerikteki sıvının serbest yüzeyinin lineer olmayan çalkalanmasını dikkate alan, sonlu elemanlar metodunun sıvı-katı etkileşimi teknikleri kullanılarak gerçek yer hareketine maruz, zemine oturan çelik silindirik sıvı ihtiva eden tankların gerçek davranışlarını inceleyen çalışmaları kullanılmıştır (Özdemir, 2010; Özdemir ve ark., 2010). Modelin geometrik özellikleri şu şekildedir: Çap: 3,66 m, Yükseklik: 1,83 m, Et Kalınlığı: 2 mm ve sıvı Yüksekliği: 1,53 m'dir. Tank sabit tabanlı ve su doludur. Tankın yapıldığı malzeme alüminyumdur. Yoğunluğu 2700 kg/m^3 , elastisite modülü 71 GPa ve akma dayanımı 100 MPa'dır. Bu doğrulama sırasında Özdemir tarafından yapılan çalışmadaki model için modal analiz yapılarak çalışmadaki periyotlar elde edilmeye çalışılmıştır (Özdemir, 2010). Ayrıca tezde verilen El-Centro kaydı altında bulunmuş taban kesme kuvvetleri ve devrilme momentleri yapılan doğrulama modeliyle kıyaslanmıştır. El Centro 1940 depreminin 0,50 g tepe ivmesine sahip kuzey-güney yönündeki yatay bileşeni ve 1/3 oranında ölçeklendirilmiş ilk 7 saniyelik kısmı prototip modelde kullanıldığı için, bu çalışmada da aynı kayıt kullanılmıştır. Tanka uygun yalıtım birimi boyutu hesaplanmış ve modele eklenmiştir. Tek serbestlik dereceli sisteme dönüştürülen sistemin elle hesaplanan periyodu ile ANSYS'te yapılan modal analiz sonucu elde edilen periyot kıyaslanmıştır (ANSYS, 2018). Elle hesaplanan devinim periyodu 0.039 s, ANSYS'te yapılan modal analiz sonucunda ise devinim frekansı Şekil 2'de görüldüğü gibi 33,2 Hz, yani devinim periyodu 0,031 s'dir (ANSYS, 2018). El-Centro kaydı altında elde edilen taban kesme kuvveti 51051 N, devrilme momenti ise 32745 Nm'dir.



Şekil 2. a) Yalıtımsız Tank Modal Analiz Sonuçları, b) Yalıtımlı Tank Modal Analiz Sonuçları.

Şekil 3'te Özdemir'in çalışmasından elde edilen taban kesme kuvveti ve devrilme momenti görünmektedir (Özdemir, 2010). Doğrulama modelinden elde edilen değerler ANSYS'teki değerlerle oldukça yakındır (ANSYS, 2018). Yalıtımlı modelden elde edilen frekans 3,5 Hz, yani darbesel periyodu 0,285 s'dir. Elle yapılan hesaplarda bulunan yalıtım periyodu ise 0,395 s'dir. Sonuçlar

modellemenin doğru yapıldığını kanıtlayacak derecede yakınlıktadır. Sayısal modelde kullanılacak parametreler bu şekilde doğrulanarak, belirlenmiştir.



Şekil 3. El-Centro kaydı geçmişi: taban kesme kuvveti ve devrilme momenti (Özdemir, 2010).

3. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları

Doğrusal analizlerin ardından, tanklar 3 adet deprem yer hareketine (DYH) maruz bırakılmıştır.

3.1. Deprem Yer Hareketlerinin Seçimi ve Ölçeklendirmesi

Tablo 3, seçilen deprem kayıtlarının özelliklerini göstermektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için, PEER (Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi) veri tabanından üç kayıt seçilmiştir (URL-2, 2019). Seçilme ve ölçekleme sırasında deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınmıştır. Doğrusal analiz için %5'lik sönüm oranı kullanılmıştır. Kayıtların etkin (anlamlı) süreleri, SeismoSignal yazılımında "Arias Yoğunluğu" yöntemiyle hesaplanmıştır (SeismoSignal, 2020). PEER'den seçilen kayıtlar mevcut tüm ölçekleme yöntemleri kullanılarak ölçeklenmiştir (URL-2, 2019). Basit ölçekleme için PEER (URL-2, 2019) veri tabanının kendi sayfası kullanılmıştır. SeismoMatch yazılımı kullanılarak zaman ve frekans tanım alanında spektral eşleştirmeye ölçekleme yapılmıştır (SeismoMatch, 2020).

Tablo 3. Seçilen deprem kayıtları.

İstasyon Adı	Yıl	Kayıt Adı	Büyükölük (M_w)	V_{s30} (m/s)	Süre (sn)	Pga(g)
Cerro Prieto	1979	Imperial Valley	6,53	471,53	16	0,57
Coyote Lake Dam-SW A	1989	Loma Prieta	6,93	561,43	16	0,34
Sunland-Mt Gleason Ave	1994	Bilgi satırı	6,69	402,16	16	0,37

Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'ne (TBHSSDTDY, 2021) göre: yalıtımsız tank tasarımında, spektrumla eşleştirme yöntemleri gibi basit ölçekleme yöntemi de kullanılabilir. “Ölçeklendirilen deprem kayıt takımlarının yatay bileşenlerinin en büyük doğrultu yönündeki spektral genliklerinin ortalaması $0.8T_i$ ve $1.2T_c$ periyodları arasındaki periyodlar için hedef performans esas yatay tasarım spektrum (S_{ae}) genliklerinden daha düşük olamaz. “İfadesi basit ölçekleme için verilmiştir. Sismik yalıtım kullanılan tanklar için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) sunulan ilkeler önerilmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) ise yalıtımlı tanklar için özel bir madde bulunmayıp, taşıyıcı sistemi binalara benzer yapılar için verilen kurallar tanımlanmıştır: “Deprem yalıtımlı binaların zaman tanım alanında deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçiminde 2.5'te verilen kuralların tümü geçerlidir. Ancak 2.5.2'de tanımlanan $0.2T_p$ yerine $0.5T_M$ (T_M en büyük yer değiştirme altında deprem yalıtımlı binanın üst sınır değerleri ile hesaplanmış etkin titreşim periyodu), $1.5T_p$ yerine ise $1.25T_M$ (T_M en büyük yer değiştirme altında deprem yalıtımlı binanın alt sınır değerleri ile hesaplanmış etkin titreşim periyodu) kullanılacaktır.”

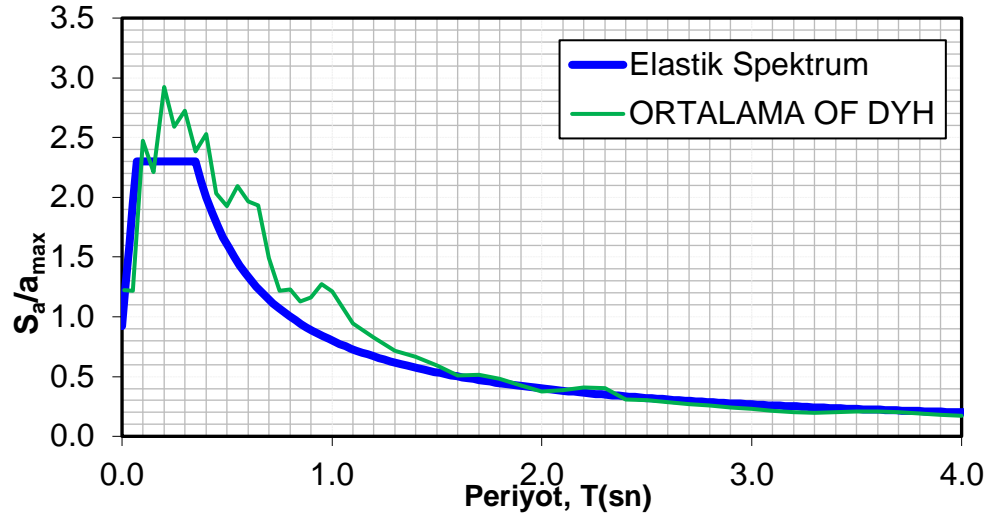
T_M denklem (18) ile hesaplanmıştır. Özellikle yalıtımlı tanklar için, basit ölçeklendirme yöntemi periyot aralığı yönetmeliklerde (TBDY, 2018; TBHSSDTDY, 2021) belirgin şekilde net değildir. Tablo 4'te bu aralıklar hesaplanmış ve sunulmuştur. Bu ölçekleme yapılırken, seçilen tüm kayıtlara ait spektrumların ortalamasının, Tablo 4'te verilen en alt ve en üst sınırlar arasındaki genliklerinin tasarıma esas alınan hedef spektrumun aynı periyot aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, ölçekleme yapılmıştır (Şekil 4). W , g , K_M , H , D , T_i ve T_c sırasıyla sismik ağırlığı, yer çekimini, en büyük deprem yer hareketi yer değiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitliğini, tank yüksekliğini, çapını, tankın darbesel periyodunu ve devinimsel periyodunu göstermektedir.

$$T_M = 2\pi \sqrt{W/gK_M} \quad (18)$$

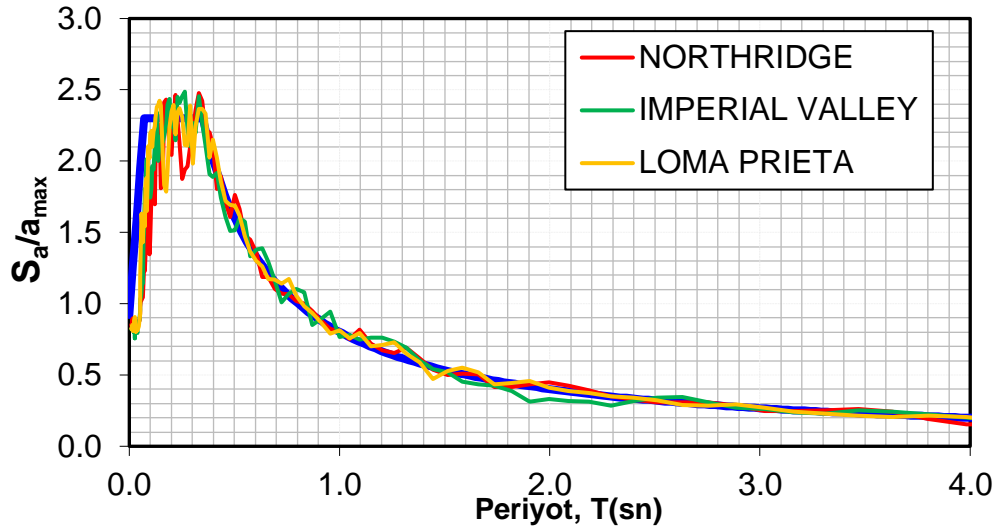
Tablo 4. Basit ölçekleme için tank periyot aralıkları.

D	H	T_i	T_c	$0,8*T_i$	$1,2*T_c$	T_M	$0,5*T_M$
20 m	10 m	0,15 sn	4,82 sn	0,12 sn	5,784 sn	1,67 sn	0,57

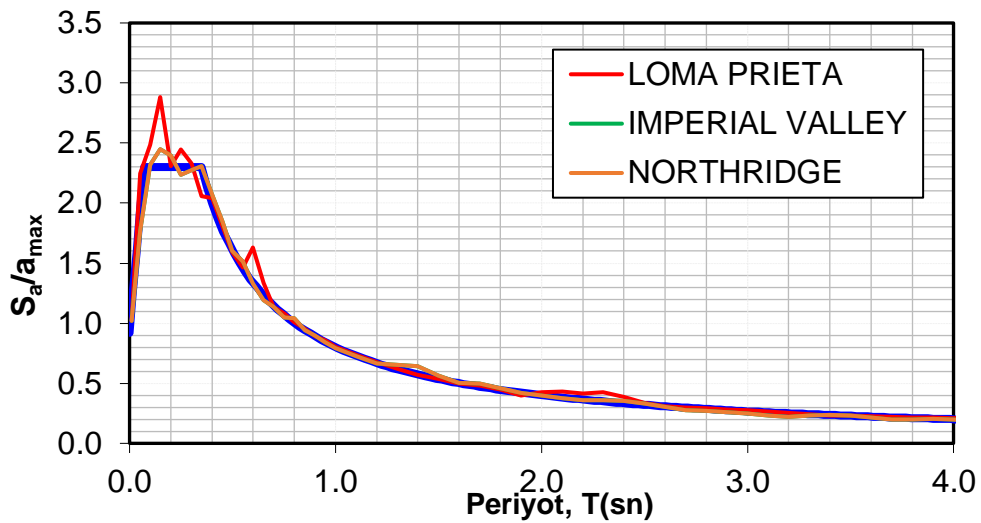
Basit yöntemle ölçeklendirilmiş Loma Prieta (1989), Northridge (1994) ve Imperial Valley (1940) güçlü yer hareketi kayıtlarının spektrumları Şekil 4'te elastik spektrum üzerinde gösterilmiştir. Daha sonra, frekans alanında spektrumla uyumlu hale getirilerek ölçeklenmiş aynı kayıtlar Şekil 5'te elastik spektrum üzerinde ve zaman tanım alanında ölçeklenmiş kayıtlar, Şekil 6'da elastik spektrum üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 4. Basit metotla ölçeklenmiş kayıtlara ait spektrumlar ve tasarıma esas alınan hedef spektrum.



Şekil 5. Frekans tanım alanında spektrumla eşleştirilmiş kayıtlara ait spektrumlar ve tasarıma esas alınan hedef spektrum.



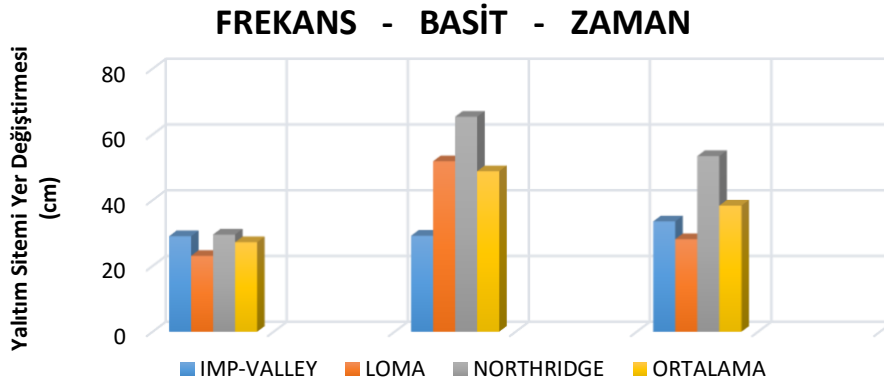
Şekil 6. Zaman tanım alanında spektrumla eşleştirilmiş kayıtlara ait spektrumlar ve tasarıma esas alınan hedef spektrum.

3.2. Tankların ve Yalıtım Sisteminin 3 DYH Etkisinde Sismik Değerlendirilmesi

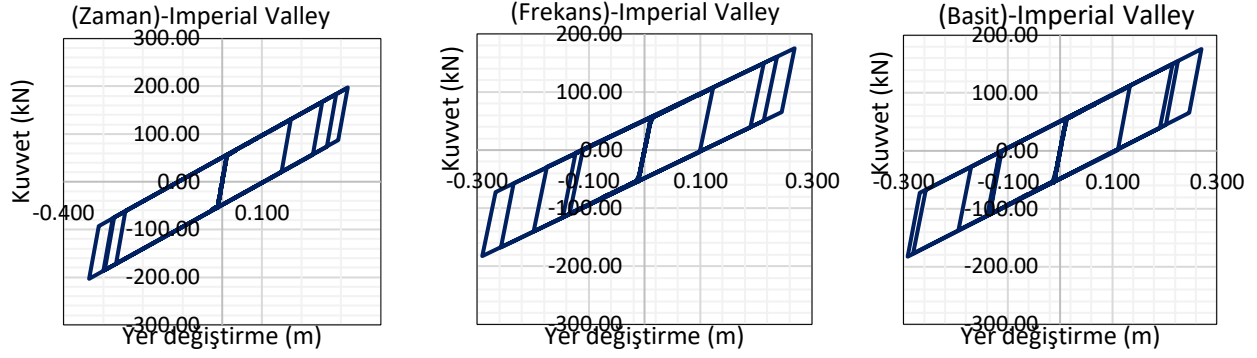
Modal analiz sonuçlarına göre, yalıtımsız tank hâkim periyodu 0,13 sn ve yalıtımlı tank periyodu 0,79 sn.dir. Eldeki verilere göre, yalıtım birimlerin ortalama yer değiştirmeleri 27,23 cm, 48,81 cm ve 38,38 cm olarak bulunmuştur ve maksimum yer değiştirmeleri sırasıyla 29,56 cm, 65,39 cm ve 53,43 cm'dir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre hesaplanan hedef yer değiştirme 29 cm idi. Bu deplasman kriteri ayrıca Avrupa ve Amerikan yönetmelikleri (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003) şartlarını sağlamaktaydı. Buna göre hedeflenen deplasman değerinin frekans alanında spektrumla uyumu sağlanmış kayıtlar haricinde aşıldığı gözlemlenmiştir. En yüksek yalıtım sistemi yer değiştirme sonuçları ise basit metotla ölçeklenmiş kayıtlarda görülmüştür. Detaylı yalıtım yer değiştirme sonuçları Tablo 5 ve şekil 7'de sunulmuştur. Tablo 6'da doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinden elde edilen maksimum taban kesme kuvveti sonuçları ve taban kesme kuvveti değerlerinin tank sıvı ağırlığına bölünerek normalize edilmiş halleri sunulmaktadır. Taban yalıtımlı tanklarda taban kesme kuvvetlerinde önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Basit metotla ölçeklenmiş kayıtlar ile zaman tanım alanında ölçeklenmiş kayıtların kullanıldığı analizlerden elde edilen taban kesme sonuçları birbirine çok yakınken, frekans alanında ölçeklenen kayıtların analiz sonuçlarından elde edilen taban kesme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak diğer sonuçlara göre daha düşüktür (Şekil 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 ve 19). Taban yalıtımlı tanklar için de aynı sonuçlar geçerlidir. Şekil 8, 9 ve 10'da sırasıyla tüm yöntemlerle ölçeklenmiş kayıtlardan elde edilen tankın yalıtım sistemi çevrimsel davranış sonuçları sunulmuştur.

Tablo 5. Yalıtım sistemi yer değiştirme sonuçları.

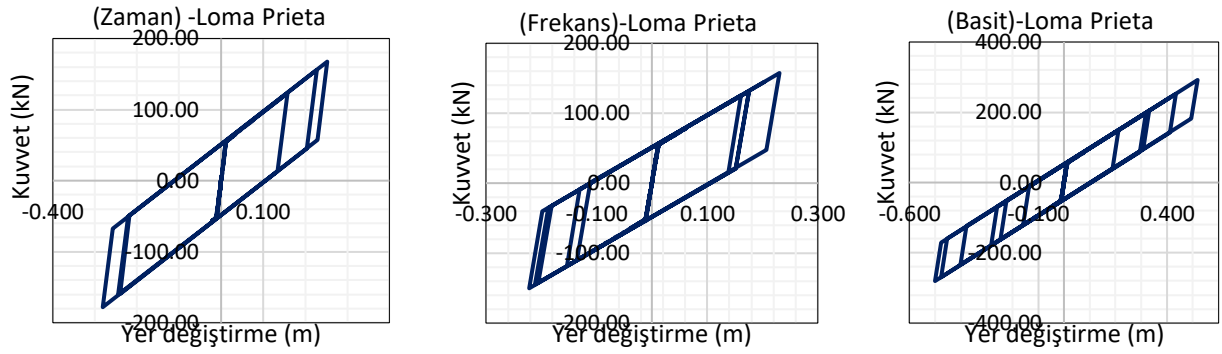
Deprem Kaydı	Frekans Alanında Ölçeklenmiş	Basit Ölçeklenmiş	Zaman Alanında Ölçeklenmiş
Imperial Valley	29,06 cm	29,20 cm	33,56 cm
Loma Prieta	23,075 cm	51,85 cm	28,14 cm
Northridge	29,56 cm	65,39 cm	53,43 cm
Ortalama	27,23 cm	48,81 cm	38,38 cm
Maksimum	29,56 cm	65,39 cm	53,43 cm



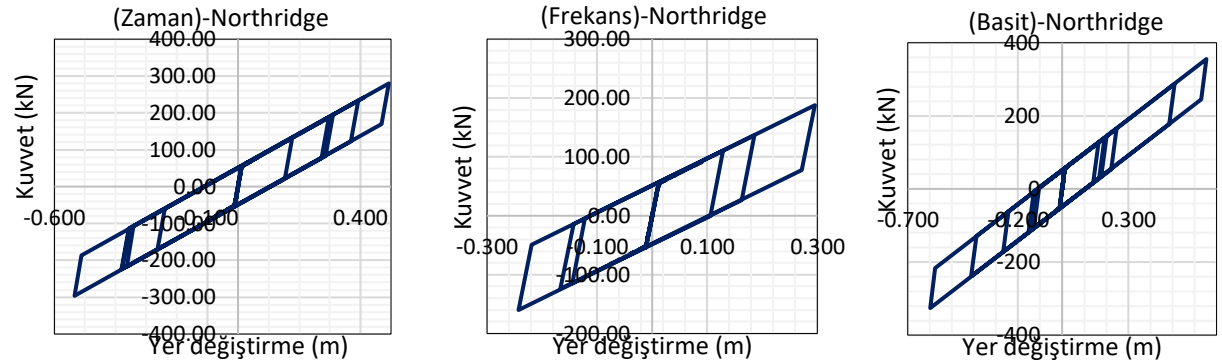
Şekil 7. Yalıtım birimlerinin 3 deprem yer hareketi etkisinde en büyük yer değiştirmelerinin karşılaştırması.



Şekil 8. a) Imperial Valley (zaman), b) Imperial Valley (frekans), c) Imperial Valley (basit), yalıtım birimleri çevrimsel davranış grafikleri.



Şekil 9. a) Loma Prieta (zaman), b) Loma Prieta (frekans), c) Loma Prieta (basit), yalıtım birimleri çevrimsel davranış grafikleri.

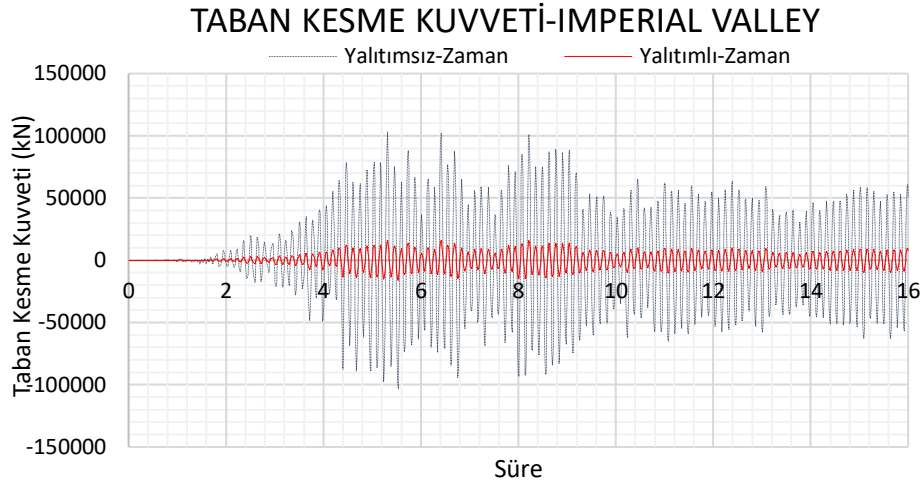


Şekil 10. a) Northridge (zaman), b) Northridge (frekans), c) Northridge (basit), yalıtım birimleri çevrimsel davranış grafikleri.

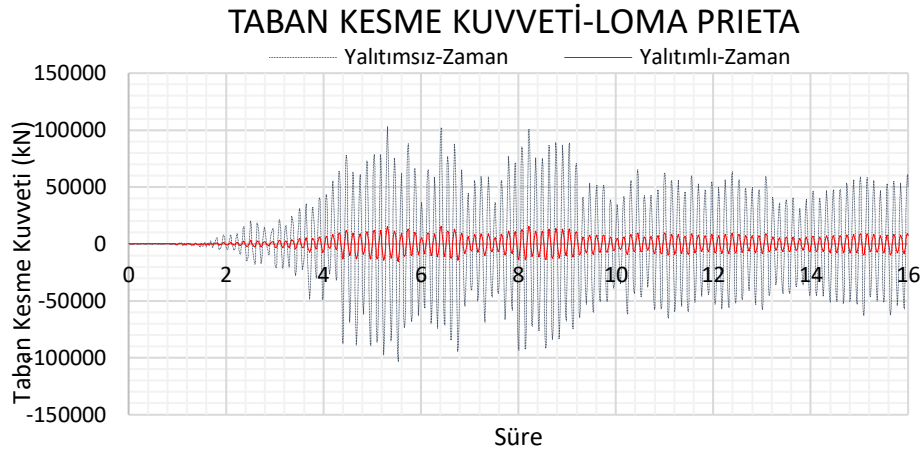
Tablo 6. Maksimum taban kesme kuvveti sonuçları ve taban kesme kuvveti normalize edilmiş hali.

Ölçekleme Metodu	Tank	Loma Prieta	L. Prieta	Northridge	Northridge	Imperial	I. Valley
		Taban Kesme Kuvveti (kN)	(Normal ize Edilmiş)	Taban Kesme Kuvveti(kN)	(Normal ize Edilmiş)	Valley Taban Kesme(kN)	(Normal ize Edilmiş)
Basit	Yalıtımsız	103670	3,738	77994	2,812	121660	4,386
Basit	Yalıtımlı	19487	0,703	26037	0,939	11108	0,400
Zaman	Yalıtımsız	103260	3,723	83025	2,993	121180	4,369
Zaman	Yalıtımlı	15537	0,560	29365	1,059	18919	0,682
Frekans	Yalıtımsız	102990	3,713	103880	3,745	114030	4,111
Frekans	Yalıtımlı	8681	0,313	11274	0,406	11040	0,398

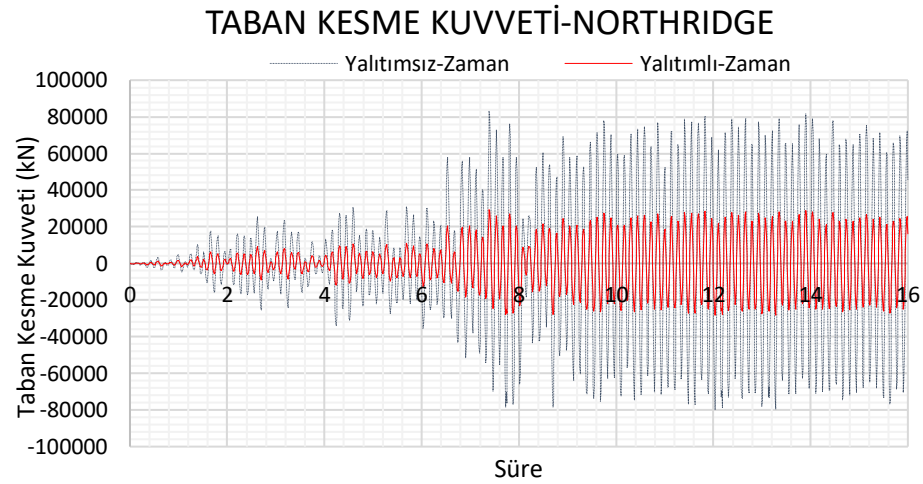
Ayrıca, her bir deprem grubu etkisinde olan yalıtımlı ve yalıtımsız tankların taban kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimi, sürekli ve kesikli çizgilerle aynı şekiller üzerinde gösterilmiştir.



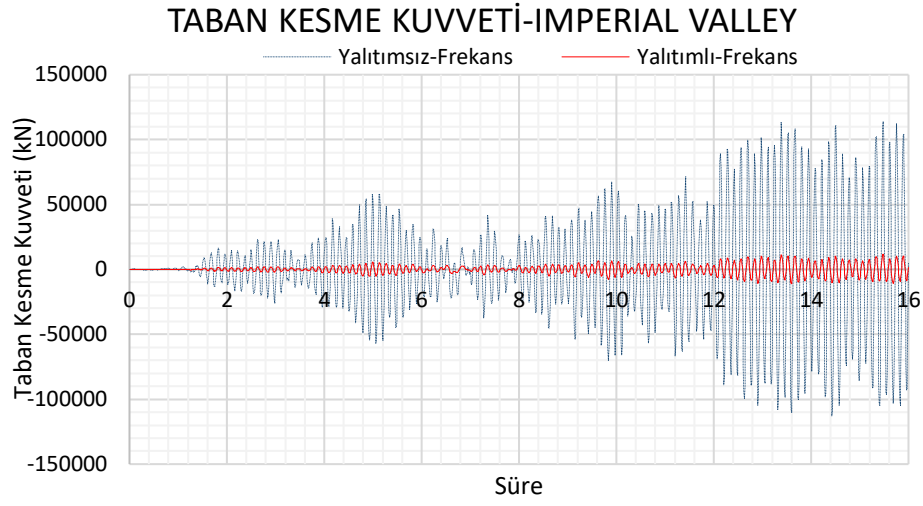
Şekil 11. Basit metotla ölçülen Imperial Valley kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



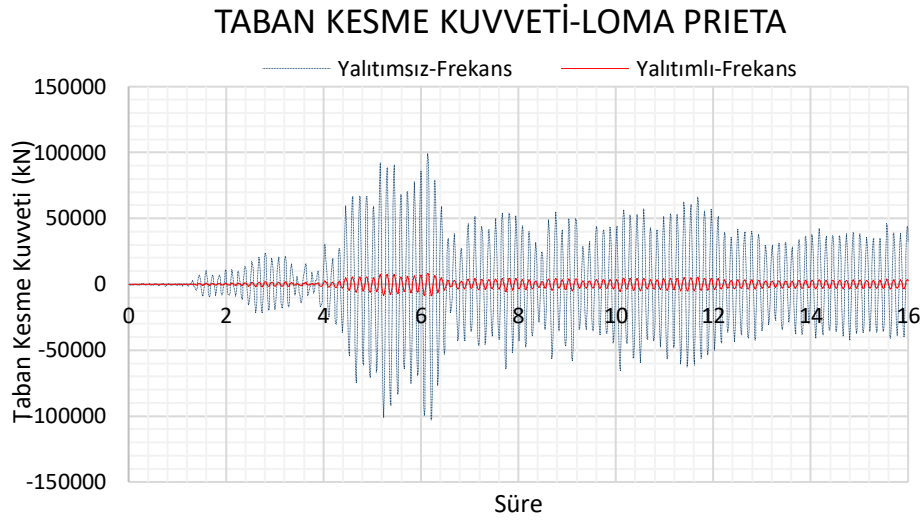
Şekil 12. Basit metotla ölçülen Loma Prieta kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



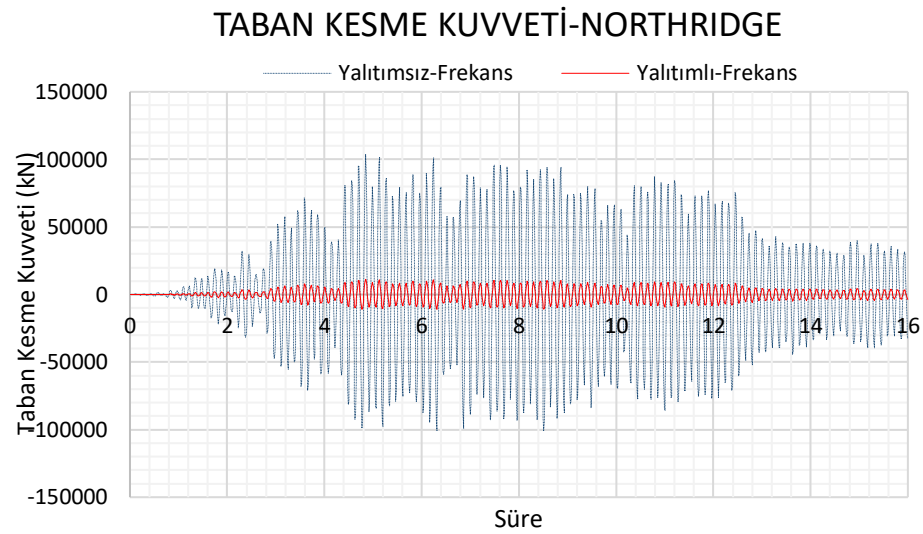
Şekil 13. Basit metotla ölçülen Northridge kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



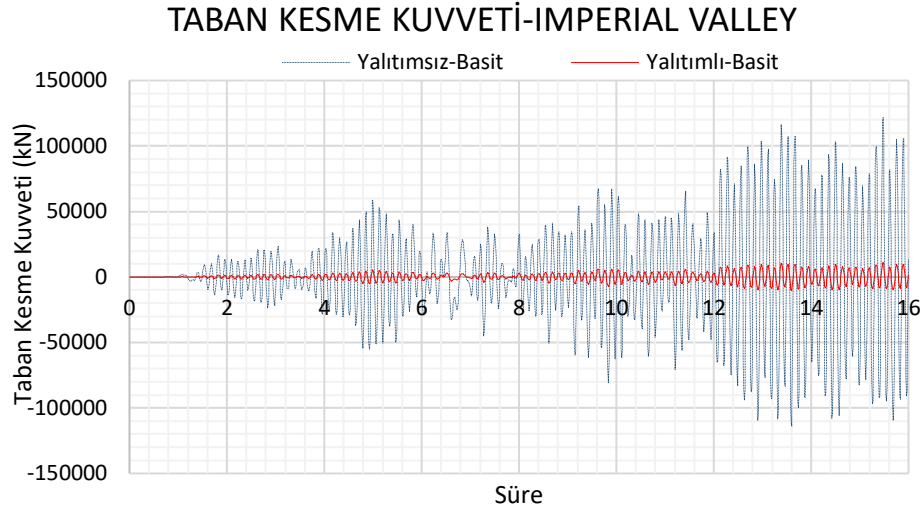
Şekil 14. Zaman tanım alanında ölçeklenmiş Imperial Valley kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



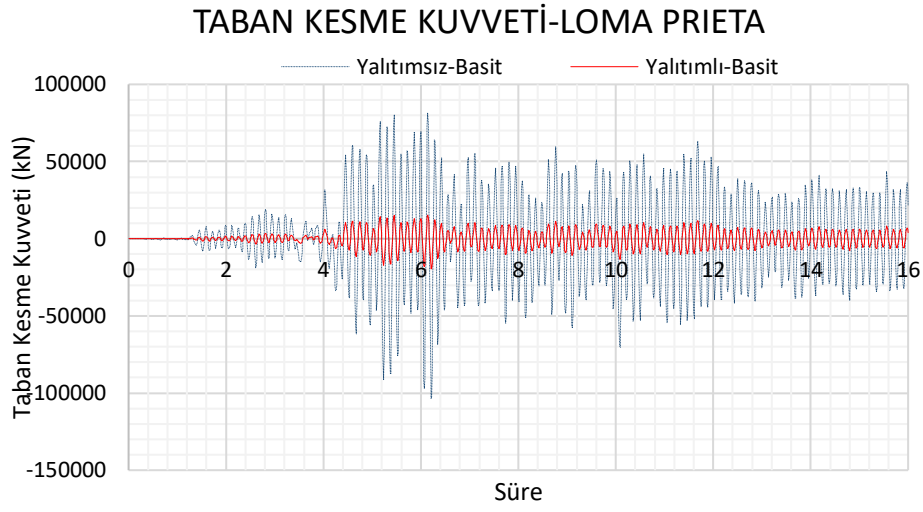
Şekil 15. Zaman tanım alanında ölçeklenmiş Loma Prieta kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



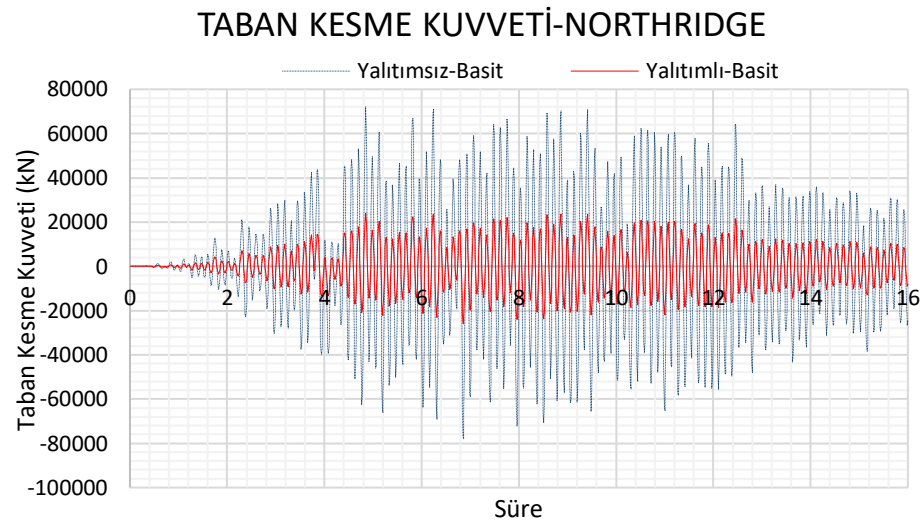
Şekil 16. Zaman tanım alanında ölçeklenmiş Northridge kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



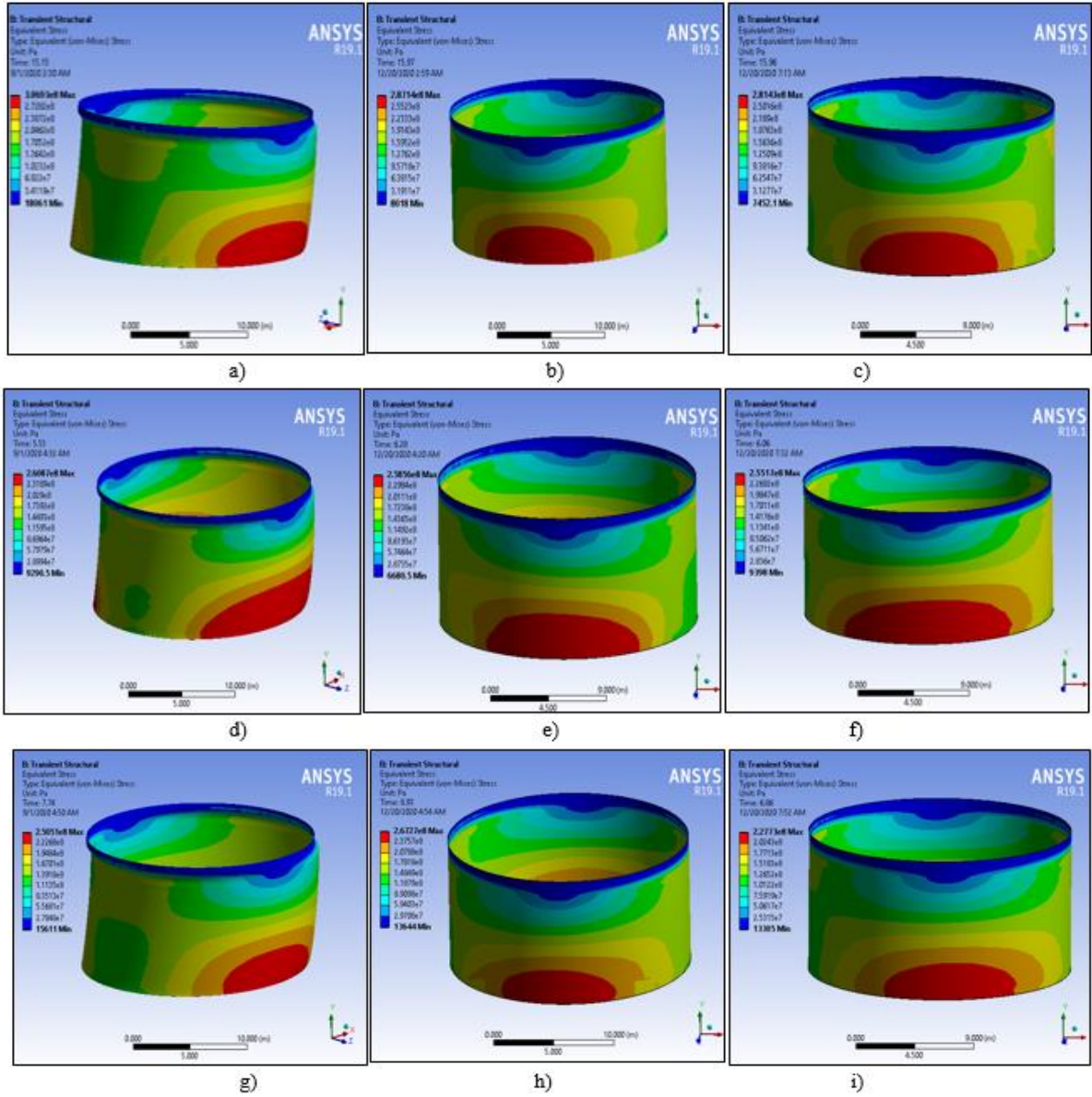
Şekil 17. Frekans tanım alanında ölçeklenmiş Imperial Valley kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



Şekil 18. Frekans tanım alanında ölçeklenmiş Loma Prieta kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.

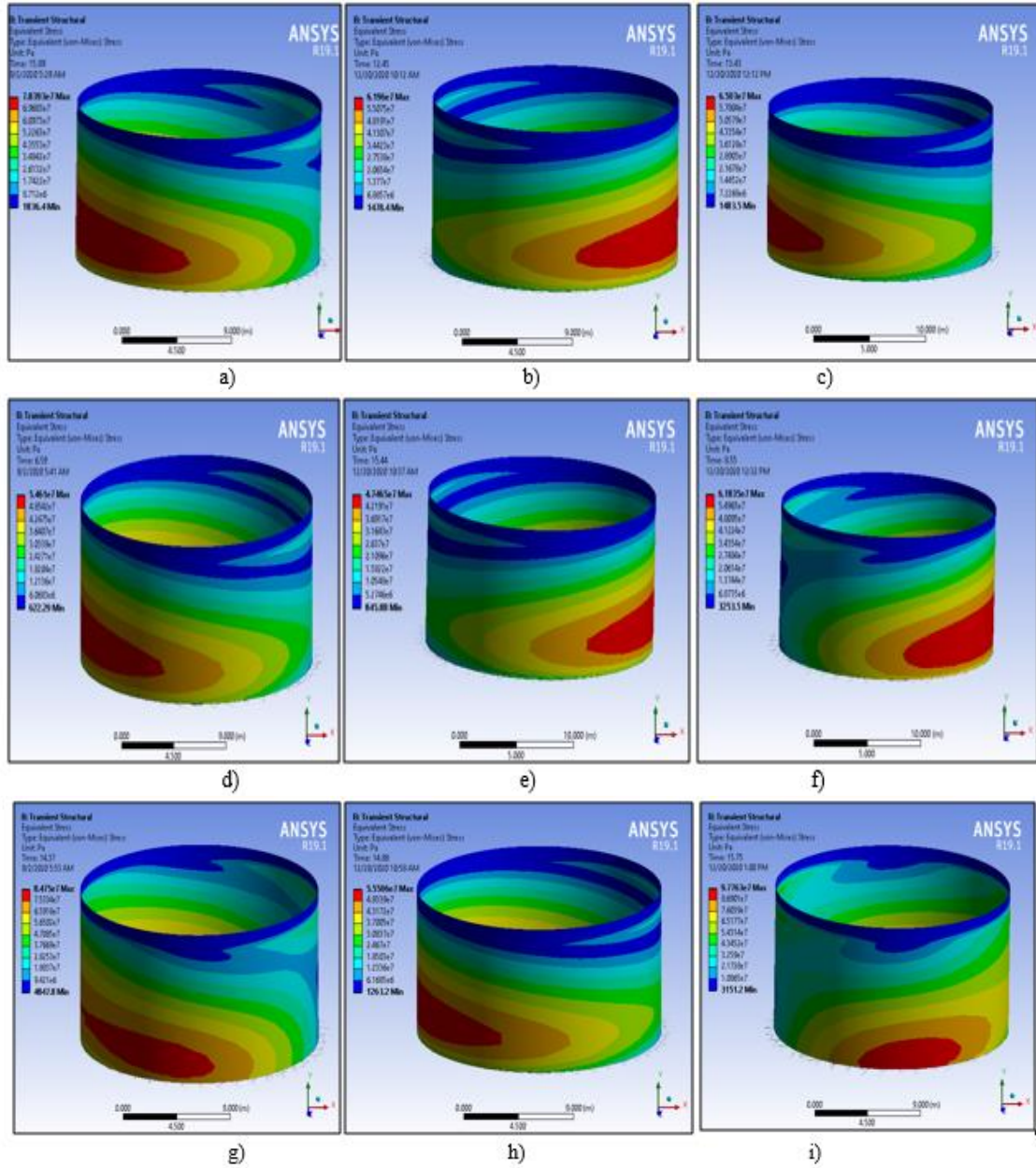


Şekil 19. Frekans tanım alanında ölçeklenmiş Northridge kaydı altındaki taban kesme kuvveti geçmişi.



Şekil 20. (a)Yalıtımsız tankın Von Mises gerilme sonuçları Imperial Valley (zaman), (b)Imperial Valley (frekans), (c)Imperial Valley (basit), (d)Loma-Prieta (zaman), (e)Loma-Prieta (frekans), (f)Loma-Prieta (basit), (g)Northridge (zaman), (h)Northridge (frekans), (i)Northridge (basit).

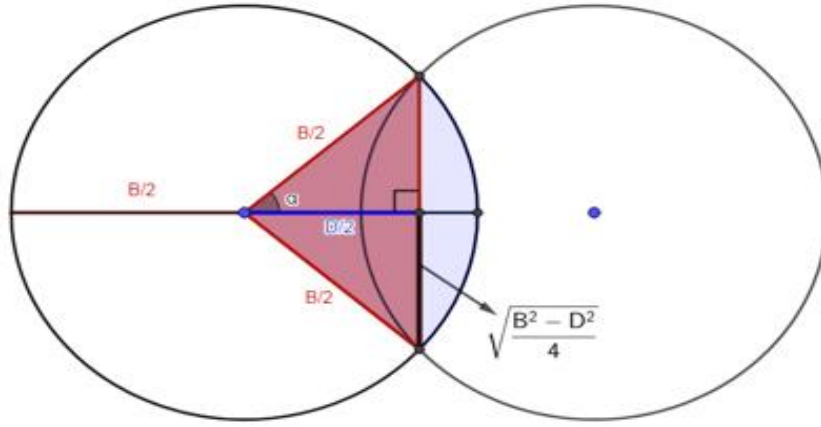
Üç farklı yöntemle ölçeklendirilmiş tüm yer hareketi kayıtları için Şekil 20'de yalıtımsız tankların, Şekil 21'de yalıtımlı tankların duvarlarında oluşan Von Mises gerilme sonuçları sunulmaktadır. Yalıtımlı tank duvarlarında gerilmede büyük bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Yalıtımsız tanklarda ise, tank duvarı hidrodinamik gerilmeleri bazen çelik malzeme S275JR'nin akma gerilmesi limitlerini aşmıştır. Bu durum tank duvarının alt kısmına yakın yerlerde fil ayağı burkulmasına neden olabilir. Taban yalıtımı kullanılmasıyla bu elasto-plastik burkulmanın önüne geçilebilir. Maksimum Von-Mises gerilmeleri ve maksimum çalkalanma dalgası yükseklikleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Yalıtım birimleri yer değiştirmelerinde ve taban kesme kuvveti sonuçlarında önemli bir fark olmasına rağmen, tüm ölçekleme yöntemleri için hidrodinamik gerilmeler (Von Mises) ve maksimum çalkalanma dalgası yükseklikleri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 21. (a)Yalıtımlı tankın Von Mises gerilme sonuçları Imperial Valley (zaman), (b)Imperial Valley (frekans), (c)Imperial Valley (basit), (d)Loma-Prieta (zaman), (e)Loma-Prieta (frekans), (f)Loma-Prieta (basit), (g)Northridge (zaman), (h)Northridge (frekans), (i)Northridge (basit).

Tablo 7. Maksimum çalkalanma dalgası yükseklikleri ve Von Mises gerilmeleri.

Ölçekle me Metodu	Tank	Çalkalanma Dalgası (mm) (Loma Prieta)	Maks. Von Mises Gerilmesi (MPa) (Loma Prieta)	Çalkalanma Dalgası (mm) (Northridge)	Maks. Von Mises Gerilmesi (MPa) (North ridge)	Çalkalanma Dalgası (mm) (Imperial Valley)	Maks. Von Mises Gerilmesi (MPa) (Imperial Valley)
Basit	Yalıtımsız	1443	255	1066	228	1567	281
Basit	Yalıtımlı	1448	62	1096	98	1687	65
Zaman	Yalıtımsız	1767	261	1158	251	1478	307
Zaman	Yalıtımlı	1792	55	1186	85	1518	78
Frekans	Yalıtımsız	1495	259	1158	267	1477	287
Frekans	Yalıtımlı	1488	47	1398	56	1576	62



Şekil 23. Yalıtım birimi iz düşüm alanı hesabı (URL-1, 2020).

Basınç durumunda yer değiştirmiş yalıtım birimin iz düşüm alanının hesaplamasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) göre alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan açının değeri radyan olarak kullanılmalıdır. Yönetmelikte bu açının radyan cinsinden olması gerektiği ifade edilmesi yararlı olacaktır. Alternatif olarak, geometrik yöntemlerle hesap yapılmasına izin verilebilir (Şekil 23). İki yöntem kıyaslanmıştır (URL-1, 2020). Sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Bu çalışmada kullanılan 60 cm çapındaki yalıtım biriminin hedef deplasmanı 29 cm seçilmiştir. 30 cm yer değiştirme yapmış bir yalıtım birimin iz düşüm alanı Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY, 2018) göre denklem. 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25'e göre ve geometrik olarak hesaplanırsa:

$$\delta = 2 \cos^{-1}(D/B) = 2 \cos^{-1}(30/60) = 2 \times 1,0472 = 2,0944 \quad (19)$$

$$A_{re} = A_r \left(\delta - \sin \delta / \pi \right) = \pi * 60^2 / 4 \times \left(2,0944 - \sin 1,0472 / \pi \right) \quad (20)$$

$$A_{re} = 60^2 / 4 \times (2,0944 - 0,866) = 1105,56 \text{ cm}^2 \quad (21)$$

$$\cos^{-1} \left(\frac{D/2}{B/2} \right) = \alpha = \cos^{-1}(30/60) = 60^\circ \quad (22)$$

$$2\alpha = 2 \cos^{-1}(D/B) = 2 \times 60^\circ = 120^\circ \quad (23)$$

$$A = 2 \times \left(\left[\pi \times 2a \times B^2 / 360 \times 4 \right] - D/2 \cdot \sqrt{B^2 - D^2/4} \right) \quad (24)$$

$$A = 2 \times \left(\left[\pi \times 120 \times 60^2 / 360 \times 4 \right] - 30/2 \cdot \sqrt{60^2 - 30^2/4} \right) = 1105,53 \text{ cm}^2 \quad (25)$$

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, basit ölçeklendirme yöntemi gereksinimleri için taban yalıtımlı tankların periyot aralıkları, mevcut kodlarda çok ayrıntılı olarak belirtilmelidir. Taban yalıtımlı tanklar için yer hareketi ölçeklendirme yöntemleri, tank davranışının bağlı olduğu, boy/çap oranı, narinlik (yarıçap/duvar kalınlığı) aralığı, değişik çatı tipleri ve ankrajlı / ankrajsız olma durumları gözetilerek çalışılmalıdır. Çalışmadan elde edilen çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Spektrum eşleşmesi tam sağlanamadığı için yalıtım sistemlerinin basit ölçeklenen kayıtlarda maksimum yer değiştirmesi yüksektir. Frekans tanım alanında ise, maksimum ve ortalama yer değiştirmeler diğer yöntemlere göre düşüktür; sonuçlar hedef yer değiştirmeye oldukça yakındır.
- Spektrum eşleştirme ölçekleme yöntemiyle elde edilen kayıtlar, basit yöntemle elde edilen kayıtlardan ziyade tasarım spektrumu ile daha iyi uyum göstermektedir.
- Özdemir ve Fahjan, frekans alanı ölçekleme işlemi sırasında frekans içeriği değişikçe kayıtların doğal özelliklerini kaybedebileceğini ve eşit yer değiştirme kuralına uymadığı belirtmiştir (Özdemir ve Fahjan, 2007). Doğrusal olmayan analiz için frekans alanında eşleşen spektrum kullanılmaması önerilmiştir. Yalıtım sistemleri yer değiştirme konusuna duyarlıdır. Bu nedenle, özellikle taban yalıtımlı tankların analizi için zaman tanım alanında spektrumlu uyumlu hale getirerek ölçekleme yöntemi önerilmektedir.
- Sonuçlarda, yalıtım sistemlerinin yer değiştirmelerinin, ön tasarımda hesaplanan değerlerden büyük olduğu gözlemlenmiştir.
- Sismik yalıtım, tankların darbesel modlarına yalıtım sistemi etki ederken, devinimsel modlarına etki etmemektedir. Bu sebeple hedeflenen taban kesme kuvvetinden daha büyük bir taban kesme kuvveti görünmesi yanında, daha büyük bir yer değiştirme de gözlemlenmektedir. Yalıtım sistemli tankların hedef yer değiştirme hesaplarının deprem yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlarla uyumlu olmadığını görülmektedir.
- Kılıç ve arkadaşları (Kılıç ve ark., 2022; Kılıç, 2022; Kılıç ve ark., 2021) tarafından daha geniş en/boy oranları olan tanklarda yapılan çalışmalarda, sismik yalıtımın geniş tanklarda etkisini kaybettiği, taban kesme kuvvetiyle yalıtım sistemi yer değiştirmesindeki etkisinin azaldığı sunulmuştur.
- Kullanılan kurşun çekirdekli elastomer yalıtım sistemlerinde düşey deplasman durumunda kavite oluşmakta, sürtünmeli sarkaç tipi yalıtım sistemlerinde ise düşey yükler yenilirse yapıların stabilitesi çok kolay bozulabilmektedir. Bu sebeple yalıtım birimlerinde meydana gelecek çekme kuvvetleri çok önemli olmaktadır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) elastomer yalıtım birimleri için çekme ve basınç altında aynı rijitlik olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle çekme kuvvetleri daha büyük olmaktadır.

- Düşey rijitlik yalıtım birimlerinde kavitasyon sonrası doğrusal olmayan bir davranış göstermekte ve düşmektedir, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) KÇE yalıtım birimleri için basınç ve çekmede farklı düşey rijitlik hesapları önerilmesi yararlı olabilecektir.
- Ayrıca çalışmada elde edilen yanal deplasmanlar, ön tasarımdan daha büyük olduğu için yer değiştirme yapmış KÇE izdüşüm alanı hesabında, deprem yönetmeliği birim sistemi gözden geçirilmelidir (TBDY, 2018).
- Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDDTY, 2021) sismik yalıtımın düşük frekanslı çalkalanma hareketlerine, yüksek frekanslı tank titreşimlerine etkisinden ve yakın saha etkilerinden bahsedilmesi ve örnekler verilmesi faydalı olacaktır.
- Amerikan Petrol Enstitüsü yönetmeliğinde (API 650, 2020) sahaya özel deprem yer hareketi spektrumları bilinen bir faya 10 km mesafeden daha kısa durumlar için zorunludur. Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği'nde (TBHSSDDTY, 2021) bu durum, 25 km mesafeden daha kısa durumlar için zorunludur.
- İki yönetmelikte zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için 11 ve 7 olmak üzere iki farklı deprem kaydı seçme zorunluluğu tanımlanmıştır (TBDY, 2018; TBHSSDDTY, 2021). Uluslararası yönetmeliklerde ise 3 adet kayıt yeterli olduğu ifade edilmektedir (ASCE7, 2016; Eurocode8, 2003). Kayıt sayısının çok olması daha doğru bir yaklaşım olsa bile, yapıya uygun kayıt bulma zorluğu, yapı-sıvı etkileşimli analizlerin boyut ve süreleri düşünüldüğünde 3 kayıt kullanılmasının makul olduğu değerlendirilmektedir (Kılıç, 2015; Kılıç, 2023). Çalışma kapsamında üç kayıt kullanılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- ANSYS. (2018). Workbench user's guide. ANSYS Inc. Southpointe, 275, Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.
- API650. (2020). "Standard Welded Tanks for Oil Storage Appendix-E-Seismic Design of Storage Tanks", American Petroleum Institute.
- ASCE7. (2016). "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE/SEI 7-16. Reston, VA.", American Society of Civil Engineers.
- Aslam, M. (1981). Finite Element Analysis of Earthquake-Induced Sloshing in Axisymmetric Tanks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17, 159-170.
- Aydın, A. C., Bilen, M. B., and Maali, M. (2022). Effect of Hydrochloric Acid Corrosion and CFRP Coating on the Buckling Behavior of Cylindrical Shells under External Pressure. *Scientia Iranica*, 29 (6), 2886-2901. doi: 10.24200/sci.2021.57618.5332
- Çelebi, O., Özer, Ç., Bayrak, B., Kılıç, M., and Aydın, A. C. (2023). Earthquake Response of Historical Church within the Perspective of Structural Dynamics: Oltu Russian Church. *Journal of Building Engineering*, vol.74, 1-40. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106884>
- Çelik, A. İ., Köse, M. M., Akgül, T., and Alpay, A. C. (2018). Directional-Deformation Analysis of Cylindrical Steel Water Tanks Subjected to El-Centro Earthquake Loading. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36 (4), 1033-1046.
- Chen, Y., and Xue, M., (2018). Numerical Simulation of Liquid Sloshing with Different Filling Levels Using OpenFOAM and Experimental Validation. *Water*, 10 (12), 1752. doi:10.3390/w10121752
- Dinçer, E. A., (2019). Investigation of the Sloshing Behaviour Due to Seismic Excitations Considering Two-Way Coupling of the Fluid and the Structure. *Water*, 11 (12), 2664. doi:10.3390/w11122664
- Eurocode8. (2003). "Design of structures for earthquake resistance Part 4: Silos, tanks and pipelines", European Committee for Standardization.
- Gökçe, T., Orakdöğen, E., and Yüksel, E. (2021). Improvement of the Polyurethane Spring Isolation Device for HV Post Insulators and Its Evaluation by Fragility Curves. *Earthquake Spectra*, 2021, 1-21. doi: 10.1177/8755293020981967
- Guler, E., and Alhan, C. (2019). Effectiveness of non-linear fluid viscous dampers in seismically isolated buildings. *Earthquakes and Structures*, 17(2), 191–204. <https://doi.org/10.12989/EAS.2019.17.2.191>
- Guler, E., and Alhan, C. (2021). Performance Limits of Base-Isolated Liquid Storage Tanks with/without Supplemental Dampers Under Near-fault Earthquakes. *Structures*, 33 (2021), 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.023>
- Guler, E., and Alhan, C. (2024). Behavior of Base-Isolated Liquid Storage Tanks with Viscous Dampers under Historical Earthquakes Considering Superstructure Flexibility. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(1), 109-138. <https://doi.org/10.18400/tjce.1380129>
- Kanyılmaz, A., and Castiglioni, C. A. (2017). Reducing the Seismic Vulnerability of Existing Elevated Silos by Means of Base Isolation Devices. *Engineering Structures*, 143, 477–497.
- Kılıç, M., (2021). Buckling Behavior of Nose Cone Type Steel Tanks Including Horizontal Imperfection. *International Journal of Steel Structures*, 21 (4), 1408-1419. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00512-y>
- Kılıç, S., (2015). *The Investigation of the 25 Percent Rule in Concentrically Brace Frame Dual System with Special Moment Frame*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılıç, S., (2022). *Endüstriyel Yapılarda Yatay Geniş Tanklar ile Dikey Narin Siloların Deprem Esnasındaki Davranışlarının ve Farklı İzolatör Tipleriyle Güçlendirilmesinin İrdelenmesi*. Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kılıç, S., Akbaş, B., and Zülfiyar, A. C., (2021, October). The evaluation of Seismic Behavior of Broad Tanks Subject to Strong Ground Motions Scaled with Different Approaches: *6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Gebze, Gebze Technical University.
- Kılıç, S., Akbaş, B., Paolacci, F., and Shen, J., (2022). Seismic Behavior of Liquid Storage Tanks with 2D and 3D Base Isolation Systems. *Structural Engineering and Mechanics*, 83 (5), 627-644. doi:10.12989/sem.2022.83.5.627
- Kılıç, S., Akbaş, B., Uçkan, E., ve Çakır, F., (2021, Haziran). Endüstriyel Yapılarda Yatay Geniş Tanklar ile Dikey Narin Tankların Deprem Esnasındaki Davranışlarının ve Farklı Sismik Yalıtım Sistemleriyle Tasarımlarının İrdelenmesi. *9. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*. İstanbul: Türkiye.

- Kılıç, S., Akbaş, B., Uçkan, E., ve Çakır, F., (2022). Endüstriyel Yapılarda Yatay Geniş Tanklar ile Dikey Narin Tankların Deprem Esnasındaki Davranışlarının ve Farklı Sismik Yalıtım Sistemleriyle Tasarımlarının İrdelenmesi. *İMO İstanbul Bülten*, Sayı 172(2022), 4-11.
- Kılıç, S. (2023, May). The Seismic Assessment of Post-tensioned Reinforced Concrete Silo. *Academy 1st International Conference on Earthquake Studies*. İstanbul: Türkiye.
- Kılıç, S. (2023, Mayıs). Merkezi Çaprazlı ve Moment Aktaran Çerçeveveli Karma Sistemlerde %25 Kuralının İncelenmesi. *Academy 1st International Conference on Earthquake Studies*. İstanbul: Türkiye.
- Maali, M., Kılıç, M., Yaman, Z., Ağcakoca, E., and Aydın, A. C. (2019). Buckling and Post-buckling Behavior of Various Dented Cylindrical Shells Using CFRP Strips Subjected to Uniform External Pressure: Comparison of Theoretical and Experimental Data. *Thin-Walled Structures*, 137 (2019), 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.042>
- Maali, M., Aydın, A. C., Showkati, H., Fatemi, S. M., and Sagiroglu, M. (2018). Longitudinal Imperfections on Thin-Walled Cylindrical Shells. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2018, 8:2, 1-10. doi: 10.4172/2165-784X.1000309
- Moslemi, M., and Kianoush, M. R. (2016). Application of seismic isolation technique to partially filled conical elevated tanks. *Engineering Structures*, 127, 663-675.
- NZSEE. (2009). “Seismic Design of Storage Tanks Recommendations of a NZSEE Study Group on Seismic Design of Storage Tanks”, New Zealand Society for Earthquake Engineering.
- Özdemir, Z., (2010). *Nonlinear Fluid-Structure Interaction for Multi-Dimensional Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks*. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, Z., Souli, M., and Fahjan, Y. (2010). Application of nonlinear fluid structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks. *Engineering Structures*, 32, 409-423.
- Özdemir, Z., ve Fahjan, Y., (2007, Ekim). Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanlarında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. 6. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*. İstanbul: Türkiye.
- Öztürk, O., Yenidünya, E., and Keskin, Ü. S. (2021). Effect of Curing Regimes on the Mechanical and Fresh Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 14-1, 69-81. doi:10.21307/ACEE-2021-007
- Pal, N. C., Bhattacharyya, S. K., and Sinha, P. K. (2003). Non-linear Coupled Slosh Dynamics of Liquid-filled Laminated Composite Containers: A Two-Dimensional Finite Element Approach. *Journal of Sound and Vibration*, 261 (4), 729-749.
- Paolacci, F., (2015). On the effectiveness of two isolation systems for the seismic protection of elevated tanks. *Journal of Pressure Vessels and Technology*, 137 (3), 031801. doi:10.1115/1.4029590
- Sagiroglu, M., Maali, M., and Aydın, A. C. (2018). Installation and Maintenance Principles of Seismic Isolators: Erzurum Health Campus. *The Open Civil Engineering Journal*, 2018, 12, 83-95. doi: 10.2174/1874149501812010083
- SeismoMatch. SeismoSoft Inc, version 2020 [software]. Downloaded from Online Web site: <http://seismosoft.com/products/download/>
- SeismoSignal. SeismoSoft Inc, version 2020 [software]. Downloaded from Online Web site: <http://seismosoft.com/products/download/>
- Shekari, M. R., Khaji, N., and Ahmadi, M. T. (2009). A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, 25, 567-585.
- Spritzer, J. M., and Güzey, S. (2017). Review of API 650 Annex E: Design of large steel welded aboveground storage tanks excited by seismic loads. *Thin-Walled Structures*, 112, 41-65.
- TBDY. (2018). “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- TBHSSDTDY. (2021). “Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği” T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara.
- URL-1: <http://www.geogebra.org/classic/hk6txsdj>, (Erişim Tarihi: 31 Temmuz 2020).
- URL-2: <http://ngawest2.berkeley.edu>, (Erişim Tarihi: 21 Aralık 2019).
- URL-3: <http://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>, (Erişim Tarihi: 14 Haziran 2020).