

Silindirik Depolama Tanklarında Oluşan Çalkantı Etkisinin Akışkan Türüne Bağlı Değişimi

Begüm Yurdanur DAĞLI^{1*}, Muhammet Ensar YİĞİT², Yalçın BOSTANCI³

¹Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Manisa.

^{2,3}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa

Sorumlu yazar e-posta*: begum.dagli@cbu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2021-5450>

e-posta: ensar.yigit@cbu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0161-7144>

e-posta: yalcinbostanci478@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0574-1935>

Geliş Tarihi: 10.04.2023

Kabul Tarihi: 18.09.2023

Öz

Bu çalışma deprem kuvvetinin sıvı depoları gibi özel yapılardaki yıkıcı etkisini, akışkan- yapı etkileşimi problemi açısından ortaya koymak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Yapının dinamik davranışı tank öz ağırlığı, akışkan ağırlığı, çalkantı kuvveti ve deprem kuvveti dikkate alınarak araştırılmıştır. Düzce depremine ilişkin veriler kullanılarak doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. ABAQUS sonlu elemanlar programı ile yapılan analizlerde çelik tank Lagrangian, seçilen üç farklı akışkan Eulerian yaklaşımı ile modellenmiştir. Hesaplar Coupled Eulerian-Lagrangian metod (CEL) üzerinden sürdürülmüştür. Analizlerde açık zaman entegrasyonu kullanılmıştır. Üstü kubbe şeklinde kapatılan silindirik çelik tankın %70 oranında su, yağ ve petrol ile dolu olduğu kabul edilmiştir. Tank üzerinde belirlenen referans noktalarında meydana gelen en büyük yer değiştirme ve Von Mises gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Serbest yüzey profilleri her akışkan için ayrı ayrı elde edilmiştir. Depolanan akışkan türüne bağlı olarak çalkantı kaynaklı hidrodinamik kuvvetlerin yapı üzerindeki etkisinin değiştiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler

Akışkan-yapı etkileşimi;
CEL; Çalkantı; Eulerian-
Lagrangian yaklaşımları

Variation of Sloshing Effect in Cylindrical Storage Tanks Depending on Fluid Type

Abstract

This study is conducted to demonstrate the destructive effect of earthquake force on special structures such as liquid tanks in terms of fluid-structure interaction problem. The dynamic behavior of the structure is investigated considering the tank's own weight, fluid weight, sloshing force, and earthquake force. Nonlinear analysis is performed using data from the Düzce earthquake. In the analyses applied with the ABAQUS finite element program, the steel tank is modeled using the Lagrangian approach, and three different fluid are modeled with the Eulerian approach. The calculations are carried out using the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method. Explicit time integration is utilized in the analysis. It is assumed that the torispherical closed cylindrical steel tank is filled with 70% water, oil, and petroleum. The maximum values of displacement and Von Mises stress at the reference points on the tank are presented comparatively. The free surface profiles are obtained for each fluid type separately. It has been observed that the effect of the hydrodynamic forces caused by sloshing on the structure changes depending on the type of stored fluid.

Keywords

Fluid-structure
interaction; CEL;
Sloshing; Eulerian-
Lagrangian approaches

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Yağ, su gibi akışkanların yanı sıra kimyasal sıvı ve petrol ürünlerinin depolanması ve taşınmasında da yaygın olarak kullanılan silindirik çelik tanklar, deprem, yapısal titreşimler, manevralar nedeni ile çalkantı dalgalarına ve bu dalgaların sebep olduğu

hidrodinamik kuvvetlere maruz kalmaktadırlar (Bayraktar vd. 2010). Tankın duvarlarına etkiyen hidrodinamik basınç kuvveti ve bunlara ilave momentler yapısal hasarlara hatta yıkımlara sebep olabilecek mertebelere kadar ulaşmaktadır (Bayer 2007). Tankın doğal titreşim frekansı ile çalkantı

frekansının birbirine yaklaşması rezonans riskini ortaya çıkarmakta bu da büyük yapısal hasarlara hatta göçmelere yol açmaktadır. Akışkan depolama tanklarında hidrodinamik kuvvetlere bağlı olarak meydana gelen hasar ve göçme tipleri, genellikle aşırı basınç gerilmesi etkisi altında tank duvarının burkulması, ankrajların göçmesi ve taban plağında plastik deformasyon şeklinde görülmektedir (Çelik 2018).

Serbest yüzeyli akışkanların elastik katı cisim ile kuvvet aktarımını içeren bu problem akışkan-yapı etkileşimine önemli bir örnek teşkil etmektedir. Bu nedenle mühendislik alanında konuya ilişkin analitik, nümerik ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır. Akışkan depolama tankları ile ilgili ilk araştırmalar; Jacobsen (1949), Graham ve Rodriguez (1952) ve Housner (1957) tarafından yapılmıştır. Akışkan depolama tankına ait dinamik analizler sismik yükler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Virella vd. (2003) çatının, boş çelik tankların doğal periyotları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu makalede, silindirik bir kabuk ve sabit bir çatı ile inşa edilen ince duvarlı çelik yerüstü tanklarının serbest titreşim sorunu ele alınmıştır. Shrimali ve Jangid (2003) "Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks" isimli çalışmalarında izole edilmiş yüksek, sıvı depolama çelik tanklarının deprem tepkilerini incelemişler, çalışmaların küçük ve geniş olmak üzere iki farklı tank modeli kullanmışlardır. Virella vd. (2005) çalışmalarında, çelik silindirik tankların doğal periyotları, mod şekilleri ile yatay hareketler altındaki tepkileri üzerindeki hidrostatik basınç ve kendi ağırlığından meydana gelen yükün etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, silindir yüksekliği, çap oranları ve hassasiyet oranları farklı olan üç akışkan tank sistemini analiz etmişlerdir. Dooms vd. (2006) çalışmalarında, ovalleşme gözlenen bir siloya ait deneysel sonuçlarla doğrulanan sonlu elemanlar modeli sunmakta ve akışkan-yapı açısından inceleme yapmaktadırlar. Jianbao vd (2010) hacim artışı ile birlikte büyüyen silo boyutlarının belirlenmesi amacı ile bir çalışma yapmışlardır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doldurma ve boşaltma anında çeper basıncı hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda statik duvar

basıncının büyük ölçüde Young modülü, Poisson oranı, tane duvar arası sürtünme katsayısı ve içsel sürtünme açısı ile bağlantılı olduğu görülmüştür. Chaduvula vd. (2013) yüksek su tanklarının sismik davranışını akışkan-yapı-zemin etkileşimi etkisi altında incelemişlerdir. Aynı zamanda analiz ettikleri yapının 1:4 ölçekli bir modelini yaparak sarsma tablası vasıtasıyla yapay bir deprem yüklemesi etkisi altında deneysel olarak da incelemişlerdir. Kotrasová vd. (2014) tarafından zemine sabitlenmiş silindirik tankın deprem kuvveti etkisi ile hidrodinamik analizi Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak ADINA yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Üstü açık silindirik sıvı depolama tankı analizi de iki yönlü akışkan yapı etkileşimi tekniği ile Lagrangian-Eulerian (ALE) formülasyonu kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında üç farklı akışkan ile %70 oranında doldurulmuş düşey silindirik çelik tankın sismik harekete bağlı davranışı incelenmiştir. Çelik vd. (2020) çalışmasında elde ettiği; sıvı tanklarının kubbe şeklinde kapatılmasının deformasyonları ve burkulmaları azalttığı sonucundan yola çıkılarak tank modeli oluşturulmuştur. Yapısal yüklerin yanı sıra su, yağ ve petrole ait akışkan ağırlığı göz önüne alınarak statik yükler hesaplanmıştır. Eşdeğer statik yatay yükler rijit duvarlı ve sabit tabanlı tankın doğrusal matematiksel modeline uygulanmıştır. Tank içerisinde kullanılan her bir akışkanın homojen ve sıkıştırılmaz olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Analizlerde 1999 Düzce depremine ilişkin 1401 nolu istasyondan alınan veriler kullanılmıştır. Üç boyutlu silindirik tank ve ortamı sonlu elemanlar analizi ile modellenerek, yapının dinamik davranışı incelenmiştir. Nümerik akışkan-yapı etkileşimli analizinde sonlu elemanlar programlarından biri olan ABAQUS paket programından yararlanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde çelik tank Lagrangian, seçilen üç farklı akışkan Eulerian yaklaşımı ile modellenerek analiz Coupled Eulerian-Lagrangian metod (CEL) üzerinden sürdürülmüştür. Büyük deformasyonların gözlemlendiği durumlarda kullanılan CEL yöntemi, Lagrangian ve Eulerian yaklaşımlarının tek başına kullanıldığı akışkan-yapı etkileşimi problemlerindeki dezavantajların ortadan kalmasını sağlamaktadır (Liu vd. 2016) İvmeli hareketin sebep olduğu çalkantı

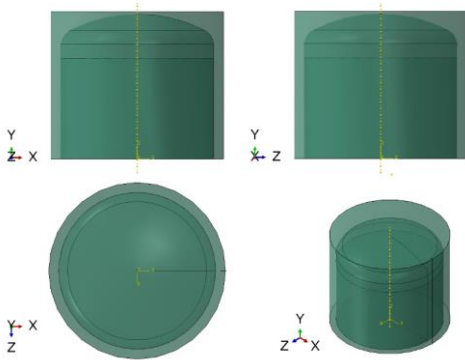
ile meydana gelecek olan hidrodinamik yüklerin gerçeğe en yakın simülasyonu için tank katı model olarak içerisindeki sıvı da akışkan model olarak tasarlanarak birleştirilmiştir. Analizlerde açık zaman entegrasyonu kullanılarak tank içerisindeki akışkan kaynaklı çeper basıncı hesaplanmıştır. Üç farklı akışkan dikkate alınarak elde edilecek gerilme ve yer değiştirme değerleri tankın tabanı ve H toplam yükseklik olmak üzere tabandan itibaren 0.2H, 0.5H, 0.7H ve H mesafelerinde atanacak kontrol noktalarında izlenmiştir. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafikler yardımıyla sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Çalkantı dinamiğinin büyük bir öneme sahip olması nedeni ile akışkanların hareketinin ve hareketin yapılarda sebep olduğu etkilerin simülasyonu son yıllarda yaygın olarak çalışmalara konu olmaktadır (Liu vd. 2022, Kang vd. 2019, Wei ve Zhang 2020). Bu çalışma kapsamında akışkan-yapı etkileşim problemlerinin gerçekçi olarak modellenip analiz edilmesi sırasında kullanılan programlardan birisi olan Abaqus tercih edilmiştir. Yüksek bilgisayar kapasitesi gerektiren analizleri en kısa sürede en doğru şekilde sonuçlandırabilmek için Sonlu Elemanlar esaslı CEL yöntemi kullanılmıştır.

2.1 İnce Cidarlı Silindirik Çelik Tankın Modellenmesi

Deprem etkisi ile silindirik tanklarda oluşan deformasyonların incelendiği çalışmalarda en iyi performans üstü-kubbe şeklinde kapatılan modeller ile elde edilmiştir (Çelik vd. 2020). Bu nedenle proje kapsamında akışkan tipinin çalkantı dinamiği üzerindeki etkisi incelenirken Şekil 1’de verilen kubbe şeklinde çatıya sahip silindirik çelik tank modeli tercih edilmiştir.



Şekil 1. Çelik silindirik tankın görünüşleri

Çalışma için yaygın olarak kullanılan fiziksel karakteristiklere sahip ince cidarlı silindirik akışkan depolama yapısına ait değerler belirlenmiştir. Tankın yapısal boyutları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çelik Silindirik tankın yapısal özellikleri

Fiziksel Karakteristik	Birim	Değeri
Tank çapı	m	15,08
Tank yüksekliği	m	14,27
Duvar kalınlığı	mm	6

Depolama tankının hacminin %70'ine kadar akışkan ile dolu olduğu ve tankın, çoğu araştırmaya benzer şekilde rijit bağlantı ile zemine sabitlendiği kabul edilmiştir (Cho ve Cho 2007, Park vd. 2016, Sharma vd. 2019). Yüksek mukavemet ve yüksek dayanım nedeniyle yapı çelik olarak tasarlanmıştır. Lagrangian yaklaşım ile modellenen çelik tankın mekanik özellikleri Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge 2. Çelik Silindirik tankın mekanik özellikleri

Malzeme	ρ (kg/m ³) Yoğunluk	γ (N/m ³) Birim Hacim Ağırlık	E (N/m ²) Elastisite Modülü	ν Poisson Oranı	t (m) Et Kalınlığı
Çelik	7850	77008	2.1x10 ¹¹	0.3	0.006

2.2 Yapıya Etkiyen Kuvvetler

Depolama için kullanılan yapıların hem amacına uygun hem de emniyetli kullanım şartlarını oluşturacak şekilde yapılabilmesi için üzerindeki yüklerin (statik ve dinamik yükler) doğru olarak belirlenmesi ve kritik yükleme durumları dikkate alınarak analiz edilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında çalkantı etkisini gözlemleyebilmek için tankın hacminin %70'i oranında dolu olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda akışkan yüksekliği 9,90m olarak hesaplanmıştır.

Akışkan depo duvarları hem düşey hem de yatay kuvvetlere maruz kalmaktadır. Düşey kuvvetler akışkan ve çeper arasındaki sürtünme kuvvetinden, yatay kuvvetler ise akışkanın çepere uyguladığı itme kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Özellikle deprem kuvveti etkisinde akışkan depolanan tanklarda çalkantı ile birlikte ilave gerilmeler oluşmakta, çeper basıncı artmaktadır.

Tankın öz ağırlığı kubbe şeklindeki çatı ve ince cidarlı çelik silindirik gövdeden oluşmakta olup bu çalışmada yapı üzerinde bulunan yardımcı ve ilave ekipmanlar dikkate alınmamıştır.

Silindirik tanktaki hidrostatik basınç tabana doğru artan düzgün üçgen şeklindedir. Çalışma kapsamında üç farklı akışkan için hesaplar yapılmıştır. Bu akışkanlara ait özellikler Çizelge 3'te görülmektedir.

Çizelge 3. Akışkan özellikleri

Malzeme	Sesin sıvıdaki hızı C_0 (m/s)	Gruneisen oranı Γ_0	Yoğunluk ρ (kg/m ³)	Dinamik Viskozite μ (N.s/m ²)	Bulk Modülü K (N/m ³)
Su	1450	0	1000	1.002×10^{-3}	2.07×10^9
Yağ	1740	0	865	310×10^{-3}	1.50×10^9
Petrol	1570	0	860	8×10^{-3}	1.35×10^9

Yapıyı harekete geçiren ivme, titreşim moduna katılan yapı kütesinin oranı ile değişen yatay bir kuvvettir (Council 2003). Atalet kuvveti formülü nedeniyle ivme, bir tank üzerindeki kuvvetlerin belirlenmesinde önemli bir faktördür, ancak daha da önemlisi deprem kuvvetlerinin zaman içinde etkisini hesaba katan, hızla birlikte hızlanmadır. Bu çalışmada dinamik analizler Düzce depremi verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzce depremi özellikleri Çizelge 4'te zamana bağlı ivme, hız ve yer değiştirme grafiği ise Şekil 2'de verilmiştir.

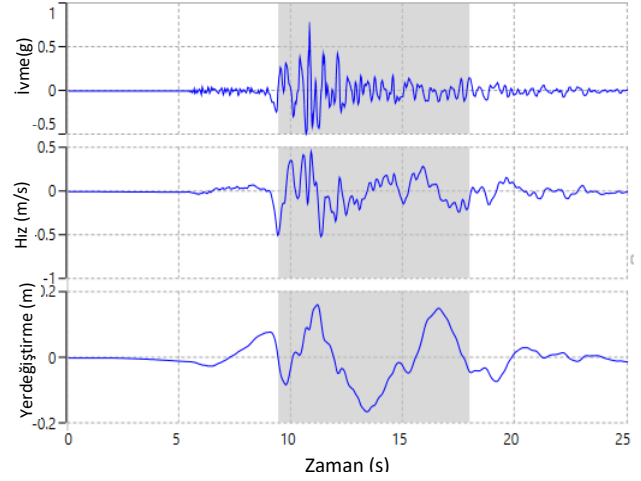
Çizelge 4. Düzce depremi özellikleri

Özellik	Veri
Büyükük (Mw)	7,1
Yer hızı (cm/s)	294,0
Yer ivmesi (g)	0,733
Tip	Yanal atımlı

İstasyondan alınan deprem kaydı 25s için verilmiş olmasına karşın analizler deprem ivmesinin en etkili olduğu 9,44s-17,98s zaman aralığı dikkate alınarak yapılmıştır. En büyük gerilme ve yer değiştirme değerlerinin gözleneceği 8,50s'lik süreç incelenerek analiz süresi kısaltılmıştır.

Depreme maruz kalan depolama yapılarının haznelerinin üstünde bir miktar boşluk olması durumunda harekete geçen serbest yüzeyli akışkan kütesinin oluşturduğu dalgalar hazne duvarlarına çarparak hidrodinamik kuvvetlere sebep olmaktadır.

Çalkantı kuvveti olarak da adlandırılan bu kuvvet konuma bağlı karakteristik fonksiyonlarla zamana bağlı harmonik fonksiyonların çarpımlarının toplamı olarak verilebilir (Housner 1963). Deprem süresince meydana gelen çalkantılar sonucu oluşan hidrodinamik basınçlar haznenin iki kütleli bir yapı sistemi olarak davranış göstermesine neden olduğu kabul edilebilir. Dolayısıyla elde edilen çözüm yöntemi çok serbestlik dereceli lineer sistemlerinki ile aynı olmaktadır.



Şekil 2. Zamana bağlı Düzce depremi verileri

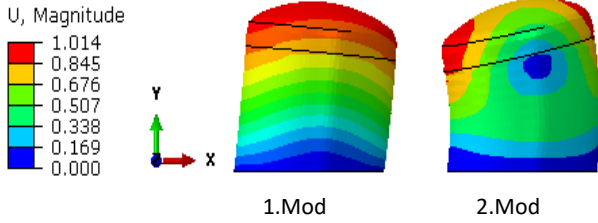
Depolanan sıvının sıkıştırılmaz olduğu tank-sıvı sisteminin modellenmesi için kullanılan basitleştirilmiş Housner mekanik modelinde impulsif (rijit) ve konvektif (çalkalanma) kütleler ile tanımlamalar yapılmaktadır.

Tankın alt kısmındaki akışkan, tank ve temel ile birlikte sanki katıymış gibi hareket ederken, tankın üst tarafındaki akışkan tank ile ters yönde hareket etmektedir (Djermane vd. 2014). İmpulsif mod, tankın, depolanan akışkan ile birlikte hareket etmesi durumunda sisteme ait modu temsil eder. Tanka etkiyen yanal kuvvet impulsif frekansa bağlıdır ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır (Malhotra ve Veletsos 1994).

$$f_i = \frac{1}{c_i} \frac{\sqrt{t/R} \sqrt{E}}{\sqrt{\rho H_L}} \quad (1)$$

Burada ρ akışkanın yoğunluğunu, E tank için kullanılan malzemenin Elastisite modülünü, H_L tank içindeki akışkan yüksekliğini, c_i narinlik parametresi HL/R' 'ye bağlı katsayıyı göstermektedir. Çalışma kapsamında 0,63 olan HL/R değerine karşı, c_i 7,5

alınmıştır (Code 2005). Çalkantı etkisi ile ortaya çıkan deformasyon şekilleri akışkan çeşidine bağlı olarak daha değişken olduğundan ilk iki mod için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te akışkan depolama tankının ilk iki mod şekli verilmiştir.



Şekil 3. Akışkan depolama tankı mod şekilleri

Çalışmada depolama tankının kısmen su, yağ ve petrol ile dolu olması durumları göz önünde bulundurulmuştur. Bu üç farklı akışkanın depolanması koşulu için Denklem (1) kullanılarak hesaplanan ilk iki moda ait doğal titreşim frekansı değerleri Çizelge 5'te görülmektedir.

Çizelge 5. Doğal titreşim frekansı değerleri

Akışkan	1.Mod Doğal Titreşim Frekansı (s ⁻¹)	2.Mod Doğal Titreşim Frekansı (s ⁻¹)
Su	3,8760	9,0787
Yağ	4,1579	9,7331
Petrol	4,1695	9,7601

3. CEL Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşimi Analizi

Tankın Lagrangian yaklaşım ile akışkanın ise Eulerian yaklaşım ile modellendiği sistem için geçerli korunum prensipleri aşağıdaki denklemler yardımı ile tanımlanmıştır.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot u = 0 \quad (\text{Kütlenin Korunumu}) \quad (2)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} + \nabla \cdot \sigma + \rho \beta \quad (\text{Momentumun Korunumu}) \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \sigma : D \quad (\text{Enerjinin Korunumu}) \quad (4)$$

Burada u hız vektörü, ρ yoğunluk, σ Cauchy gerilmesi, β cisim kuvveti, ε ise iç enerjinin birim hacme oranıdır. D/Dt maddesel türev operatörü olup Denklem (5) ile tanımlanmıştır.

$$\frac{D\psi}{Dt} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + u \cdot \nabla \psi \quad (5)$$

Denklemdaki ψ rastgele seçilmiş bir fiziksel büyüklüğü temsil etmektedir. ∇ ise vektörel ve diferansiyel bir operatör olup sırasıyla kartezyen ve silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (6)$$

$$\nabla = e_r \frac{\partial}{\partial r} + e_\theta \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (7)$$

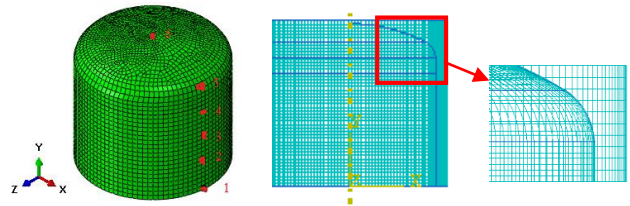
Denklem (6)'da geçen $\{x, y, z\}$ kartezyen koordinatları, $\{i, j, k\}$ ise bu koordinatlara ait birim vektörleri temsil etmektedir. Denklem (7)'de kullanılan $\{r, \theta, z\}$ silindirik koordinatları, $\{e_r, e_\theta, e_z\}$ silindirik koordinatların birim vektörlerini göstermektedir. Denklem (6)'nın korunum denklemlerinde kullanılması ile elde edilen Eulerian yaklaşıma ait genel denklem

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \nabla \cdot \varphi = S \quad (8)$$

şekindedir. Denklemden kullanılan φ akış fonksiyonu, S kaynak terimidir.

3.1. CEL Yönteminin Tank Üzerinde Uygulanması

Bu çalışmada akışkan-yapı etkileşim modeli, tankın Lagrangian ve akışkanın Eulerian yaklaşım ile modellendiği CEL (Coupled Eulerian Lagrange) yöntemiyle Abaqus sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak oluşturulmuştur. Elemanların malzeme ile birlikte deforme olduğu varsayımı ile düğümlerin malzemeye sabitlendiği Lagrangian aşamasının sonunda büyük oranda şekil değişikliği görünen bölgeler tespit edilir. Eulerian aşamasında ise, bu şekil değişikliğinin gözlemlendiği elemanlarda otomatik olarak mesh yapısı tekrar oluşturulur (Gücüyen ve Erdem 2019). CEL Yönteminin uygulandığı akışkan depolama tankı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Akışkan depolama tankı modeli ve ağ yapısı

Çelik gövde ve akışkan arasındaki etkileşimi (interaction) sağlamak için çelik gövde için

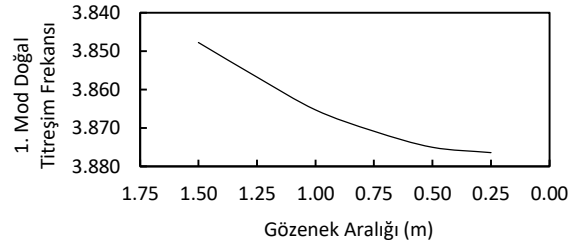
Lagrangian ağ yapısı, akışkanı modellemek için Eulerian body ağ yapısı tekniğinden yararlanılmıştır. Akışkan modelde kullanılan eleman geometrisi hexahedron (6 yüzlü) ve eleman tipi FC3D8'dür. FC3D8 ile kodlanan eleman tipinin açılımı; akışkan (F), sürekli (C, continuum) üç boyutlu (3D) ve 8 düğüm noktalı (8) şeklindedir. Temas problemleri için geliştirilmiştir. Sürtünme kuvvetinin aktarımı temas noktası özellikleri tanımlanırken teğetsel davranış için sürtünme katsayısı 0,2 kabul edilerek dikkate alınmıştır.

Depolama tankı modelinde kullanılan eleman geometrisi ise 4 düğümlü çift eğimli ince veya kalın kabuk (2 yüzlü) dür. Eleman tipi belirli bir et kalınlığına sahip boru kesitli katı cisim modellerinde de kullanılan SR4'dür. SR4 kodlamasının açılımı ise; kabuk (S), 4 düğüm noktalı (4) ve azaltılmış integrasyon (R) şeklindedir. Lagrangian tank için 44219 eleman, Eulerian akışkan için 136848 tanımlanmıştır. Ayrıca modelde 187786 bağlantı noktası (node) ve 694124 değişken kullanılmıştır.

Modellenen yapı ve akışkan için malzeme atamaları yapıldıktan sonra sınır şartları ve yükleme koşulları tanımlanmıştır. Akışkan depolama tankının zemine oturduğu kabul edilerek ankastre mesnet koşulları kullanılmıştır. Yapının ve yapının içerisindeki akışkanın hareketine sebep olan sismik kuvvet Düzce depremi veri kaydı kullanılarak etkilmiştir. Tüm modele ise $g=9.81 \text{ m/s}^2$ yer çekimi ataması yapılmıştır.

Bağlantı noktası ve eleman sayısının doğru tespit edilmesi, analiz sonuçlarının güvenilirliğini ve işlem süresini etkilediği için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle bağlantı noktası sayısının ve eleman sayısının farklı değerleri için ön analizler yapılarak karşılaştırılır. Değerlendirme kriteri olarak belirlenen değişken art arda yapılan hesaplamalarda değişmiyorsa ideal bağlantı noktası ve eleman sayısına ulaşılmış demektir. Yapılan bu ön hesaplamalara hassaslık analizi denilmektedir.

Çalışma kapsamında hassaslık analizleri için 1. Mod doğal titreşim frekansı, değerlendirme kriteri olarak seçilerek karşılaştırmalar yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Hassaslık analizi sonuçları

Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hesap yapan yazılım için temel bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$[K]\{x\} - \omega^2[m]\{x\} = 0 \quad (9)$$

Burada [K] rijitlik matrisini, [m] kütle matrisini, ω doğal titreşim frekansı, {x} ise tankın yer değiştirmesini temsil etmektedir.

Analizler sırasında, Eulerian ve Lagrangian yaklaşımı ile modellenen ve temas eden kısımlar birbiri içine geçmezler. Bir kontak bölgesinde uyumluluğun sağlanması için yazılım iki kontak yüzeyi arasında bir ilişki kurar. CEL yönteminde kontak yüzeyleri arasındaki etkileşim için Penalty tabanlı kontak formülünü kullanılmaktadır. Böylece akışkan-yapı etkileşim problemlerinde karşılaşılan temas yüzeyi atama ihtiyacı ortadan kalkar. En iyi sonuçları en kısa sürede elde edebilmek için CEL uygulaması, Abaqus/Explicit yazılımı ile çalıştırılmaktadır. Abaqus/Explicit çözücüsü ile uygulanan CEL yöntemi, açık bir zaman entegrasyon şeması kullanılmaktadır. Lineer olmayan diferansiyel denklem sistemleri için merkezi fark kuralı uygulanmaktadır. Hareket denklemleri aşağıdaki denklemlere göre entegre edilmektedir.

$$\dot{v}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N = \dot{v}_{\left(i-\frac{1}{2}\right)}^N + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{v}_{(i)}^N \quad (10)$$

$$v_{(i+1)}^N = v_{(i)}^N + \Delta t_{i-1} \dot{v}_{\left(i+\frac{1}{2}\right)}^N \quad (11)$$

$$\ddot{v}_{(i)}^N = \frac{1}{M_{NJ}} (P_i^J - F_i^J) \quad (12)$$

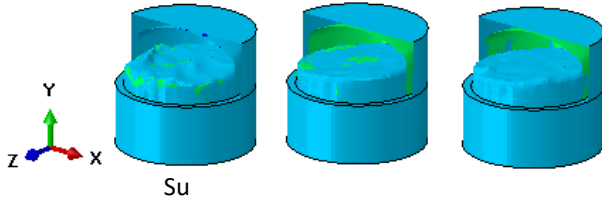
Denklemlerde kullanılan v , \dot{v} , \ddot{v} sırasıyla yer değiştirme, hız ve ivme terimlerini sembolize eder. Ayrıca M^{NJ} kütle matrisini, P_i^J akışkandan tanka aktarılan dış kuvvet vektörünü, F_i^J ise gerilme kaynaklı iç kuvvet vektörünü göstermektedir.

İterasyon yapmadan devam eden hesaplamalarda bir sonraki adım için bilinmeyen değerlerin belirlenmesi için önceki adımdaki bilinmeyenlerin çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Zaman artışı, birden fazla elemana akışın olmasını engelleyecek şekilde otomatik olarak ayarlanmaktadır. Çalışmada sonlu elemanlar analizleri depremin etki ettiği 8,50s için 0,01s zaman artış değeri ile gerçekleştirilmiştir. Eulerian yaklaşımın geçerli olduğu aşamada zaman artış deformasyonunun önüne geçebilmek için büyük deformasyona uğrayan elemanlar için ağ yapısı yenilenir ve malzeme akışı hesaplanır. Çözüm performansını arttırmak için Eulerian yaklaşım aşamasında elemanların deformasyonları pasifize edilir. Langrangian yaklaşımın geçerli olduğu aşama sonunda büyük deformasyon gözlenen elemanlar tespit edilir.

4. Bulgular

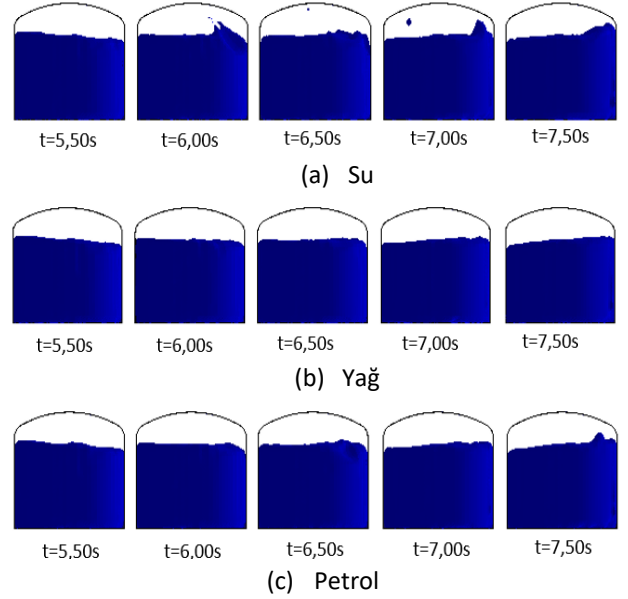
4.1. Akışkan Yüzü Profilleri

Tankın %70 oranında dolu olması nedeni ile deprem kuvveti, akışkanın çalkalanmasına yani yüzeyinde profil değişimine yol açar. Akışkan yüzü profilindeki bu değişim, tank üzerinde ilave dinamik etkilere sebep olmaktadır. Çalışmada ele alınan su, yağ ve petrol için akışkan yüzü profilleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Akışkan yüzü profilleri

Şekil 6'da görüldüğü gibi çalkantı nedeni ile petrol tank yüzeyindeki en belirgin dalgalanma dinamik viskozitesi en küçük olan suda görülmektedir. Serbest akışkan yüzeyinde oluşan bu çalkantı dalgaları, akışkan özelliklerine göre zamana bağlı değiştiğinden tank üzerindeki en büyük gerilme ve yer değiştirmenin meydana geleceği zaman aralığı da üç tank modeli için değişmektedir. t=5,50s ile t=7,50s aralındaki akışkan yüzeyi profilleri 0,50s zaman artışı ile Şekil 7'de ayrı ayrı sunulmuştur.



Şekil 7. Zamana bağlı serbest yüzey derinlik değişimleri

Çalkantı etkisine maruz kalan akışkanların serbest yüzey derinliklerinin zamana bağlı değişimleri incelendiğinde tankın serbest titreşim frekansına uygun hareket ettikleri görülmektedir. Yağda meydana gelen çalkantı dalgası yüksekliği daha düşüktür.

4.2. Yer Değiştirme Değerleri

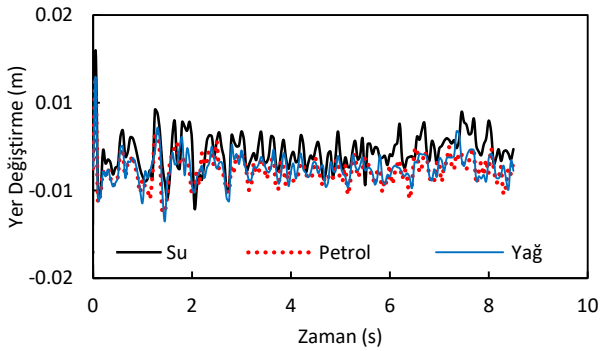
Çalkantı nedeni ile tankta meydana gelen yer değiştirme değerlerinin 2,45s, 4,10s, 6,20s ve 8,50s anında kaydedilen değişimleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Akışkan türüne bağlı yer değiştirmeler

Zaman	Depolanılan Akışkan		
	Su	Yağ	Petrol
2,45s			
4,10s			
6,20s			
8,50s			

Depolanan akışkanın su olması durumunda tankta meydana gelen en büyük yer değiştirme değeri 0,241m olmaktadır. Bu yer değiştirme $t=1,70s$ anında ortaya çıkmaktadır. Aynı zaman aralığında yağ için belirlenen değer 0.188m olmasına karşın en büyük değer $t=1,60s$ anında hesaplanmıştır. Yağ dolu tankta gözlenen en büyük yer değiştirme değeri 0.202m'dir. Petrol için ise $t=1,7s$ anında 0.204m yer değiştirme tespit edilmiştir. Ancak petrol ile kısmen dolu tankta ortaya çıkan en büyük yer değiştirme diğer akışkanları içeren yapılardan farklı olarak $t=4.10s$ anında 0.282 m olarak belirlenmiştir.

Çalkantı dalgalarının oluşumunda akışkanın yoğunluğu ve viskozitesinin etkili olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. Çalkantı dalgalarının oluşturduğu hidrodinamik kuvvetlerin tank duvarlarında yol açtığı ilave basınç yüklerinin etkisi, akışkanın mekanik özelliklerine bağlı olarak farklı zamanlarda en büyük değerlere ulaşmaktadır. Tankın tabanı ile depolama hacminin (silindirik gövdenin) en üst noktasında oluşan en büyük yer değiştirme değerlerinin farkları Şekil 8 ile verilmiştir.



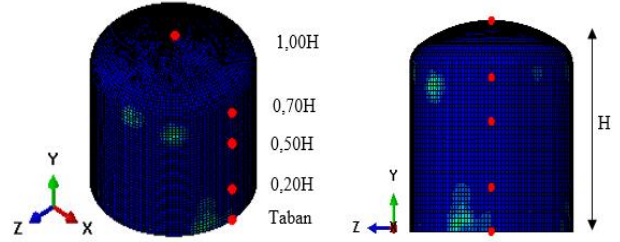
Şekil 8. Yer değiştirme farklarının zamana bağlı değişimi

Şekil 8'de görüldüğü gibi deprem kuvvetinin etkili olduğu 8,50s içinde tankın tabanında ve gövdenin üst noktasında yer değiştirme açısından en büyük fark, akışkanın su olması koşulu altında ortaya çıkmaktadır.

Çalkantı dalgasının en belirgin olduğu yani serbest akışkan yüzeyinde en büyük derinlik değişiminin gözlemlendiği durum için elde edilen bu sonuçlar birbirleri ile tutarlıdır.

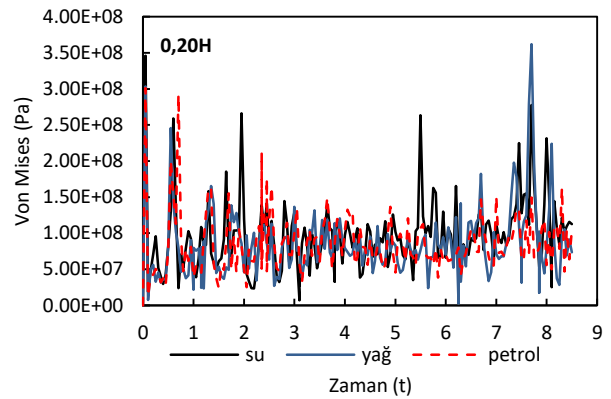
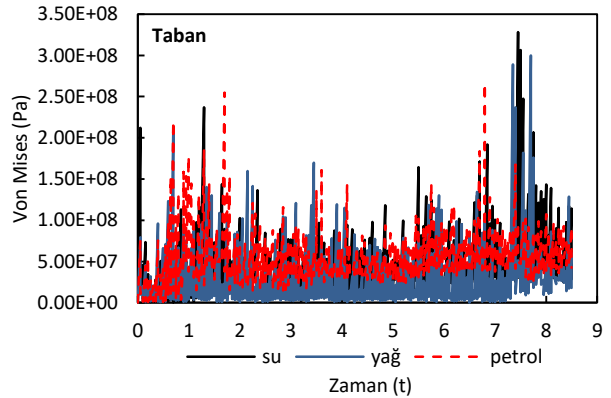
4.3. Von Mises Gerilme Değerleri

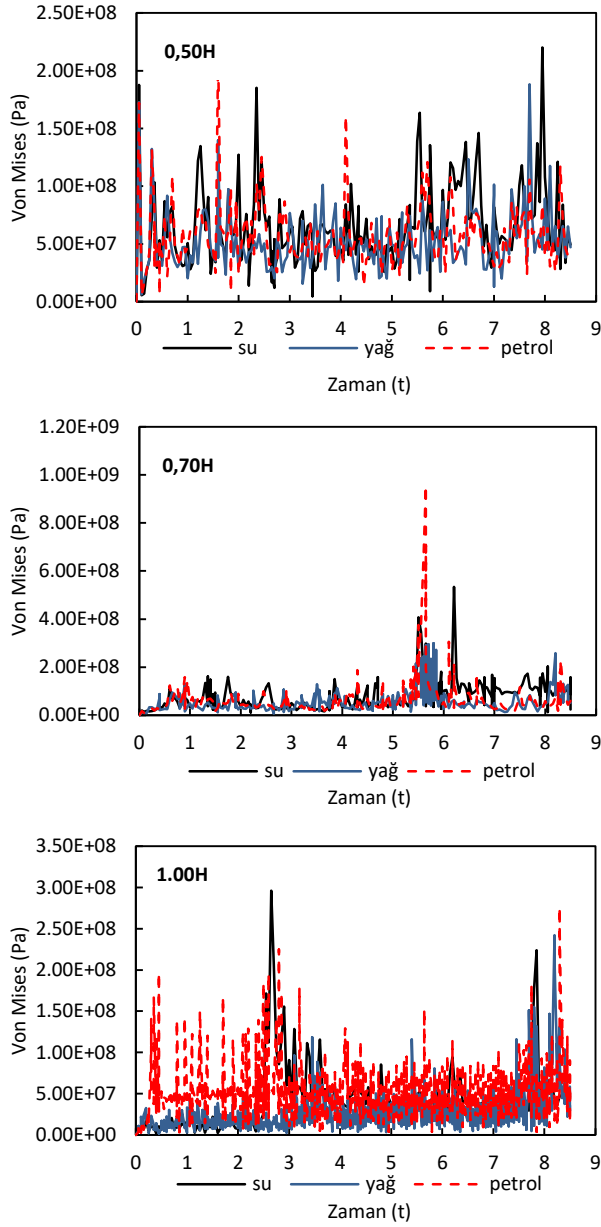
Akışkan türüne bağlı çalkantı etkisi ile oluşan Von Mises gerilme değerlerinin değişimini daha iyi inceleyebilmek amacı ile H tank yüksekliği olmak üzere taban, 0,20H, 0,50H, 0,70H ve H mesafelerinde elde edilen değerler grafikler halinde sunulmuştur. Şekil 9'da dikkate alınan ve zamana bağlı değişimi grafik haline getirilen referans noktaları tank üzerinde işaretlenmiştir.



Şekil 9. Referans noktaları

Seçilen referans noktalarında hesaplanan gerilmelerin 8,50s boyunca değişimi üç akışkan açısından karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir.





Şekil 10. Zamana bağlı Von Mises gerilme dağılımı

Akışkanların mekanik özelliklerine göre değişen hareketleri çalkantı dinamiğini etkilemektedir. Çalkantı dalgasının hız profili akışkan derinliği ile ters orantılıdır. Yani derinlik arttıkça akışkan hızı düşer. Akışkan viskozitesinden kaynaklanan, tank çeperi ve akışkan arasındaki etkileşimin gerçekleştiği bölge sınır tabakası olarak adlandırılır. Tabanda oluşan gerilme değerleri, her üç akışkan açısından da incelendiğinde yağın sınır tabakadan daha çok etkilendiği görülür. 0,2H, 0,5H, 0,7H yükseklikleri çalkantı dalgası nedeni ile akışkan hızı değişimlerinin, yer değiştirmelerin ve gerilmelerin düzensiz olduğu seviyelerdir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, akışkan depolamak amacı ile kullanılan silindirik çelik tanklarda çalkantı nedeni ile oluşan dinamik etkilerin analizi yapılmıştır. Akışkan çalkantısının tankın yapısal davranışa üzerindeki tesiri gözlenmiştir. Tankın %70 oranında su, yağ ve petrol ile dolu olması koşulları altında gerçekleştirilen çalışmada yerel zemin hareketleri Düzce depremine ait kayıtlar kullanılarak modellenmiştir. Tankın hareketi, akışkan hareketine neden olan enerjiyi sağlamakta bu da serbest akışkan yüzeyinde çalkantıyı meydana getirmektedir. Analizlerde akış ortam için Eulerian, tank için ise Lagrangian yaklaşım kullanılmıştır. Akışkan ve tank arasındaki etkileşim CEL yöntemi sağlanmıştır. İlk olarak farklı akışkanları depolayan tanklara ait doğal titreşim frekansı değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ilk iki mod için $\omega_{\text{petrol}} > \omega_{\text{yağ}} > \omega_{\text{su}}$ şeklindedir. Yağ ve petrol depolayan tanklar için doğal titreşim frekansı değerleri birbirine yakındır. Bu sonuçlar akışkan tankında depolanan akışkanın, dinamik etki altındaki davranışına bağlı olarak yapı periyodunu etkilediğini göstermektedir.

İkinci aşamada akışkan yüzey profilleri $t=5,50s$ ile $t=7,50s$ arasında incelenmiştir. Suda oluşan derinlik değişimlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Viskozitesi daha düşük olduğu için akışkan hızının derinlik ile değişimi daha büyüktür. Aynı yaklaşımla yağın viskozitesi fazla olduğu için yüzeydeki derinlik değişimleri diğer iki akışkanla karşılaştırıldığında daha azdır. Tankın hareketinin frekansı akışkanın doğal frekanslarından birine yaklaştığında büyük genlik sahip çalkantılar oluşmaktadır. Çalkantı dalgaları, akışkan türüne göre farklı zamanlarda en büyük dalga yüksekliğine ulaştığı için tank duvarlarındaki en büyük ilave basınç değerinin etkili olduğu zamanlar da değişiklik göstermektedir.

Son aşamada ise yer değiştirme ve gerilme değerlerine bağlı sonuçlar elde edilmiştir. Başlangıçta akış +x yönüne doğru uyarıldığı için akışkan o yöne hareket etmeye başlar, sağ duvara çarpar ve ardından yükselir. Bu saniyeden sonra uyarımın yönü değişir ve kazanılan enerji ile yön değiştirerek tankın sol duvarına çarpar, ardından tekrardan uyarımın yönü değişir. Kazandığı

enerjiden hem de uyarımdan kaynaklanan eylemsizlikten dolayı devrilip ters dalgalar oluşur. Bu harekete bağlı olarak yapılan karşılaştırma sonuçlarında yağ dolu tankın tabanında ve depolama hacminin en üst noktasındaki en büyük Von Mises gerilmelerinin gözleendiği zaman aralıklarının birbirine en yakın olan değerleri içerdiği gözlenmiştir. Depolama hacminin en üst noktası referans kabul edildiğinde en büyük Von Mises gerilmesi depolanan akışkanın su olması durumunda $t=5,60s$ anında, akışkanın yağ olması durumunda $t=8,20s$ anında ve petrol olması durumunda ise $t=4,20s$ anında ortaya çıkmaktadır.

Her üç akışkan için de 0,7H yüksekliğinde yapılan incelemeler sonucunda 5,5s-6,0s arasında yer değiştirme ve Von Mises gerilme değerlerinde düzensizlikler tespit edilmiştir. Bu düzensizliklerinin sebebi sismik yer hareketi ile tank içerisindeki akışkanın serbest yüzeyinde meydana gelen ters dalgalar. Bu zaman aralığında gözlenen ani farklar giden ve dönen çalkantı dalgasının karşılaşması ile ortaya çıkan ilave basınçtan kaynaklanmaktadır. Tankın doğal titreşim frekansı değerine göre düzensizliğin yaşandığı zaman aralığı değişmektedir. Bu düzensizlik tank stabilitesini büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışma depolama yapılarının deprem etkisi altında taşıdıkları akışkana bağlı olarak gösterdikleri tepkilerin de farklı olacağı sonucunu ortaya koymaktadır. Depolama tankında gözlenen doğal titreşim frekansının yanı sıra hem yer değiştirme hem de gerilme değerleri akışkan türüne bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca akışkan türü yapıda meydana gelebilecek en büyük yer değiştirme ve gerilme değerlerinin ortaya çıkacağı zaman aralığının da değişmesine sebep olmaktadır. Yani akışkan türüne bağlı çalkantı dinamiğinin Eulerian–Lagrangian yaklaşım gibi bir analiz ile araştırılması, tasarım kriterlerinin simülasyon yapıldıktan sonra belirlenmesi büyük hasar ve yıkımların önüne geçilebilmesine imkan sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu projeyi “2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı” 2022/1 dönemi kapsamında değerlendirerek maddi destek sağlayan

TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı’na teşekkürlerimizi sunarız.

6. Kaynaklar

Bayer, A.M., 2007. Silindirik Depolama Tanklarında Çalkantı Nedeniyle Oluşan İç Basınçların Azaltılmasına Yönelik Gövde Perdelerinin Tasarımı. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 220.

Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., ve Türker, T., 2010. Effect of the model updating on the earthquake behavior of steel storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, **66**, 462-469.

Chaduvula, U., Patel, D. ve Gopalakrishnan, N., 2013. Fluid-structure-soil interaction effects on seismic behaviour of elevated water tanks. *Procedia Engineering*, **51**, 84-91.

Cho. K. and Cho. S., 2007. Seismic response of cylindrical steel tanks considering fluid-structure interaction. *Steel Structures*, **7**, 147–152.

Code, P., 2005. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization.

Council, B.S.S., 2003. National Earthquake Hazard Reduction Program recommended provisions for seismic regulations for 348 new buildings and other structures—part 2: commentary (FEMA 450-2). Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Çelik, A.İ., 2018. Silindirik Çelik Su Tanklarının Sismik Analizinin Fem ile Gerçekleştirilmesi. In 2nd International Symposium on Natural Hazards and Disaster Management, Sakarya University Culture and Congress Center, Sakarya-Turkey.

Çelik, A.İ., Köse, M.M., Akgül, T., & Apay, A.C., 2020. Yıkıcı sismik yükler altında silindirik çelik su tanklarının doğrusal olmayan analizi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, **8(2)**, 154-170.

Djermane, M., Zaoui, D., Labbaci, B., Hammadi, F., 2014. Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: numerical evaluation of code provisions. *Eng. Struct.*, **70** 181–196.

- Dooms, D., Degrande. G., De Roeck, G. ve Reynders, E., 2006. Finite element modelling of a silo based on experimental modal analysis. *Engineering Structures*, **28**, 532-542.
- Graham, E.W. and Rodriguez, A.M., 1952. The characteristics of fuel motion which affect airplane Dynamics. *Journal of Applied Mechanics*, **19**, 381-388.
- Gücüyen, E. & Erdem, R.T., 2019. Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **10(3)**, 1125-1136.
- Housner, G., 1957. Dynamic pressure on accelerated fluid containers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **47**, 15-35. 103.
- Housner, G.W., 1963. The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the seismological society of America*, **53(2)**, 381-387.
- Jacobsen, L.S., 1949. Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of a fluid surrounding a cylindrical pier. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **39**, 189- 204.
- Jianbao, F., Maotian, L., Qing, Y. ve Tingkai, N., 2010. Three-dimensional finite element analysis of wall pressure on large diameter silos. *Journal of Convergence Information Technology*, **5(7)**, 120-128.
- Kamila, K., Ivan. G., Eva. K., 2014. Dynamic time-history response of cylindrical tank considering fluid-structure interaction due to earthquake. *Applied Mechanics & Materials*, 617.
- Kang, T.W., Yang, H.I. & Jeon, J.S., 2019. Earthquake-induced sloshing effects on the hydrodynamic pressure response of rigid cylindrical liquid storage tanks using CFD simulation. *Engineering Structures*, **197**, 109376.
- Liu, H., Xu, K., Zhao, Y., 2016. Numerical investigation on the penetration of gravity installed anchors by a coupled Eulerian– Lagrangian approach. *Applied Ocean Research*, **60**, 94–108.
- Liu, Z., Yuan, K., Liu, Y., Andersson, M., & Li, Y., 2022. Fluid sloshing hydrodynamics in a cryogenic fuel storage tank under different order natural frequencies. *Journal of Energy Storage*, **52**, 104830.
- Malhotra, P.K. & Veletsos, A.S., 1994. Uplifting response of unanchored liquid-storage tanks. *Journal of Structural Engineering*, **120(12)**, 3525-3547.
- Park. J.H., Bae. D. & Oh. C.K., 2016. Experimental study on the dynamic behavior of a cylindrical liquid storage tank subjected to seismic excitation. *International Journal of Steel Structures*, **16(3)**, 935-945.
- Sharma. V., Arun. C.O. & Krishna. I.P., 2019. Development and validation of a simple two degree of freedom model for predicting maximum fundamental sloshing mode wave height in a cylindrical tank. *Journal of Sound and Vibration*, **461**, 114906.
- Shrimali, M.K. ve Jangid, R.S., 2003. Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, **59**, 1267-1288.
- Virella, J.C., Godoy, L.A. ve Suarez, L.E., 2003. Influence of the roof on the natural periods of empty steel tanks. *Engineering Structures*, **25**, 877-887.
- Virella, J.C., Suarez, L.E. ve Godoy, L.A., 2005. Effect of pre-stress states on the impulsive modes of vibration of cylindrical tank-liquid systems under horizontal motions. *Journal of Vibration and Control*, **11(9)**, 1195-1220.
- Wei, G. & Zhang, J., 2020. Numerical study of the filling process of a liquid hydrogen storage tank under different sloshing conditions. *Processes*, **8(9)**, 1020.