



T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK SIVI DEPOLAMA TANKLARININ
YAPISAL DAVRANIŞI**

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Cenk SAKA

**Danışman
Prof. Dr. Muhittin Eren UÇKAN**

ALANYA

2024

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK SIVI DEPOLAMA TANKLARININ
YAPISAL DAVRANIŞI

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Cenk SAKA
Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Program Adı: İnşaat Mühendisliği (YL) (Tezli)

Danışman
Prof. Dr. Muhittin Eren UÇKAN

ALANYA
(2024)

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ahmet Cenk SAKA' nın "Deprem Etkisi Altındaki Çelik Sıvı Depolama Tanklarının Yapısal Davranışı" başlıklı yüksek lisans tezi 15/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisan tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir.

Unvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Muhittin Eren UÇKAN
Üye : Prof. Dr. Bülent AKBAŞ
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ercan Şerif KAYA

Prof. Dr. Kemal VATANSEVER

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Ahmet Cenk SAKA

TEŞEKKÜR SAYFASI

Bu tez çalışmamın hazırlanması sürecinde bana destek olan herkese teőekkürü bir borç bilirim. Öncelikle; bilgisini ve desteğini hiç eksik etmeyen, zaman gözetmeksizin beni dinleyen, bana yol gösteren değerli hocam Sayın **Dr. Öğr. Ercan Şerif KAYA** ve değerli bilgilerini üzerimden hiç eksik etmeyen, bir fener misali yol gösteren, kontrolleri teyit eden değerli danışman hocam Sayın **Prof. Dr. Muhittin Eren UÇKAN** hocama sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte manevi desteklerini hiç esirgemeyen **Kıymetli Aileme** ve özellikle sabırla beni sürekli teővik eden, bana g veren **Sevgili Eőim ve çocuklarıma** teşekkür ederim.

Son olarak; bu süreçte bana destek veren, beni teővik eden arkadaőlarıma, dostlarıma ve herkese teşekkür ederim.

ÖZET

DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ ÇELİK SIVI DEPOLAMA TANKLARININ YAPISAL DAVRANIŞI

Ahmet Cenk SAKA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Aralık, 2024 (44 Sayfa)

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye’de gerçekleşmiş ve on bir ili etkileyen, merkez üssü Kahramanmaraş olan, $M_w=7.8$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki depremlerde yaşam alanlarının yanı sıra boru hatları, depolama tankları, tüneller, deniz yapıları ve endüstriyel yapılar gibi yaşam hatlarında da hasarlar meydana gelmiştir. Endüstriyel tanklarda; genellikle çalkalanma sebebiyle tank duvarlarındaki hasarlarla birlikte, kayma ve yükselme sebebiyle tank bağlantı elemanlarının kopması gibi hasarlar sıklıkla görülmüştür. Depremin şiddeti göz önüne alındığında kritik hasarlardan ziyade depolama tanklarının performansları yeterli seviyede olmuştur. Buna sebep olarak kayma hareketi yapan tanklarda çalkalanma seviyelerinin ve tank duvarlarındaki gerilmelerin azalacağı düşünülmektedir. Bu tezde söz konusu etkilerin araştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda Nurdağı/Gaziantep’te bulunan bir tank çiftliğinde kendinden destekli bir yağ tankı ele alınmıştır. Bu kapsamda 3 boyutlu doğrusal olmayan sıvı-yapı etkileşimi sayısal modeli geliştirilmiş olup; tank duvarında oluşacak gerilme ve deformasyonlar farklı sürtünme katsayıları altında tank duvarında oluşacak gerilme ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Sonuçlar, tank tabanındaki kaymanın artmasıyla tank tabanındaki yükselmenin ve tank duvarındaki deformasyonların azaldığını göstermiştir. Ayrıca tank çalışmalarındaki modellenmenin doğru olabilmesi için düşey yöndeki deprem hareketinin de sistemde ele alınması gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Sıvı Depolama Tankları 1, Abaqus 2, Yükselme 3, Kayma 4, Deprem 5.

ABSTRACT

STRUCTURAL BEHAVIOR OF STEEL LIQUID STORAGE TANKS UNDER THE EFFECT OF EARTHQUAKE

Ahmet Cenk SAKA

Department of Civil Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

December, 2024

On February 6, 2023, the earthquakes with a magnitude of $M_w=7.8$ and $M_w=7.6$, which occurred in Turkey and affected eleven provinces, with the epicenter in Kahramanmaraş, caused damage to lifelines such as pipelines, storage tanks, tunnels, marine structures and industrial structures, as well as living spaces. In industrial tanks; damages such as damage to tank walls due to shaking, and rupture of tank connection elements due to sliding and rising were frequently observed. Considering the magnitude of the earthquake, the performance of storage tanks was at a sufficient level rather than critical damages. It is thought that this will cause the shaking levels and stresses on tank walls to decrease in tanks with sliding movements. This thesis aims to investigate these effects. In this context, a self-supporting oil tank was considered in a tank farm located in Nurdağı/Gaziantep. In this context, a 3D nonlinear fluid-structure interaction numerical model was developed; the stresses and deformations that will occur on the tank wall under different friction coefficients were calculated. The results showed that the rise of the tank bottom and the deformations of the tank wall decreased with the increase in the sliding of the tank bottom. It also showed that the vertical earthquake motion should be considered in the system in order to ensure the accuracy of the modeling in tank studies.

Keywords: Liquefied Storage Tanks 1, Abaqus 2, Base Uplift 3, Sliding of Storage tanks 4, Earthquake 5.

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	ii
TEŞEKKÜR SAYFASI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
2. LİTERATÜR	4
2.1. Geçmişten Günümüze Çalışma Taramaları	4
2.2. Hasar Tipleri	8
2.2.1. Fil ayağı burkulması (Elephant foot buckling).....	8
2.2.2. Çatı ve kabuk hasarları	9
2.2.3. Taban bağlantısı ve kesme hasarları	11
2.2.4. Devrilme (Overturning).....	11
2.2.5. Sıvı basıncı ve çatlak oluşumu	13
2.2.6. Bağlantı hasarları	13
2.2.7. Yükselme (Uplift).....	14
2.3. Yönetmelikler	14
2.4. Tank Geometrisinin Genel Davranış Üzerindeki Etkileri	16
2.5. Kahramanmaraş depremlerinde gözlenen hasarlar	18
3. YÖNTEM.....	22
3.1. Sonlu Elemanlar Analiz Programları.....	22
3.2. Sonlu Elemanlar Metodu ve Çözüm Yöntemleri	22
3.3. Konum ve Deprem Bilgileri	27
3.4. Vaka Çalışmasının Abaqus'te Modellenmesi.....	29
3.5. Nurdağı'nda ki Tankın Yönetmelik Hesapları	30
4. BULGULAR	35

4.1. Analiz Sonuçları	35
4.2. Tankın kayma tepkisi.....	36
4.3. Tankın Yükselmesi (Uplift).....	38
5. TARTIŞMA	39
6. KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	45



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Nurdağı'ndaki yağ tankının gerekli değerleri	31
Tablo 3.2 Tank tasarım sınıfları	33



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Tüpraş Rafinerisi (1999 – Gölçük Depremi).....	2
Şekil 2.1 Housner modeli (1957).....	6
Şekil 2.2 Housner Hidrodinamik Modeli a) Darbesel basınç b) Devrimsel basınç.....	7
Şekil 2.3 Fil ayağı burkulması (NISEE e-Library).....	9
Şekil 2.4 Çalkalanma hasarları (Kocaeli-1999).....	10
Şekil 2.5 Çalkalanma hasarları (Kahramanmaraş-2023).....	10
Şekil 2.6 Elmas şekilli burkulma hasarı (NISEE e-Library)	11
Şekil 2.7 Tank devrilme hasarları (Marlborough-2017).....	12
Şekil 2.8 Bağlantı elemanlarının hasarı (Kocaeli-1999)	13
Şekil 2.9 Tank çifliğinin ortasından geçen (a) fay kırığı, (b) temelin yerinden oynaması, (c) beton çatlama hasarları.....	19
Şekil 2.10 (a) Yükselme deformasyonları (b) Tank tabanının kayması.....	19
Şekil 2.11 Temelde kayma	19
Şekil 2.12 Boru ve bağlantı elemanlarındaki hasarlar	20
Şekil 2.13 Sıvının çalkalanması sonucu tank duvarındaki hasarlar.....	20
Şekil 3.1 Abaqus işlem adımları.....	23
Şekil 3.2 a) ALE ile çözülmüş model, b) CEL yöntemi ile çözülmüş model. ale ve cel ile gerilme dağılımları.....	26
Şekil 3.3 Tank duvarı ve tabanındaki basınç ve çekme deformasyonları	26
Şekil 3.4 Yapılan çalışmalarda gerçekleşen hasar	27
Şekil 3.5 Pazarcık/Kahramanmaraş Mw 7.7 depreminin ivme-zaman geçmişleri.....	28
Şekil 3.6 Fabrikanın; fay hattı ve istasyon konum ilişkileri	28
Şekil 3.7 (a) Nurdağın'daki Tank, (b) Sonlu Elemanlar Modeli.....	29
Şekil 3.8 Housner'ın Basitleştirilmiş Yay Modeli.....	30
Şekil 3.9 Ci Katsayısı grafiği (API650)	31
Şekil 3.10 Mw 7.7 Pazarcık Depreminin yatay spektrum tepkisi	34
Şekil 3.11 Mw 7.7 Pazarcık Depreminin düşey spektrum tepkisi.....	34
Şekil 4.1 Nurdağın'daki yağ tankı hasarı ve modeldeki hasar	35
Şekil 4.2 Tankın yükselmesi sonucu taban plakasında deformasyonlar ve betonun dökülmesi.....	35

Şekil 4.3 Sürtünme katsayısının azalmasına bağlı olarak tank duvar gerilimlerinin azaltılması a) kendinden destekli ve ankrajsız tanklar; Sürtünme katsayısı; b) 0.6, c) 0.3 ve d) 0.15	36
Şekil 4.4 Farklı sürtünme katsayıları μ için, demirlenmemiş tankın NS ve EW yönlerindeki parçacık yörüngeleri.	37
Şekil 4.5 Tankın yükselmesi.....	37
Şekil 4.6 Tankın farklı sürtünme katsayılarına göre tank yükselmeleri	38



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D	Tank Çapı (m)
R	Tank Yarıçapı (m)
E	Tank Duvar Malzemesi Elastik Modülü (N/m^2)
ρ	Sıvı Yoğunluğu (kg/m^3)
H	Sıvı Yüksekliği (m)
C_i	Darbesel Periyodu Hesaplama Katsayısı (Yönetmelik Ci Tablosu)
t_w	Tank Cidar Kalınlığı (m)
K_s	Çalkalanma Periyodu Hesaplama Katsayısı
C_c	Devrimsel Periyodu Hesaplama Katsayısı
T_i	Darbesel Periyot
T_c	Devrimsel Periyot

Kısaltmalar

ALKÜ	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi
MTA	Maden Tetkik Arama
DSİ	Devlet Su İşleri
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
CEL	Coupled Eulerian Lagrangian
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
DD1	Deprem Yer Hareketi Düzeyi- 1
DD2	Deprem Yer Hareketi Düzeyi- 2
PGA	En büyük yer ivmesi (g)
PGV	En büyük yer hızı (cm/sn)
EW	Doğu- Batı
NS	Kuzey- Güney
UP	Düşey

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Endüstriyel sanayi alanında hammaddelerin depolanması için tanklar çok büyük bir rol almaktadır. İklim değişikliği sebebi ile gelecekte oluşabilecek gıda kıtlığı, su kıtlığı, petrol kıtlığı, enerji kıtlığı v. b. sebeplerden ötürü büyük depolama tanklarına duyulan ihtiyaç gün geçtikçe daha da artmaktadır. Bu noktada; bu şekilde depolama yapılacak tankların güvenliği, dayanıklılığı ve hizmet ömrü büyük önem taşımaktadır. Tankların dayanıklılığı ve hizmet ömrünü etkileyebilecek en önemli dış etkenlerin başında deprem gelmektedir.

Depremler, tüm dünyada büyük can ve mal kayıplarına yol açabilen, tarihteki en yıkıcı doğal afetlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu tür felaketlerin ekonomik ve çevresel etkileri, toplumsal yapıları derinden sarsarak afet sonrası iyileşme süreçlerini zorlaştırmakta ve büyük sosyal travmalara neden olmaktadır. Özellikle stratejik altyapı sistemlerinin deprem güvenliği, bu sistemlerin sürekliliğini sağlamak adına hayati bir rol oynamaktadır. Bu altyapılar arasında yer alan çelik sıvı depolama tankları, enerji, su, kimyasal maddeler ve diğer sıvıların depolanması ve taşınmasında kritik bir işlev üstlenmektedir. Sanayi tesislerinin operasyonel sürekliliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda çevresel ve toplumsal risklerin azaltılmasında da önemli bir rol oynamaktadır.

Çelik sıvı depolama tankları, dayanıklılık ve maliyet etkinliği açısından sıklıkla tercih edilmekte; ancak deprem gibi dinamik yükler altında, karmaşık yapısal davranışlar sergileyebilmektedir. Tankların içinde bulunan sıvının dinamik hareketi, özellikle depremler sırasında ortaya çıkan hidrodinamik basınçlar ve sıvının salınım hareketi, tankın stabilitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Deprem sırasında sıvının hareketi, tankın yapısal elemanlarına ek yükler bindirerek, duvarlarda ve tabanda deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu durum, sıvı depolama tanklarının bulunduğu sanayi tesislerinde büyük ekonomik kayıplara ve çevresel felaketlere yol açabilecek potansiyele sahiptir. 1999 Kocaeli Depremi ve 2011 Tohoku Depremi gibi örnekler, sıvı depolama tanklarında meydana gelen yapısal hasarlarla birlikte, bu yapıların deprem dayanımının artırılması gerektiğini bir kez daha gözler önüne sermiştir. 1999 Kocaeli depremi, sıvı oksijen ve nitrojen gazları içeren silindirik tanklarda ciddi hasarların yaşandığı en ciddi olaylardan biriydi [1]. 1999 Kocaeli depreminde, fay hattına 5 km mesafede bulunan Tüpraş tesisinde ağır hasar meydana geldi. Deprem, rafinerinin kendisine ve ham petrolle ilişkili tank çiftliğine önemli yapısal hasarlar verdi.

Rafineride ve tank çiftliğinde çıkan yangın, kapsamlı ek hasara neden oldu. Nafta tanklarından birinde başlayan yangın üç gün devam etti ve tüm bölgenin güvenliğini tehlikeye attı (Şekil 1.1). Tank çiftliğindeki farklı boyutlardaki altı tank, yer sarsıntısı ve yangın nedeniyle hasar gördü. Toplam hasarın yaklaşık 350 milyon ABD doları olduğu tahmin ediliyor [2].



Şekil 1.1 Tüpraş Rafinerisi (1999 – Gölçük Depremi)

Sıvı depolama tanklarının deprem altındaki davranışlarını doğru bir şekilde anlamak ve modellemek, karmaşık birçok faktörün dikkate alınmasını gerektirir. Tankın geometrisi, malzeme özellikleri, sıvı seviyesi, tankın oturduğu zemin koşulları ve sıvı-tank-zemin etkileşimleri bu faktörlerden sadece birkaçıdır. Özellikle sıvı-tank etkileşimleri, yapının dinamik analizinde kritik bir öneme sahiptir. Deprem sırasında sıvının hareketi, tankın rezonans frekansını etkileyerek yapıyı daha yüksek yüklerle karşı karşıya bırakabilmektedir. Bu tür dinamik etkilerin anlaşılması, mühendislik tasarım süreçlerinin iyileştirilmesine olanak tanıyacak ve tankların deprem dayanıklılığını artırmak için yeni tasarım kriterlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Çelik sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altındaki yapısal davranışlarını incelemek ve optimize etmek hem akademik hem de endüstriyel açıdan önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Literatürde çelik sıvı depolama tanklarının deprem altındaki davranışlarına dair birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, tankların deprem anındaki yapısal hasar davranışlarını, sıvı-tank etkileşimlerini ve zemin-yapı etkileşimlerini incelemektedir. Öne çıkan yönetmelikler ve standartlar, deprem güvenliği için belirlenen tasarım kriterleri ve uygulamalı mühendislik çözümleri bu literatürde yer almaktadır. Her bir çalışma yeni amaçlara birer ışık tutmuştur. Fakat

günümüzde hala sürdürülebilir ve optimum mühendislik çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez, bu boşlukları doldurmayı hedefleyerek, çelik sıvı depolama tanklarının daha güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanabilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, çelik sıvı depolama tanklarının deprem etkisi altındaki yapısal davranışlarını derinlemesine incelemek ve bu yapılara yönelik tasarım ve analiz süreçlerini geliştirmektir. Çalışma, deprem sırasında sıvı-tank dinamiğiyle ilgili vaka çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçların yalnızca akademik literatüre katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda gerçek mühendislik uygulamaları için değerli bir yol haritası oluşturması beklenmektedir. Çalışma, özellikle Türkiye gibi deprem riski yüksek bölgelerdeki mevcut sanayi tesisleri ve altyapı projelerinde kullanılarak, çevresel ve ekonomik risklerin minimize edilmesine katkı sağlaması beklenmektedir.

2. LİTERATÜR

Geçmişten günümüze literatürde birçok araştırma bulunmaktadır. Çelik zemin üzerinde inşa edilen sıvı depolama tankları, sıvı basıncına karşı direnç sağlayan çelik bir duvar, sızdırmazlık için ince bir taban plakası ve içerikleri atmosferden koruyan ince bir çatı plakasından oluşur. Deprem sırasında bu tankların davranışı, tank, zemin ve sıvı olmak üzere üç temel sistemin yanı sıra, bu sistemler arasındaki sınır etkileşimlerinin analizini gerektirir. Bu konu, yıllar içinde önemli bilimsel araştırmalara konu olmuştur ve tasarım standartları üzerinde sürekli olarak yeniden değerlendirmeler yapılmasını sağlamıştır.

2.1. Geçmişten Günümüze Çalışma Taramaları

Sıvı depolama tanklarının sismik davranışına ilişkin ilk çalışmalar, tankın rijit bir yapı olduğu varsayımıyla sıvı içinde oluşan hidrodinamik basınçların analizine odaklanmıştır. 1949 yılında Jacobsen, silindirik tanklarda meydana gelen hidrodinamik basınçları tanımlayarak bu alandaki ilk çalışmaları başlatmıştır. Daha sonra, 1952'de Graham ve Rodriguez, dikdörtgen kaplardaki impulsif ve konvektif basınçları kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Bu çalışmalar, tank içindeki serbest yüzey hareketlerini ve deprem sırasında tank duvarlarına uygulanan etkileri açıklamada önemli katkılar sağlamıştır [3], [4].

1957 yılında Housner, deprem sırasında sıvının dinamik tepkisini anlamak için hidrodinamik basınçları iki ana bileşene ayırmıştır: tankla birlikte hızlanan sıvının neden olduğu impulsif basınç ve sıvının kendi hareketiyle oluşan konvektif basınç. Bu model, tank davranışını anlamak için temel bir çerçeve sunmuş ve sonraki çalışmalar için bir rehber olmuştur [5], [6].

1964 Alaska Depremi sırasında yaşanan tank hasarları, tank duvarlarının esnekliğinin dinamik yükler üzerindeki etkisini göstermiştir. Veletsos (1974), esnek bir tank duvarı varsayımına dayanan bir analitik yaklaşım geliştirmiş ve esnek sıvı dolu tanklarda meydana gelen hidrodinamik kuvvetlerin değerlendirilmesi için basit bir prosedür sunmuştur. Daha sonra Veletsos ve Yang (1976), Housner'in modelini, tankın ilk konsol modunu dikkate alacak şekilde değiştirerek, yatay bir deprem hareketiyle oluşturulan maksimum taban devrilme momentini tahmin etmişlerdir. Bu çalışmada, Rayleigh-Ritz enerji yöntemiyle sıvı dolu tankların temel doğal frekanslarını elde etmek için basitleştirilmiş formüller sunulmuştur. 1980'lerde Haroun, sınır elemanları teorisini

kullanarak tankların dinamik davranışlarını analiz etmiş ve bilinmeyen parametrelerin sayısını önemli ölçüde azaltarak problem çözümünü kolaylaştırmıştır. Haroun ayrıca analizlerinde, tankın yuvarlaklık bozukluğunun dinamik tepki üzerindeki etkisi, başlangıç çevre gerilmesinin $\cos n\theta$ tipindeki modlar üzerindeki etkisi ve zemin-yapı-sıvı etkileşimi gibi daha karmaşık etkileri araştırmıştır [7-16].

1985 yılında Haroun ve Tayel, dikey ve yatay sarsıntıların birleşik etkilerini inceleyerek dikey bileşenin önemine dikkat çekmiştir. 1992'de Zhou ve arkadaşları, geniş silindirik tankların taban bölgelerinde meydana gelen "fil ayağı" burkulma hasarlarını analiz etmiş ve tank taban tasarımındaki kritik detayları vurgulamıştır. Bu dönemde yapılan çalışmalar, esnek tankların rijit tanklara kıyasla daha büyük dinamik yükler yaşadığını göstermiştir [17], [18].

1993 yılında Veletsos, farklı yoğunluk ve kalınlıklara sahip sıvıların rijit tanklardaki sıçrama etkisini inceleyerek karmaşık sıvı-tank etkileşimlerini daha iyi anlamıştır. 2001'de Cho ve arkadaşları, deprem etkilerini ve sıvı-tank etkileşimlerini dikkate alan rafine sayısal teknikler geliştirmiştir. Bu çalışmalar, tank tasarımında kullanılan mevcut yöntemlerin bazı varsayımlarının güncelliğini yitirdiğini ortaya koymuştur. 2003'te Nachtigal ve ekibi, tank-sıvı sistemlerinin temel frekanslarını analiz ederek tasarım standartlarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini önermiştir [19-21].

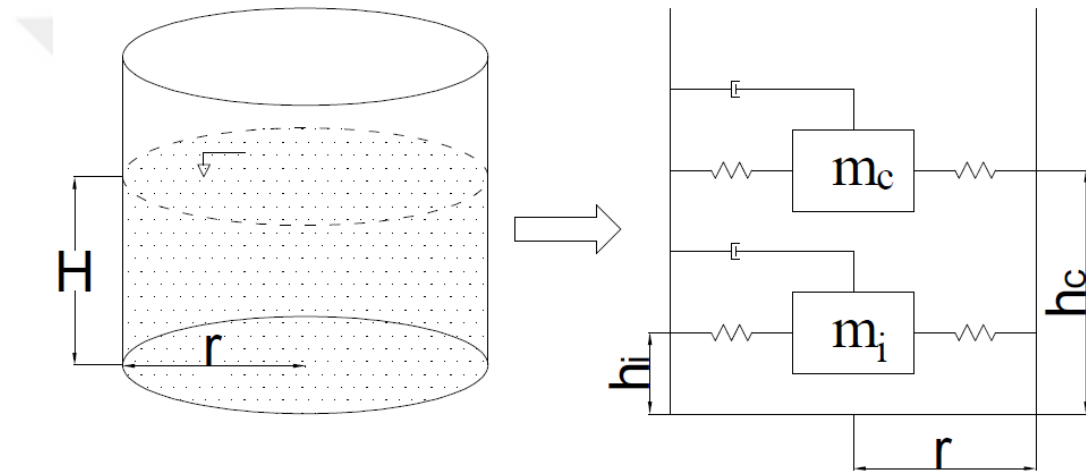
Son yıllarda, deprem sırasında tankların güvenliğini artırmaya yönelik taban izolasyon sistemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. 1994 yılında Malhotra, uplift analizleri yaparak ve enerji sönmeme kapasitesine sahip taban izolasyonu yöntemlerini önererek bu alanda yenilikçi tasarımların öncüsü olmuştur. 2000'lerde Shrimali ve Jangid, farklı taban izolasyon sistemlerinin deprem altındaki tank davranışları üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bu araştırmalar, tank tasarımındaki güvenlik yaklaşımlarını daha da geliştirmiştir [22-29].

Günümüzde yapılan çalışmalar, tankların ankrajsız konfigürasyonlarına yönelik detaylı analizlere odaklanmaktadır. Konstantinos Bakalis ve Spyros A. Karamanos, ankrajsız sıvı depolama tanklarının kuvvetli yatay yükler altındaki kaldırma mekanizmasını inceleyen kapsamlı bir araştırma yürütmüştür. Çalışmalarında, üç boyutlu sonlu eleman modelleri kullanarak doğrusal olmayan statik analizler gerçekleştirmişlerdir. Bu analizler, rijit bir temel üzerindeki ankrajsız tankların moment-dönme ilişkisini tanımlamış ve meridyenel ile çember gerilmelerinin dağılımını hesaplamıştır. Çalışma, ankrajsız ve ankrajsız tanklar arasındaki kritik farkları ortaya koyarak, ankrajsız tankların deprem performansını daha iyi anlamak için analitik

çözümler geliştirmiştir. Bu çözümler, tank tasarımında güvenilir ve basit bir değerlendirme yöntemi sunmaktadır. [30].

Tüm bu çalışmalar, deprem sırasında tank, taban ve sıvı etkileşimlerini anlamının, güvenli tasarım ve operasyon açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Tanklarla ilgili yapılan ilk araştırmalar. Jacobsen (1949), Graham ve Rodriguez (1952) ve Housner (1957) tarafından yapılan çalışmalardır. Bunlar arasında hemen hemen her tank araştırmasında görebileceğimiz ve geçmişten günümüze kadar uzanan Housner (1957) tarafından modellenmiş tek serbestlik dereceli modeldir; tankların hidrodinamik etkisini çok iyi bir şekilde tanımlamıştır (Şekil 2.1) [3], [4].



Şekil 2.1 Housner modeli (1957)

Bunun dışında literatürdeki araştırmaları yapılan çalışmalara göre tankları genellemek istersek, Rijit ve esnek depolama tankları (Rigit and flexible storage tanks), Bağlantılı ve bağlantısız depolama tankları (Anchored and unanchored storage tanks), Rijit ve esnek destekli depolama tankları (Rigidly & flexibly supported storage tanks), Bölmeli depolama tankları (Baffled Tanks) şeklinde gruplandırabilmek mümkündür.

Bununla birlikte literatürde farklı çözüm yöntemleri de kullanılmıştır. Arbitrary Langrangian Eulerian (ALE), Coupled Eulerian Lagrangian (CEL), Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)... v. b gibi birçok yöntem kullanılmıştır.

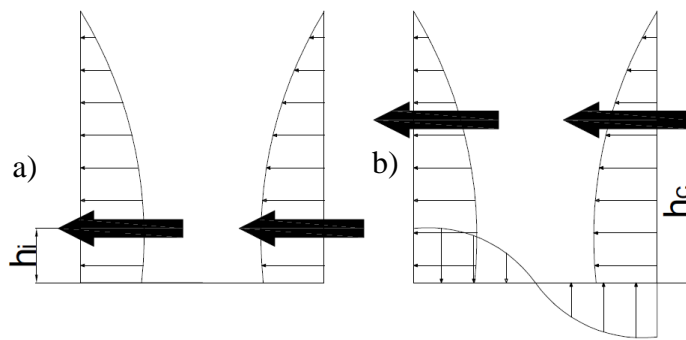
Deprem etkisi altında oluşabilecek hasarlar hakkında geçmiş bizim için güzel örneklerle doludur ve her geçen deprem yeni tecrübeler oluşturarak, yeni bilgiler sunmaktadır.

2010 yılında Şili'de meydana gelen 8.8 büyüklüğündeki deprem, tanklar, silolar ve şarap imalathaneleri gibi endüstriyel tesisleri de büyük ölçüde etkiledi. Keşif ekibi,

depremden önce faaliyette olan çok sayıda çelik tank olduğunu ve bu tankların temel olarak iki farklı özelliğe ayrıldığını bildirmiştir: ayak destekli ve sürekli destekli tanklar [31]. Bacak destekli tanklar, desteklerde veya kaynak bağlantılarında yetersiz sertlik nedeniyle oluşan dengesizliklerden muzdaripti. Sürekli tanklarda ise, yetersiz kalınlık veya tank duvarlarındaki kalınlık/rijitliğin ani değişimi nedeniyle fil ayağı ve elmas şekilli burkulma modları yaygındı.

2011 yılında Tohoku'da meydana gelen 9.0 büyüklüğündeki deprem nedeniyle 400'den fazla petrol depolama tankı hasar gördü [32]. Tsunami kaynaklı aşırı yanal yükler ve yüksek yer ivmelenmeleri nedeniyle tank gövdelerinde kayma ve devrilme hasarları, ayrıca aşınma kaynaklı çok sayıda taban plakası, zemin ve sert boru hasarları rapor edilmiştir. Son olarak 6 Şubat 2023'te Doğu Anadolu'nun güneybatı kesiminde art arda gelen Maraş depremleri (Mw 7.8 Pazarcık ve Mw 7.6 Elbistan) meydana geldi. Konut binaları, hastaneler, yaşam hatları, depolama tankları ve silolar, limanlar ve barajlar dahil olmak üzere çok çeşitli yapılar ağır hasar gördü [33]. Deprem bölgesi halkının büyük çoğunluğunun tarım ve hayvancılıkla uğraşması nedeniyle bölgede çok sayıda mısır ve buğday depolama silosu ile sıvı depolama tankları da bulunuyordu.

Ankrajlı ve ankrajlı depolama tankları, karmaşıklığı nedeniyle araştırmacılar için her zaman zorlu bir konu olmuştur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için Housner, tank duvarında etkili olan hidrodinamik basıncı ani ve konvektif parçalara ayırarak basitleştirilmiş bir model önerdi [5]. Daha ileri çalışmalar, Housner modeli [6],[13] üzerinde tank duvarı esnekliğini ele alarak yürütüldü (Şekil 2.1).



Şekil 2.2 Housner Hidrodinamik Modeli a) Darbesel basınç b) Devrimsel basınç

Deneysel çalışmalar, depolama tanklarının özelliklerinin (tank çapları, şekil, duvar kalınlığı, malzeme, temel tipi) gerilmeleri ve dolayısıyla genel sismik davranışı yönetmede önemli olduğunu göstermiştir [34], [35]. Bu çalışmaları, çalkalanma (sloshing) ve yükselme (uplift) etkisini dikkate alan daha kapsamlı çalışmalar izledi

[36], [38]. Malhotra, yükselme olayları nedeniyle sabitlenmemiş silindirik sıvı depolama tankı tepkilerinin değerlendirilmesi için yaklaşık bir yöntem öneren ilk araştırmacılardan biriydi [39]. Son yıllarda gelişen teknoloji ve artan hesaplama hacmi kapasitesine bağlı olarak, özellikle sıvı depolama tanklarının kaldırma etkileri konusunda çok daha kapsamlı çalışmalar yürütülmektedir. Tankların alt plakasında kaldırma etkisinden kaynaklanan sismik kırılabilirlik ve plastik menteşe gelişimini araştırmak için titiz sonlu eleman modelleri kullanılmıştır [40], [41].

Statik olarak içerisinde sıvı bulunduran tanklarda hidrostatik basınçlar oluştuğu bilinmektedir. Fakat deprem etkisi altında kalan sıvı depolama tankları içerisindeki sıvının çalkalanması sonucuyla hidrodinamik basınçlara maruz kalmaktadır. Sıvı – yapı etkileşimi doğrusal olmayan olarak oluştuğundan dolayı karmaşık problemlerle karşı karşıya kalınmaktadır. Bu problemler yumağını her yapılan çalışma çözümlenmeye bir adım daha yaklaştırmaktadır ve ayrıca bugüne kadar olan depremlerden birçok hasar tipi tecrübe edilmiştir.

2.2. Hasar Tipleri

2.2.1. Fil ayağı burkulması (Elephant foot buckling)

Deprem sırasında tankın alt kısmına etki eden dinamik ve statik kuvvetler, özellikle sıvının depolandığı bölgenin tabanına, yüksek aksenal gerilmeler uygulamaktadır. Bu gerilmeler, tankın metal kabuğunda yerel gerilme konsantrasyonlarına neden olabilmektedir. Eğer bu gerilmeler, tankın yanıl dayanım sınırlarını aşarsa, burkulma meydana gelmektedir. Bu tip burkulmalar, özellikle tankın zemine temas eden alt kısımlarında daha belirgin olmaktadır. Burkulma, zeminle temas eden alt kısımlarda genellikle daha yüksek olup, tankın stabilitesini tehdit eder (Şekil 2.3).

Deneyisel bir çalışmada (Niwa ve Clough, 1982), bu tür bir arıza mekanizmasının, kritik gerilmeleri aşan dikey basınç gerilmelerinin birleşik etkisinin bir sonucu olduğu sonucuna varılmıştır [42].

Bu tür burkulmaların önlenmesi için, tankın taban kısmının yeterli kalınlıkta malzemelerle yapılması ve elastik-plastik davranışın dikkate alınarak tasarım yapılması gerekmektedir. Ayrıca, API 650 gibi endüstriyel standartlar doğrultusunda, tankın taban kalınlığının ve malzeme mukavemetinin belirlenmesi de çok önemlidir. Tabanın

tasarımında, tankın zeminle olan bağlantısı ve tank duvarlarının etkileşimi, burkulma riskini azaltmaya yardımcı olabilir.

Nielsen ve Kremidjian (1986) büyük depremlerden kaynaklanan petrol rafinerilerindeki hasarı araştırdılar. 1933 ile 1983 arasındaki depremlerin hasar raporlarını incelediler ve tankların geometrik özelliklerini ve arıza türlerini gösteren bir liste verdiler. Çoğunlukla meydana gelen arıza türleri fil ayağı burkulması ve çatı hasarlarıdır [43].



Şekil 2.3 Fil ayağı burkulması (NISEE e-Library)

2.2.2. Çatı ve kabuk hasarları

Deprem sırasında sıvının hareketi, tankın çatısında veya kabuk elemanlarında deformasyonlara yol açmaktadır. Özellikle "sloshing" adı verilen sıvı dalgalanması, tankın üst kısmındaki yapı elemanlarını zorlamaktadır. Çalkalanma etkisi, tankın içindeki sıvının hareketiyle ortaya çıkar ve tankın üst kısmındaki çatının veya cidarın deformasyonlarına yol açmaktadır. Tankın doluluk seviyesi, çap-yükseklik oranı gibi geometrik parametreler, çalkalanma etkisinin şiddetini belirlemektedir.

Çatının rijitliği artırılarak, sıvı dalgalanmasının etkisi azaltılabilir. Bunun için tank tasarımında, çatının sismik kuvvetlere dayanıklı hale getirilmesi gerekmektedir. Çatı elemanları ve kabuk tasarımı, deprem sırasında meydana gelen dinamik yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 2.4 Çalkalanma hasarları (Kocaeli-1999)

Çalkalanma, tank içinde sıvının hareket etmesi ve bu hareketin tank duvarlarına çarpması sonucu oluşan hasarlardır. Depremler sırasında çalkalanma, tankın iç yapısına büyük yükler bindirmektedir. Bu durum, tankın üst kısmındaki lokal deformasyonlar veya yapısal çöklüğe neden olmaktadır. Çalkalanma, tankın içindeki sıvının dinamik hareketiyle oluşan rezonans frekansları ile daha belirgin hale gelmektedir.



Şekil 2.5 Çalkalanma hasarları (Kahramanmaraş-2023)

Çalkalanma etkilerinin azaltılması için, tank tasarımında "baffle" adı verilen iç bölücü elemanlar kullanılabilir. Bu bölücüler, sıvının hareketini sınırlandırarak dalgalanmanın şiddetini azaltmaktadır. Ayrıca, tankın dinamik analizlerinin yapılması, sıvının rezonans frekansına dikkat edilerek tasarım yapılması oldukça önemlidir.

Önemli hasar tiplerinden Elmas Şeklinde Burkulmanın en önemli sebebi ince duvarlardan kaynaklanmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Elmas şekilli burkulma hasarı (NISEE e-Library)

2.2.3. Taban bağlantısı ve kesme hasarları

Deprem sırasında, tankın tabanına etki eden kesme kuvvetleri, özellikle tabanın zeminle olan bağlantı noktalarında yoğunlaşmaktadır. Bu kesme kuvvetleri, ankraj elemanlarının deformasyonuna veya kopmasına yol açabilmektedir. Zayıf bağlantı sistemleri, tankın yer değiştirmesine ve daha ciddi yapısal hasarlara yol açabilmektedir. Bu tür hasarlar, tankın devrilmesine veya sıvı sızıntılarına neden olabilmektedir.

Tank tabanının zeminle güçlü bir şekilde ankrajlanması, bu tür hasarları önlemenin temel yoludur. Ancak; ankraj elemanlarının, deprem yüklerini karşılayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca, taban ile zemin arasındaki rijitliğin artırılması, hasar riskini azaltan önemli bir faktördür.

2.2.4. Devrilme (Overturning)

Deprem sırasında tankın zeminle bağlantısının yetersiz olması, tankın devrilmesine neden olabilmektedir. Özellikle yüksek sıvı seviyesi, tankın ağırlık merkezini yukarı taşıyarak devrilme riskini artırmaktadır. Bu durumda, sıvının hareketi ve tankın yüksek ağırlık merkezi, tankın stabilitesini olumsuz etkilemektedir.

Tankın devrilmesini önlemek için, ağırlık merkezi düşük tutulmalı ve zeminle bağlantılar güçlendirilmelidir. Tank tasarımında, ankraj elemanlarının, deprem yüklerini

karşılayabilecek şekilde tasarlanması önemlidir. Ayrıca, tankın alt kısmının zeminle güçlü bir şekilde bütünleşmesi sağlanarak devrilme riski azaltılabilmektedir.

Devrilme momenti, depolama tanklarının tabanında, özellikle depremler sırasında meydana gelen kritik kuvvet çiftlerinden biridir ve tankın stabilitesini doğrudan etkiler. Bu moment, tankın yapısal elemanları ve sıvının dinamik hareketleri arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Deprem sırasında sıvının impulsif ve konvektif hareketleri ile tankın ağırlığından kaynaklanan kuvvetler, tabanda gerilme ve kaldırma (uplift) riskini artırabilir. Momentin büyüklüğü, tankın geometrisi, sıvı seviyesi ve deprem yüklerinin şiddeti gibi faktörlere bağlıdır.

Ringwall momenti ve slab momenti, devrilme momentinin bileşenleridir. Ringwall momenti, tankın çevresindeki betonarme halka temelin etkisiyle oluşur ve sıvı ile yapısal elemanların etkileşimlerinden kaynaklanan dinamik yükleri içerir. Slab momenti ise tankın tabanında, sıvının tankla etkileşimi sonucu meydana gelen kuvvetlerin birleşimidir. Bu iki momentin büyüklüğü, tankın stabilitesini belirler ve yapı mühendisliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Tankın tasarımında, geniş çaplı ve alçak tanklar, kalın taban plakaları gibi çözümler, kaldırma etkisini azaltarak stabiliteyi artırabilir. Ayrıca, deprem yalıtım sistemleri ve sıvı seviyesi kontrolü gibi önlemler de devrilme momentinin etkilerini sınırlamakta etkilidir. Devrilme momentinin doğru analizi, tankın yapısal bütünlüğünü ve deprem güvenliğini sağlamak için oldukça önemli bir rol oynar.



Şekil 2.7 Tank devrilme hasarları (Marlborough-2017)

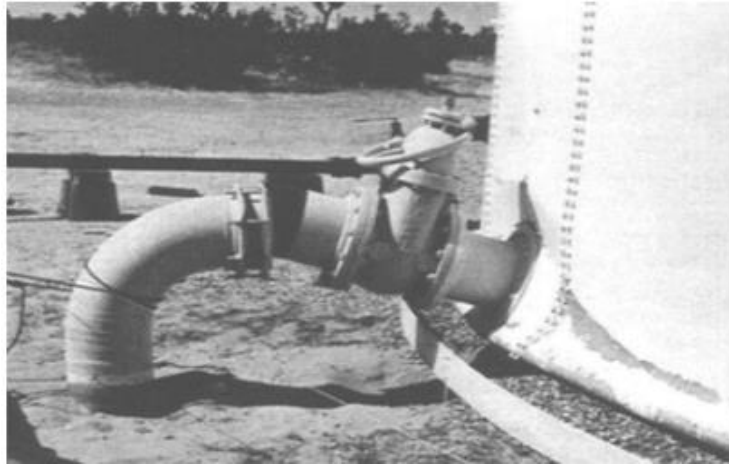
2.2.5. Sıvı basıncı ve çatlak oluşumu

Deprem sırasında tankın duvarlarına ve tabanına uygulanan hidrostatik ve hidrodinamik basınçlar, tankın malzeme dayanımını aşabilecek seviyeye çıkabilmektedir. Bu aşım, çatlaklara veya deformasyonlara yol açabilmektedir. Özellikle zayıf kaynaklı birleşim noktaları ve yanlış malzeme seçimleri, bu tür çatlakların oluşumunda etkindir.

Tank duvarlarının tasarımında, malzeme seçimi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, duvar kalınlıkları, tankın taşıyabileceği basınç yüklerine göre belirlenmelidir. Taban ve cidar birleşim noktalarındaki kaynak işlemlerinin yüksek standartlarda gerçekleştirilmesi, çatlak oluşumlarını engellemek için kritik bir faktördür.

2.2.6. Bağlantı hasarları

Deprem sırasında tankın bağlantılarındaki hasarlar, özellikle boru bağlantılarında ve tankın bağlantı elemanlarında meydana gelebilmektedir. Bu tür hasarlar, sıvı sızıntılarına ve yapısal zayıflıklara yol açabilmektedir. Bağlantı noktalarının esnek ve dayanıklı hale getirilmesi, bu tür hasarların önlenmesinde önemlidir. Tankın bağlantı sistemlerinin sismik yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanması bu tür sorunları minimize etmektedir.



Şekil 2.8 Bağlantı elemanlarının hasarı (Kocaeli-1999)

Silindirik çelik sıvı depolama tanklarının deprem etkilerine karşı dayanıklılığı, tankın tasarımında kullanılan malzemelerin kalitesi, yapısal analizlerin doğruluğu ve uygun mühendislik çözümleri ile sağlanmaktadır. Deprem sırasında tanklarda meydana gelebilecek hasarları önlemek için, tasarımın uluslararası standartlara uygun olması, gelişmiş mühendislik analizleri yapılması ve periyodik bakımın gerçekleştirilmesi

gerekmektedir. API 650, Eurocode 8 ve FEMA 368 gibi dokümanlar, bu tür tankların tasarımında önemli bir rehber olmaktadır.

2.2.7. Yükselme (Uplift)

Uplift, depolama tanklarında ve diğer yapı elemanlarında, zeminle yapının arasındaki kuvvet dengesizliğinden kaynaklanan bir yükselme hareketidir. Deprem sırasında, sıvının dinamik hareketleri ile yapının ağırlığı arasındaki etkileşim, tabanda ters yönde bir kuvvet yaratabilir. Bu kuvvet, tankın tabanının zeminden ayrılmasına ve yerinden hareket etmesine yol açabilir. Uplift etkisi, özellikle büyük sıvı hacimlerine sahip tanklarda, tankın stabilitesini tehlikeye atabilecek kritik bir sorundur.

Bu durum, tankın yapısal bütünlüğünü doğrudan etkiler ve birçok olumsuz sonuca yol açabilir. Uplift'in meydana gelmesiyle birlikte, tankın tabanındaki ayrılmalar ve deformasyonlar, tabanın tamamen yerinden oynamasına neden olabilir. Bu da tankın stabilitesinin bozulmasına ve çevresine zarar verebilecek büyük hasarlara yol açabilir. Ayrıca, taban ile zemin arasındaki bağlantının zayıflaması, tankın sızdırmazlık özelliklerini olumsuz etkileyebilir ve bu da sıvı sızıntılarına neden olabilir. Sızıntılar, çevreye zarar verebilir ve maddi kayıplara yol açabilir.

Uplift etkisi, tankın yapısal elemanlarında çatlama, deformasyonlar ve kalıcı hasarlara yol açabilir. Bu tür yapısal zayıflıklar, tankın onarım maliyetlerini artırarak, işlevsel kayıplara neden olabilir. Özellikle sıvı kaybı, tankın içindeki sıvı seviyesinin düşmesine yol açarak tankın verimliliğini ve güvenliğini tehlikeye sokabilir. Devrilme riski de bu hasarların bir sonucu olarak ortaya çıkabilir, bu da tankın çevresindeki alana büyük zararlar verebilir.

Sonuç olarak, uplift etkisinin tank üzerindeki olumsuz sonuçları, hem yapısal güvenliği hem de çevresel güvenliği tehdit eder. Bu nedenle, uplift riskini minimize etmek için uygun tasarım çözümleri ve yapısal güçlendirmeler önemlidir. Zeminle olan bağlantının güçlendirilmesi, taban plakalarının kalınlaştırılması, sıvı seviyesi kontrolü ve deprem yalıtım sistemleri kullanılarak, uplift etkisinin zararlı sonuçları sınırlandırılabilir.

2.3. Yönetmelikler

Dünya'da depolama tanklarının tasarımı, inşası ve güvenliği, çeşitli yönetmelik ve standartlarla düzenlenmiştir. Bu düzenlemeler, tankların yapısal dayanıklılığını sağlarken çevresel riskleri de minimize etmeyi hedeflemektedir. Dünyada en çok

kullanılan standartlardan biri olan API 650, atmosferik basınç altında çalışan çelik tanklar için kapsamlı tasarım kriterleri sunmaktadır. Özellikle sismik dayanım, basınç dağılımı ve kaynak kalitesi gibi kritik alanlarda detaylı bir yönetmeliktir. Avrupa merkezli EN 14015 ise, çevresel düzenlemelere uyum sağlayarak çevre dostu ve güvenilir tasarımlara odaklanmaktadır.

Deprem riski yüksek bölgelerdeki tanklar için, NZSEE 2009 önemli bir referans kaynağıdır. Yeni Zelanda merkezli bu yönetmelik, deprem sırasında tankların dinamik davranışlarını analiz ederek, rijitlik artırıcı önlemler ve güçlendirme teknikleri önermektedir.

Türkiye’de ise doğrudan bir tank yönetmeliği bulunmamakla birlikte, Deprem Etkisi Altında Boru Hattı Sistemleri Tasarımı İçin Esaslar yönetmeliği, özellikle boru hatlarının deprem gibi sismik etkilere karşı dayanıklı olmasını sağlamak amacıyla hazırlanmış bir düzenlemeyi içermektedir. Bu yönetmelikte yer alan 2. Bölüm, depolama tanklarının tasarımını ve güvenliğini ele almaktadır. Bu bölüm, tankların deprem sırasında nasıl bir performans sergilemesi gerektiğini ve sismik yüklerin etkilerini nasıl azaltabileceğini detaylandırmaktadır. Bu yönetmelik API 650 ve NZSEE 2009 yönetmeliklerinin karışımından oluşturulmuştur. Bunun yanı sıra, TS EN 14015 ve TS ISO 28300 gibi Türk Standartları, uluslararası düzenlemelerin yerel ihtiyaçlara adapte edilmiş versiyonları olarak öne çıkmaktadır.

Tüm bu yönetmeliklerin ortak amacı, tankların güvenli, dayanıklı ve çevre dostu olmasını sağlamaktır. Hidrolik yükler, sismik performans, malzeme seçimi ve çevresel güvenlik gibi konular, standartların temel odak noktalarıdır. Depolama tankları için belirlenen bu kurallar, mühendislerin ve tasarımcıların hem yerel hem de uluslararası projelerde güvenilir çözümler sunmasına olanak tanımaktadır.

API650 yönetmeliğinden başlıca kontroller.

- Dış Çeper Gerilme Kontrolleri
- Kabuk Basınç Kontrolleri
- Devrilme Momenti (Over Turning) Kontrolleri
- Kayma Kontrolleri
- Sabit Çatı Bileşen Detayları
- Ankraj Dizaynı
- Yükselme (Uplift) Kontrolleri (Self-Ankraj Tanklar)
- Temel Dizaynı

- Bağlantı Kontrolleri

Deprem etkilerinin azaltılması için, tankların geometrisi, doluluk oranı, sıvının dinamik davranışı ve malzeme özellikleri doğru bir şekilde analiz edilmeli ve tanklar, deprem yüklerine yenilmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu önlemler, tankların güvenliğini artırabilmekte ve olası felaketlerin önüne geçebilmektedir.

2.4. Tank Geometrisinin Genel Davranış Üzerindeki Etkileri

Silindirik sıvı depolama tankları mühendislik açısından birkaç kritik faktörü göz önünde bulundurmaktadır. Öncelikle, silindirik şekil, tankın içindeki sıvıdan kaynaklanan basıncın daha dengeli bir şekilde dağılmasına olanak tanımaktadır. Bu, silindirik yapının her noktasındaki iç basıncı eşit olarak iletmesini sağlamakta ve bu sayede tankın yapısal dayanıklılığı artırmaktadır. Diğer şekillere, özellikle kare veya dikdörtgen tanklara kıyasla, silindirik yapılar iç basınç altında daha az stres oluşturmaktadır. Bu, tankın daha yüksek güvenli ve uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

Ayrıca, silindirik tanklar, malzeme kullanımını optimize ederek daha verimli bir iç hacim sunmaktadır. Aynı depolama kapasitesini sağlamak için daha az malzeme kullanılması, üretim maliyetlerini düşürmekte ve tankların daha hızlı imalatını mümkün kılmaktadır. Silindirik tanklar, malzeme kaynaklı bozulmalara karşı daha dirençli olduğundan, zorlu çevresel koşullara da daha iyi uyum sağlamaktadır. Isıl genleşme ve çevre sıcaklık değişimleri gibi etkenler, silindirik yapıda daha homojen bir şekilde dağılmakta, bu da tankın yapısal bütünlüğünü korumaktadır.

Diğer taraftan, kare veya dikdörtgen tanklar, depolama alanından daha fazla yer tasarrufu sağlayabilse de iç basınç dağılımı daha düzensiz olduğu için, bu tür tanklarda daha fazla malzeme gereksinimi doğmaktadır. İç yüzeydeki stresin düzensizliği, tankın dayanıklılığını olumsuz etkilemekte ve uzun vadede yapısal sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, silindirik tanklar, mühendislik açısından da sürdürülebilirlik açısından da daha verimli, dayanıklı ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

Literatüre baktığımız zaman birçok silindirik tank geometrisi çözümlenmiş olup, tank çeşidini anlamak için en önemli kriter tank yüksekliği (H) / yarıçap (R) olmaktadır. Bu kriter hem yapısal hem de fonksiyonel performans açısından kritik bir parametredir. H/R oranı, tankın davranışını anlayabilmenin, taşıyabileceği yükleri kestirebilmenin ve uzun vadeli dayanıklılığını belirleyebilmenin en kısa yolu olan temel bir kriterdir. Bu kritere göre tankları iki ana grup olarak ayırabiliriz;

Geniş tanklar (Broad tanks): Geniş ve yüksekliği az tanklar, H/R oranı 1'den küçük olan, geniş ve alçak tanklardır. Hidrolik yüklerin daha homojen dağılması ve devrilme riskinin düşük olması bu tankların en büyük avantajıdır. Ancak, büyük bir taban alanı gerektirdikleri için geniş alanlarda kullanılmaları daha uygundur.

Narin tanklar (Cylinder tanks): Dar ve yüksek tanklar, H/R oranı 1'den büyük olan, dar ve yüksek tanklardır. Daha az yer kaplarlar ve yüksek depolama kapasitesine sahiptirler. Ancak, yatay yükler (rüzgâr, deprem gibi) karşısında daha dikkatli bir mühendislik tasarımı gerektirmektedir.

Silindirik tanklarda sıvı basıncı, tankın yüksekliğine bağlı olarak artmaktadır. H/R oranı, bu basınç dağılımının tabanda nasıl bir etki yaratacağını doğrudan etkilemektedir. Eğer düşük bir H/R oranı bulunuyorsa Geniş Tanklarda (H/R oranı düşük olan) sıvı basıncı daha geniş bir yüzeye yayıldığı için tabanda daha homojen bir basınç dağılımı oluşmaktadır. Bu durum, tankın zeminle daha dengeli bir etkileşim kurmasını sağlamakta ve zemin yüklemelerini optimize etmektedir. Eğer yüksek H/R oranı bulunuyorsa Narin Tanklarda (H/R oranı yüksek olan) sıvı basıncı, tabanda daha dik bir şekilde artmaktadır. Bu, tank duvarlarında ve taban birleşimlerinde daha yüksek gerilmelerin oluşmasına yol açmaktadır.

Silindirik tanklar, deprem yükleri altında farklı davranışlar sergilemektedir. H/R oranı bu davranışın belirlenmesinde önemli bir etkidir. Narin Tanklar, deprem sırasında yatay hareketlerden daha fazla etkilenmektedir. Yüksekliği fazla olan bu tanklar için rijitlik artırıcı önlemler alınmalıdır. Örneğin, destek elemanları ve dış kaburga takviyeleri kullanılarak yapısal stabilite artırılabilir. Fakat; Geniş Tanklar, daha kısa ve geniş olan tanklar, yatay yükler altında genellikle daha dayanıklı bir performans sergilemektedir. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde bu tür tanklar daha güvenli bir çözüm sunmaktadır.

H/R oranı, tankın imalatında kullanılacak malzeme türünü ve kalınlığını da belirlemektedir. Narin tanklarda, duvarların maruz kaldığı gerilmeler daha yüksektir. Bu nedenle, tank kabuğu için seçilen malzeme daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalıdır. Ayrıca, kabuk kalınlığı bu yüksek gerilmeleri karşılayacak şekilde artırılmalıdır. Fakat; Geniş tanklarda, duvarlar üzerindeki gerilmeler daha düşük olduğu için malzeme ve imalat maliyetleri optimize etmektedir.

Mühendislik çözümleri ve tasarım yaklaşımları kapsamında H/R oranına göre bir tankın tasarımında dikkate alınması gereken başlıca unsurlar;

- **Stabilite:** Tankın devrilmesini önlemek için H/R oranı ile birlikte, sıvının doluluk oranı, tankın ağırlık merkezi ve zeminle etkileşimi göz önünde bulundurulmalıdır.

- **Dinamik Yükler:** Deprem bölgelerinde tasarım yaparken narin tanklar için sismik izolasyon sistemleri veya enerji sönümleyici mekanizmalar entegre edilebilmektedir.

- **Yapısal Güçlendirme:** H/R oranı yüksek tanklarda, yatay yüklerin etkisini azaltmak için kaburga, çapraz destekler veya betonarme temeller kullanılarak yapı güçlendirilmelidir.

- **Malzeme Seçimi:** Tank malzemesi, maruz kalacağı sıvının kimyasal özelliklerine ve sıcaklık değişimlerine uygun olarak seçilmelidir. Yüksek H/R oranına sahip tanklarda, daha mukavemetli alaşımlar tercih edilebilir.

H/R oranı, silindirik tankların tasarımı ve performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Geniş tanklar, stabilite ve homojen basınç dağılımı açısından avantajlıyken, narin tanklar, daha az alan kaplayan ve yüksek hacimli çözümler sunmaktadır. Ancak, her iki tank türü de doğru mühendislik hesaplamaları ve yapısal optimizasyon ile verimli bir şekilde tasarlanabilir.

Bu nedenle, bir mühendis olarak tank tasarımında H/R oranını dikkate alırken sadece geometrik değil, aynı zamanda yapısal, dinamik ve çevresel faktörleri de göz önünde bulundurmalıyız. Böylece, güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü çözümler üretmek mümkün olacaktır.

2.5. Kahramanmaraş depremlerinde gözlenen hasarlar

6 Şubat 2023 ve 7 Şubat 2023 tarihlerinde ard arda gerçekleşen depremlerin ardından bölgede bulunan tankların deprem kuvvetlerine karşı direnç göstermiş olmasından dolayı ikincil afetlere yol açmamış ve ekonomik kayıplar oldukça az bulunmaktadır. Tankların sismik etkiler altında genellikle tank tabanında ve tank duvarlarında hasarlar oluşmaktadır. Fakat burada bulunun tankların kayma sebebiyle bu tür hasarlar oldukça az düzeyde olup, tankların bağlantı elemanlarında bazı kopmalar, çalkalanmadan kaynaklı bazı çatı hasarları gerçekleşmiştir. Tank sahasından geçen fay hattının neden olduğu tank hasarlarına (Şekil 2.9-2.13) örnek olarak; temelin çevresindeki topraktan ayrılması, tank tabanının yükselmesi sonucu tank tabanı halka sacında deformasyonlar oluşması, tabanın kayması sonucu kalıcı deformasyonlar

oluşması, bağlantı borularında hasar oluşması ve çatıda sıçrama nedeniyle oluşan hasarlar verilebilir.



Şekil 2.9 Tank çifliğinin ortasından geçen (a) fay kırığı, (b) temelin yerinden oynaması, (c) beton çatlama hasarları



Şekil 2.10 (a) Yükselme deformasyonları (b) Tank tabanının kayması



Şekil 2.11 Temelde kayma



Şekil 2.12 Boru ve bağlantı elemanlarındaki hasarlar

Tankların sismik tepkisi üzerinde yükselme ve kaymanın etkileri. Tabanın kayması nedeniyle bazı orta ince tanklarda kalıcı deformasyonlar meydana geldi. Ancak bu fenomen üst yapıya iletilen kuvvetleri azaltıyor gibi görünüyor. Bu makale, kayma ve yükselme davranışları da dahil olmak üzere ince tankların sismik performansına odaklanmaktadır.



Şekil 2.13 Sıvının çalkalanması sonucu tank duvarındaki hasarlar

2023 Türkiye depremlerinde sıvı depolama tanklarında farklı biçimlerde ve düzeylerde hasarlar meydana gelmiştir. Tehlikeli madde içeren tipik hasar biçimleri, alt sacın yırtılması, tank duvarının yırtılması, kapalı çatılı tankların çatıya yakın bölgelerinde sıçrama nedeniyle tank duvarı hasarı, sarsıntı sonucu sıvı kaybı ve taşmasıdır. Bunlar çoğunlukla taban yükselmesi nedeniyle taban plakasının kopması, beton temelin dökülmesi, kayma sonucu kalıcı yer değiştirmeler, bağlantı borularında

kopma ve ayrılma, sıçrama nedeniyle tank çatısı bölgelerine yakın tank duvarının burkulması ve sınırlı miktarda sıvı taşması şeklinde olmuştur.

İncelenen alanlardaki tanklar çoğunlukla tabanda serbestçe oturan sabitlenmemiş tanklardır. Bu nedenle, hasar formları çoğunlukla kayma ve sınırlı miktarda taban yükselmesiyle ilişkilendirilmiştir. Öte yandan, sabit çatılı tanklarda sıvının sıçraması nedeniyle bir miktar hasar gözlemlenmiştir. Sert tank-boru bağlantıları, tabanda göreceli yer değiştirme nedeniyle kopmaya karşı hassas görünmektedir.



3. YÖNTEM

İçerisinde sıvı ihtiva eden tanklarda hidrostatik basınç bulunması ile birlikte sismik etkiye maruz kaldıklarında hidrodinamik basınç oluşmaktadır. İnce cidarlı, narin yapılar olduğundan sıvı-yapı etkileşimleri doğrusal olmayan bir şekilde gerçekleşmektedir ve yönetmeliklere göre yapılan tasarım sismik etkiye yenilebilmekte ve istenmeyen sonuçlar doğabilmektedir. Tanklar sismik etkiye maruz kaldıklarında, Housner'ında modelinde gözüktüğü üzere darbesel ve devinimsel kuvvetler olarak iki şekilde olur. Darbesel kuvvetler tank içerisindeki sıvının bir bölümünün tank ile birlikte hareket etmesiyle oluşurken, devinimsel kuvvetler tank içerisindeki sıvının üst kısmındaki çalkalanma hareketiyle oluşmaktadır. Bu gibi doğrusal olmayan hareketleri çözümlmek için sonlu elemanlar metodu biçilmiş kaftandır.

3.1. Sonlu Elemanlar Analiz Programları

Abaqus ve Ansys, mühendislik simülasyonları için güçlü yazılım paketleridir. Abaqus, özellikle nonlinear analizler ve çoklu etkileşimler gerektiren projelerde öne çıkmaktadır ve yapısal, termo-mekanik, sıvı-yapı etkileşimleri gibi karmaşık senaryoları modellenmektedir. Ansys ise çok disiplinli simülasyonlar sunmaktadır ve yapısal, akışkanlar dinamiği, elektromanyetik analizler gibi geniş bir yelpazeye hitap etmektedir.

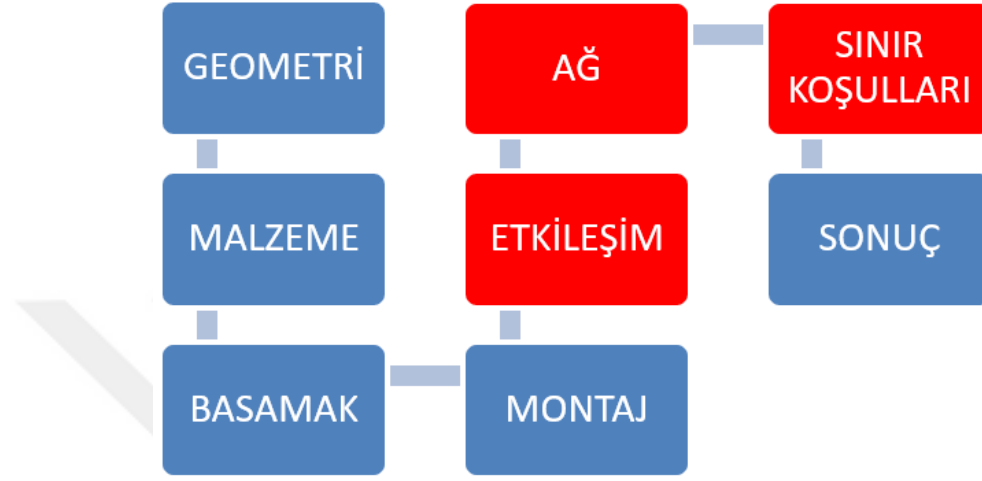
Sismik etkiye maruz kalan silindirik sıvı depolama tanklarının analizi için Abaqus tercih edilmiştir. Çünkü nonlinear dinamik analizler, yapı-sıvı etkileşimi ve plastik deformasyonları doğru şekilde modelleyebilen Abaqus, bu tür karmaşık analizler için güçlü bir araçtır. Tankın yapısal davranışını ve sıvı hareketini simüle etmek, Abaqus'un sunduğu özelliklerle daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmada Abaqus programı aracılığıyla sonlu elemanlar metodunu farklı tanklar için uygulayıp farklı çalışmalara değinip, gerçek bir depremden etkilenen tank ile model sonuçları karşılaştırarak tankların genel hasarlarına yönelik yorumlanacaktır.

3.2. Sonlu Elemanlar Metodu ve Çözüm Yöntemleri

Öncelikle Abaqus programında tankın 3 boyutlu olarak modellenmesi dışında önemli noktalarına değinmek gelecek çalışmalara ışık tutması açısından oldukça önemlidir. Bilindiği gibi Abaqus ve benzeri programlar belirli bir düzen içerisinde 3 boyutlu modeli oluşturmamızı sağlamaktadır ve sırasıyla; geometri, malzeme, adım, ağ(mesh), ilişki, montaj, sınır şartları, sonuç şeklindedir. Bu işlemlerin içerisinde en

önemli olanları ilişki, sınır şartları ve ağ' dır (Şekil 3.1). Bu işlemlerde yapılan hatalar analiz sonuçlarını oldukça etkilemekte ve yanıltmaktadır. Sıvı-yapı arasındaki ya da yapı-zemin arasındaki etkileşimler doğru biçimlendirilmelidir, sınır şartları analiz etmek istediğimiz doğrultuda oluşturulmalıdır ve ağ kurallarına optimum şartlarda uyulmalıdır [44].



Şekil 3.1 Abaqus işlem adımları

Sonlu elemanlar analizi (FEA), mühendislikte karmaşık fiziksel süreçlerin simüle edilmesi ve çözüm üretilmesi için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir. Ancak, analizde kullanılan tekniklerin doğruluğu kadar çözüm sürelerinin optimize edilmesi de büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE), Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) ve Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) gibi gelişmiş yöntemler, farklı problem türlerine yönelik yenilikçi çözümler sunarak öne çıkmaktadır.

Sonlu elemanlar modellemesinde, tankların akışkan-yapı etkileşimini modellemek için sıklıkla kullanılan Arbitrary-Lagrange Eulerian (ALE) ve Coupled-Eulerian Lagrangian (CEL) gibi birkaç yöntem vardır. ALE yöntemi esas olarak tank gerilmeleri, yükselme ve kayma sorunlarını incelemek için tercih edilirken [45], [46] CEL yöntemi çalkantı ve dalga yüksekliği sorunları için kullanılır [47-49].

ALE yöntemi, Lagrangian ve Eulerian yaklaşımlarının avantajlarını birleştirerek deformasyonun yüksek olduğu durumlarda bile ağın bozulmasını önlemektedir. Özellikle metal şekillendirme ve çarpışma analizleri gibi uygulamalarda, malzemenin karmaşık hareketlerini başarılı bir şekilde modelleme yeteneğiyle dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, ağın yeniden düzenlenmesi gibi süreçler ek hesaplama yükü oluşturabilmekte ve çözüm süresini uzatabilmektedir.

CEL yöntemi, akışkanlar ile katı yapıların etkileşimlerini simüle etmek için tasarlanmış güçlü bir araçtır. Eulerian ve Lagrangian ağlarının birleşimi sayesinde, baraj yıkılması, patlama etkileri veya dalga hareketleri gibi dinamik olayların analizinde etkili sonuçlar vermektedir. Ancak, bu tür çift yaklaşım yöntemleri hem hesaplama hem de bellek kullanımını açısından daha fazla kaynak gerektirmektedir.

SPH, geleneksel ağ tabanlı yöntemlerin ötesine geçerek, ağsız bir modelleme yaklaşımını sunmaktadır. Parçacık tabanlı bir yöntem olduğu için büyük deformasyonların ve akışkanların karmaşık davranışlarının modellenmesinde etkili bir araçtır. Akışkan dinamiği, jeoteknik analizler ve patlama etkileri gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ancak, parçacıkların yoğunluğu ve dağılımı çözümün doğruluğunu etkilediği için dikkatli bir kalibrasyon gerektirmektedir.

Bu yöntemlerin her biri, mühendislik analizlerinde belirli türdeki problemlere odaklanarak farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Yöntemlerin seçimi, yalnızca problemi çözmek için değil, aynı zamanda çözüm süresini optimize etmek için de stratejik olarak yapılmalıdır. Problemin gereksinimleri, doğruluk hedefleri ve çözüm süresi kısıtlamaları göz önünde bulundurulduğunda, bu yöntemlerin her biri, mühendislik analizlerinde değerli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak, ALE, CEL ve SPH gibi yöntemler, hesaplama teknolojilerinin sağladığı olanaklarla mühendislik analizlerini daha verimli ve hassas hale getirmektedir. Bu yöntemlerin akıllıca seçimi hem doğru hem de zamanında çözüm üretilmesini sağlayarak, sonlu elemanlar analizini daha güçlü bir araç haline getirmektedir [50], [51].

Sıvı depolanan çelik tankların analizinde, Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) ve Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) yöntemleri öne çıkmaktadır. Bu tür yapılar hem sıvı dinamikleri hem de yapısal etkileşimlerin hassas bir şekilde modellenmesini gerektirdiğinden, doğru çözüm yöntemi seçimi kritik bir rol oynamaktadır.

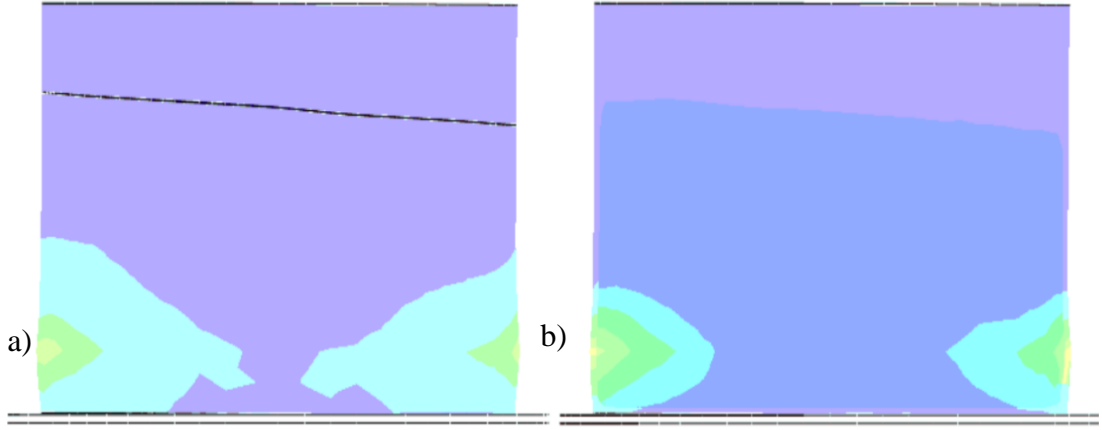
ALE yöntemi, tankın yapısal deformasyonlarını ve sıvının hareketini aynı anda modelleme kabiliyeti ile dikkat çekmektedir. Bu yöntemde, sıvının ve yapının birbirinden bağımsız olarak tanımlanmış ağlar üzerinden hareket edebilmesi, özellikle büyük deformasyonların olduğu durumlarda avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, ağın yeniden düzenlenebilmesi sayesinde, çözüm sırasında ağ bozulması riski minimize edilmektedir. Bu durum, özellikle deprem yükleri veya ani sıvı hareketleri gibi dinamik etkiler altında çalışan tanklarda, ALE yöntemini güvenilir bir seçenek haline getirmektedir.

CEL yöntemi ise sıvı ve yapısal bileşenlerin birleştirildiği durumlarda daha geniş bir çözüm yelpazesi sunmaktadır. Eulerian ağı sıvıyı, Lagrangian ağı ise tankın yapısını modellemesi, iki farklı davranışın entegre bir şekilde incelenmesini mümkün kılmaktadır. Ancak, bu yöntem, sıvının tankla temas ettiği bölgelerde daha karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir. Özellikle sıvı sıçraması, çalkalanma ve darbe kuvvetlerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerektiğinde, CEL yöntemi bu durumları yüksek hassasiyetle modelleyebilmektedir. Fakat CEL, bu kapsamlı modelleme yeteneği nedeniyle ALE' ye kıyasla daha fazla bellek kullanımı gerektirmekte ve çözüm süresi de genellikle daha uzun sürmektedir. Çözüm sırasında hesap bellek kullanımının artması, çok büyük modellerde performans kısıtlamalarına yol açmaktadır.

Her iki yöntemin sonuçları genellikle benzer olsa da çözüm süreleri ve kaynak kullanımı açısından farklar belirginleşmektedir. Örneğin, ALE yöntemi, sıvının hareketleri ve tank deformasyonları arasında yeterli hassasiyet sağlarken daha optimize bir kaynak kullanımı sunarken, CEL yöntemi ise özellikle sıvının karmaşık çalkalanma davranışlarını veya tankın rijit bölgesinde oluşabilecek ani kuvvet etkilerini detaylandırmak için tercih edilmektedir. Bununla birlikte, CEL çözüm süreçlerinde daha yüksek hesaplama süreleri ve bellek kullanımı nedeniyle, çözüm optimizasyonu için güçlü donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

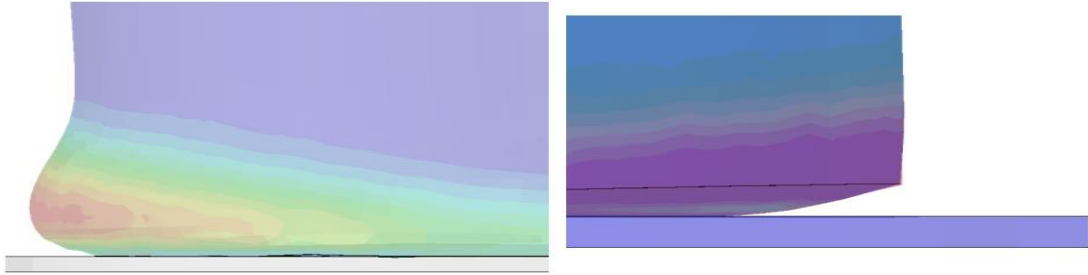
Teknik detaylara inildiğinde, tankın alt ve yan duvarlarının etkileşim bölgeleri, sıvının tank tabanına uyguladığı basınç ve çalkalanma kuvvetlerinin eş zamanlı analizi, çözüm yönteminin başarısını belirleyen kritik faktörlerdir. ALE yönteminde, sıvı-yapı etkileşiminde yerel deformasyonlar daha hızlı analiz etmekte iken, CEL yöntemi bu tür durumlarda daha detaylı bir veri seti sunarak çözümün kapsamını genişletmektedir. Örneğin, tankın doluluk oranına bağlı olarak değişen sıvı basınç dağılımı ve bunun tank cidarında yarattığı gerilmeler, her iki yöntemde de başarılı bir şekilde simüle edilmektedir.

Depolama tanklarının analizinde yöntem seçimi, yalnızca doğruluk ve hassasiyet değil, aynı zamanda proje süreleri ve bütçesi açısından da değerlendirilmeli, her iki yöntemin güçlü ve zayıf yönleri dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, ALE yöntemi daha optimize bir seçenek sunarken, CEL yöntemi, daha karmaşık senaryoların çözümünde eşsiz bir araçtır.



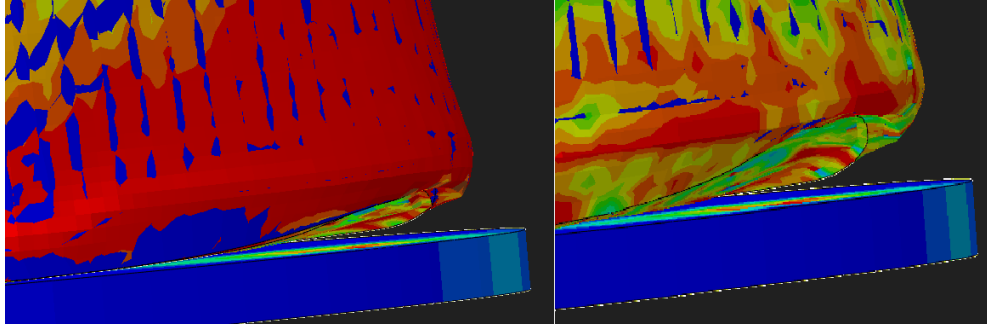
Şekil 3.2 a) ALE ile çözülmüş model, b) CEL yöntemi ile çözülmüş model. ale ve cel ile gerilme dağılımları

Yukarıda görseli verilmiş çalışmalardan kısaca bahsetmek isterim. Görüldüğü üzere her iki çözüm ağında da stres dağılımları ve dalgalanmalar aynı zamanda farklar tolere edilebilecek kadar yakındır. Fakat aynı donanım üzerinde ALE yöntemi 2 saat alırken, CEL yöntemi 2,5 gün almıştır. Çalışmada öncelikle daha önce kalibrasyonu yapılmış geniş tanklar üzerinden başlanmıştır ve farklı harmonik ivmeler altında yapı-sıvı ve yapı-zemin etkileşimleri ve hareketleri mercek altına alınmıştır. Bu bağlamda tankların darbesel ve devinimsel periyotları hesaplanarak rezonansa girmesi sağlanmış ve farklı hasar tipleri incelenmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.3 Tank duvarı ve tabanındaki basınç ve çekme deformasyonları

Yukarıda görülen resim H/R oranı 1,2 olan geniş bir tanka ait olup, sismik etki altında beklenen hasar alınmıştır. Yine bu tank üzerinde farklı ivmeler etki ettirilerek yapılan çalışmalarda fil ayağı, kabuk hasarı, devrilme, kayma (sliding) ve yükselme (uplift) gibi önemli hasarlar görülmüştür ve oluşma mekanizmaları çözümlenmiştir (Şekil 3.3).



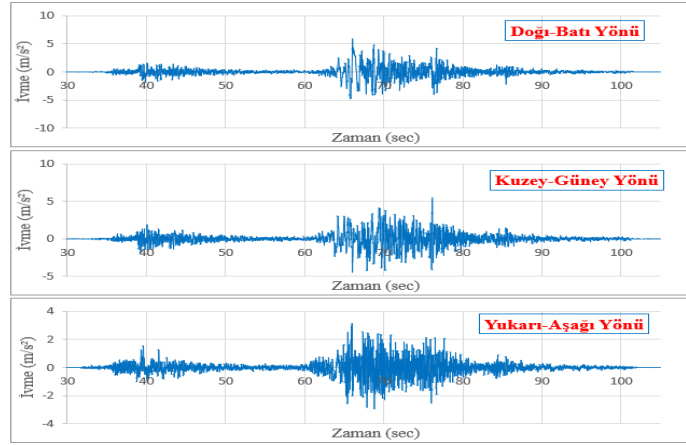
Şekil 3.4 Yapılan çalışmalarda gerçekleşen hasar

Bu yukarıda görülen görselde ise 1999 yılında Kocaeli depreminden etkilenen ve H/R oranı 0,82 olan bir tank birebir modellenmiş ve gerçek durumla birebir sonuçlar alınmıştır. Görselde gözüktüğü gibi uplift konusunda çok net görüntüler elde edilerek mekanizması çözümlenmiştir (Şekil 3.4).

Yapılan çalışmalara ek olarak vaka çalışması yapılmış olup; modellemenin gerçekte oluşan hasarlarla kıyaslanması amaçlanıp gelecek tasarımlara fayda sağlaması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda vaka çalışması için 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen Kahramanmaraş depreminden etkilenen Gaziantep'in Nurdağı ilçesinde bulunan bir sıvı yağ fabrikasındaki %50 doluluk oranına sahip silindirik/narin tank model olarak alınmıştır.

3.3. Konum ve Deprem Bilgileri

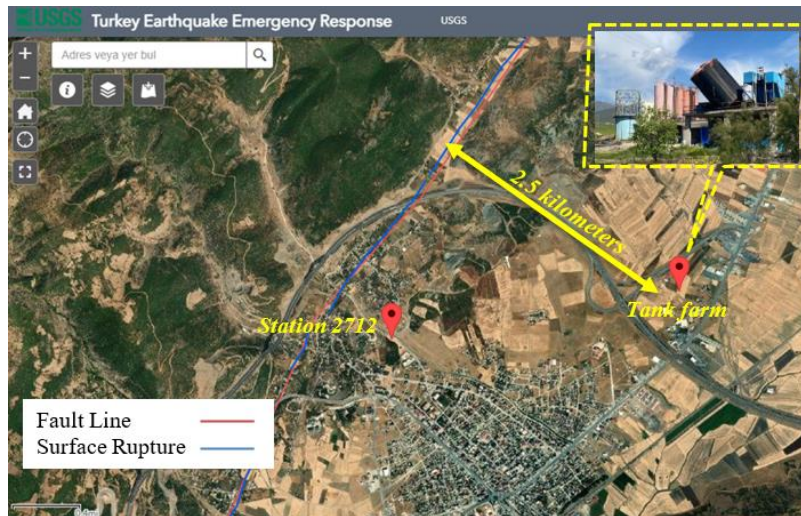
2023 Kahramanmaraş depremleri, Türkiye'nin güneydoğusunda büyük yıkımlara neden olan ve bölgedeki en güçlü sismik olaylardan birini temsil eden felakettir. 6 Şubat 2023 tarihinde, Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde saat 04:17'de 7.7 büyüklüğünde, ardından 10 dakika sonra Elbistan ilçesinde 7.6 büyüklüğünde bir ikinci deprem meydana geldi. Depremler, özellikle Kahramanmaraş, Gaziantep, Hatay, Adıyaman, Malatya gibi illerde büyük hasara yol açtı ve binlerce bina yıkıldı. Depremlerin etkisiyle yüzlerce kilometre uzunluğunda çatlamlar oluştu, ayrıca yer yüzeyinde belirgin kaymalar gözlemlendi.



Şekil 3.5 Pazarcık/Kahramanmaraş Mw 7.7 depreminin ivme-zaman geçişleri

Bu depremler, Güneydoğu Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan aktif bir bölgeyi etkileyerek büyük bir enerji salınımı oluşturdu. Depremlerden önceki sismik aktivite dikkatle izlenmişti, ancak bu büyüklükteki bir olay tahmin edilmemişti. Depremler, sadece bina yapıları üzerinde değil, bölgedeki altyapı, ulaşım ve enerji sistemleri üzerinde de büyük tahribat oluşturdu. Bu olay, Türkiye'nin deprem gerçeğiyle yeniden yüzleşmesine ve yapıların dayanıklılığının artırılması gerektiği yönünde önemli dersler verilmesine yol açtı.

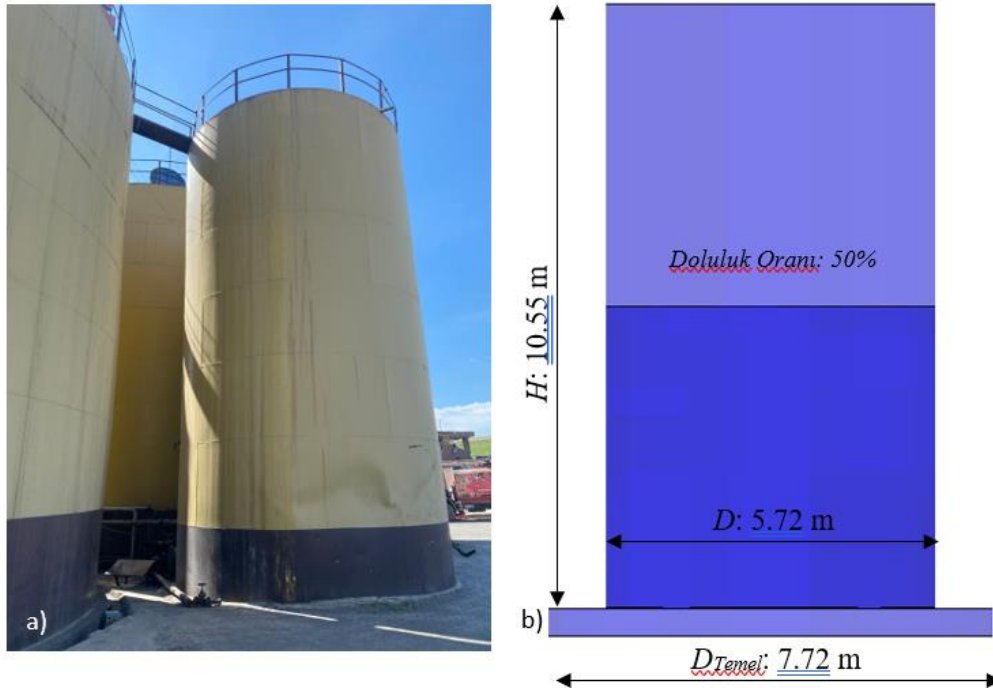
Sıvı yağ fabrikası Gaziantep ilinin Nurdağı ilçesinde bulunmakta olup fay hattı ile tank çiftliği arasındaki mesafe sadece 2,5 km'dir (Şekil 3.6). Türkiye İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) internet sitesine [52] göre, TK2712 kodlu istasyonun deprem bölgesinde fay hattına ve tank çiftliğine en yakın istasyon olduğu tespit edildi (Şekil 3.6). Gözlemlenen maksimum yer ivmeleri (PGA'lar) ise K-G, D-B ve U-D yönlerinde sırasıyla 5,51 m/s², 5,88 m/s² ve 3,15 m/s² olmuştur.



Şekil 3.6 Fabrikanın; fay hattı ve istasyon konum ilişkileri

3.4. Vaka Çalışmasının Abaqus'te Modellenmesi

Bu çalışmada, ALE yöntemi depremden etkilenen bir sıvı yağ depolama tankının yükselme ve kaymayla ilgili yapısal davranışını incelemek için kullanılmıştır. Hasarlı yağ depolama tankının sonlu elemanlar modeli, şirketten sağlanan saha verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Modelin doğrulanması, tankın gözlenen ve hesaplanan tepkilerinin karşılaştırılmasıyla yapılmıştır. Depolama tankı, 910 kg/m^3 yoğunluğa sahip ayçiçeği çekirdeği yağı içeriyordu. Tank, yüksekliği (H) 10,55 m ve çapı (D) 5,72 m olduğunda 1,84'lük bir H:D oranına sahip nispeten ince bir yapıya sahipti (Şekil 3.7/a). Deprem olayından önce tank, ankrajlı bir sınır koşuluyla yalnızca yarı doluydu (Şekil 3.7/b). Çelik malzemenin mekanik özellikleri, 10 mm kalınlıkta 235 MPa akma gerilimi, $E = 210.000 \text{ MPa}$ Young modülü, 7850 kg/m^3 yoğunluk ve 0,3 Poisson oranı olarak alındı.



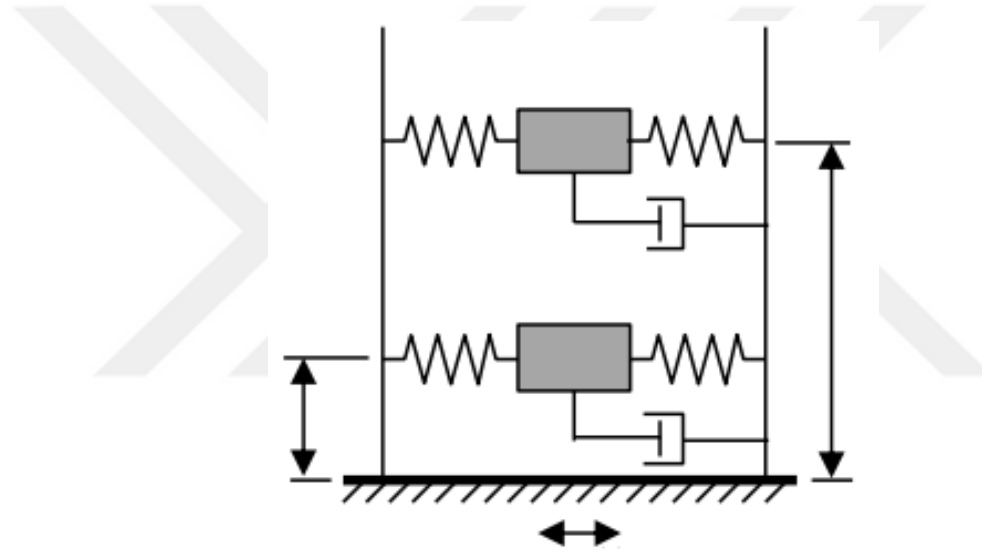
Şekil 3.7 (a)Nurdağın'daki Tank, (b) Sonlu Elemanlar Modeli

Genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS CAE, yüksek yer hareketleri ve ivmelere maruz kalan Ayçiçek yağı tanklarının sismik davranışını simüle etmek için kullanılmıştır. Gerçek durum, kendinden destekli gömülü tanka karşılık gelen sabit sınır koşulları olarak modellenmiştir. Ayrıca, tankın alt plakası ile taban plakası arasındaki $\mu = 0,6, 0,3$ ve $0,15$ gibi çeşitli sürtünme katsayılarını kullanarak ankrajsız tankların sismik davranışını incelemek için üç model daha oluşturulmuştur. Tank duvarları ve alt plaka S4R kabuk elemanları, alt plaka ve yağ parçaları ise C3DR8

katı elemanlar olacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm model için genel bir temas algoritması tanımlanmış ve tank tabanındaki sürtünmeli (teğetsel) davranış için bir yüzeyden yüzeye temas algoritması eklenmiştir. Analizler sırasında hesaplama maliyetini azaltmak için optimum ağ boyutunu belirlemek üzere bir ön çalışma yürütülmüştür. Tüm yatay ve düşey kayıtların eş zamanlı olarak tanka tabi tutulduğu dinamik-açık yükleme adımından önce yerçekimsel statik yükleme adımını içeren açık bir analiz prosedürü izlenir.

3.5. Nurdağı'nda ki Tankın Yönetmelik Hesapları

Darbeli ve konvektif bileşenler esas olarak API 650 [53] koduna atıfta bulunur ve Housner'ın basitleştirilmiş modeline göre hesaplanır (Şekil 3.8).

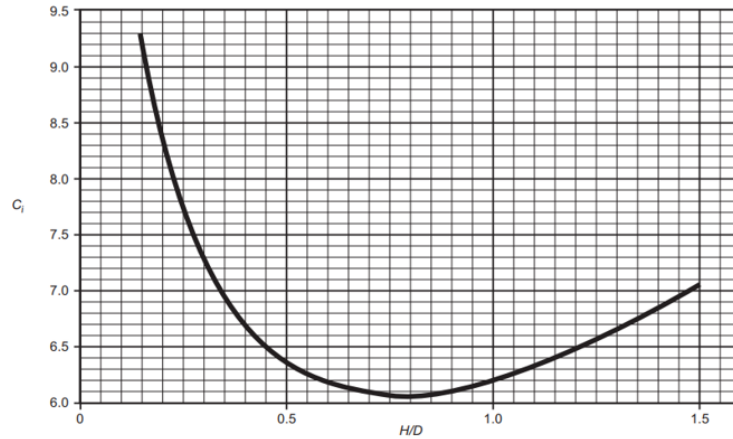


Şekil 3.8 Housner'ın Basitleştirilmiş Yay Modeli

Tanklar sismik etkiye maruz kaldıklarında, Housner'ında modelinde gözüktüğü üzere darbesel ve devrinimsel kuvvetler olarak iki şekilde olur. Darbesel kuvvetler tank içerisindeki sıvının bir bölümünün tank ile birlikte hareket etmesiyle oluşurken, devrinimsel kuvvetler tank içerisindeki sıvının üst kısmındaki çalkalanma hareketiyle oluşur. Tank tasarımında en önemli geometrik kriter H/D'dir. Hesaplamalar için gerekli katsayılar H/D oranı ile API650 kodlu tablolarda bulunabilir.

$$\frac{H}{D} = \frac{5,275}{5,72} = 0,92 \quad (3.5.1)$$

API 650 ye göre bütün hesaplamalardan önce sıvı yüksekliği ve çap oranına bakılır ve sonuç aşağıdaki grafiğe göre C_i katsayısı elde edilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 C_i Katsayısı grafiği (API650)

Bir yapının deprem gibi dinamik yükler altındaki performansını analiz edebilmek için öncelikle doğal titreşim davranışını anlamak gerekir.

Bir sıvı tankının darbesel periyodunu (T_i) hesaplamak için yönetmelikteki formül tank ile içerisindeki sıvının fiziksel ve mekanik özelliklerini bir araya getirerek oluşturulur. Formül, tankın duvar kalınlığı ve çapı oranı, sıvının yoğunluğu, doluluğu ve tank malzemesinin elastikiyeti gibi faktörleri dikkate alır ve bu özellikleri API650 belirli bir katsayısı ($1/\sqrt{2000}$) ile normalize eder.

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}} \right) \left(\frac{C_i H}{\sqrt{t_w}} \right) \left(\sqrt{\frac{\rho}{E}} \right) \quad (3.5.2)$$

Formülde en kritik bileşenlerden biri tank cidar kalınlığıdır (t_w), çünkü bu, tankın rijitliğini belirlemede temel rol oynamaktadır. Bunun yanında, sıvının yoğunluğu (ρ) ve sıvı yüksekliği (H) gibi faktörler, kütleli etkiler üzerinden sisteme esneklik katarak darbesel periyodu uzatmaktadır. Elastik modül (E) ve geometrik oran (t_w/D) ise tankın yapısal özellikleriyle ilişkilidir ve rijitlik üzerinde belirleyici etkilerde bulunmaktadır. Formül; karmaşık bir yapıya sahip ve geometrik faktörlerin etkileşimlerini ayrıntılı bir şekilde hesaba katmaktadır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Nurdağı'ndaki yağ tankının gerekli değerleri

C_i	H (m)	ρ (kg/m^3)	R (m)	E (Mpa)	t_w (mm)
6,22	5,275	910	2,86	2+E5	10

Darbesel periyotun hesabı;

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}} \right) \left(\frac{6,06 \times 5,275}{\sqrt{\frac{10}{5,72}}} \right) \left(\sqrt{\frac{910}{2e^5}} \right) = 0,04 \text{ s} \quad (3.5.3)$$

Devinimsel (Çalkalanma) Periyot (T_c) bir tank içerisindeki sıvının çalkalanma hareketinin bir tam döngüsünü tamamlaması için gereken süreyi ifade eder. Formül iki ana aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle tankın geometrik özelliklerini dikkate alarak çalkalanma periyoduna katkıda bulunan bir katsayı (K_s) aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68 \times H}{D}\right)}} \quad (3.5.4)$$

Tankın içerisindeki sıvı yüksekliği (H) ve çapı (D), çalkalanma periyodunu belirleyen önemli faktörlerdir. Formülde kullanılan hiperbolik tanjant (\tanh) fonksiyonu, sıvının hareketinin tank boyutlarına göre davranışını yansıtmaktadır. H/D oranı arttıkça, \tanh fonksiyonunun değeri büyümektedir ve 1'e yaklaşmaktadır. Bu durumda, formülde $\sqrt{\tanh}$ değeri artmaktadır ve $0,578/\sqrt{\tanh}$ ile tanımlanan K_s katsayısı azalmaktadır. Yani:

- H/D oranı küçük olduğunda, K_s daha büyük bir değer almaktadır.
- H/D oranı büyüdüğünde, K_s azalmaktadır.

Bu durum, K_s 'nin H/D oranına ters orantılı olarak değiştiğini ve çalkalanma periyodunu etkilediğini göstermektedir.

Devinimsel (Çalkalanma) Periyot (T_c)' un ikinci aşama formülü ise;

$$T_c = 1,8 \times K_s \sqrt{D} \quad (3.5.5)$$

Formül, tank çapının büyüklüğünün çalkalanma hareketine etkisini doğrusal olmayan bir şekilde hesaba katmaktadır. Tankın çapı, çalkalanma hareketinin doğal periyoduna doğrudan etki etmektedir. Çap büyüdükçe, sıvının hareket için daha geniş bir yol kat etmesi gerektiğinden periyot uzamaktadır. Daha geniş çaplı tanklarda, çalkalanma periyodu artmaktadır. Aynı zamanda K_s , tankın sıvı yüksekliği (H) ve çapı (D) arasındaki orana bağlı olduğundan, formül hem tankın geometrik hem de dinamik

özelliklerini etkili bir şekilde yansıtmaktadır. Bu, tank tasarımında ve sıvı hareketinin modellenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Nurdağı'ndaki yağ tankının K_s katsayısının hesabı;

$$K_s = \frac{0,578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3,68 \times 5,275}{5,72}\right)}} = 0,58 \quad (3.5.6)$$

Nurdağındaki yağ tankının Devinimsel (Çalkalanma) Periyot (T_c) katsayısının hesabı;

$$T_c = 1,8 \times 0,58_s \sqrt{5,72} = 2,49 s \quad (3.5.7)$$

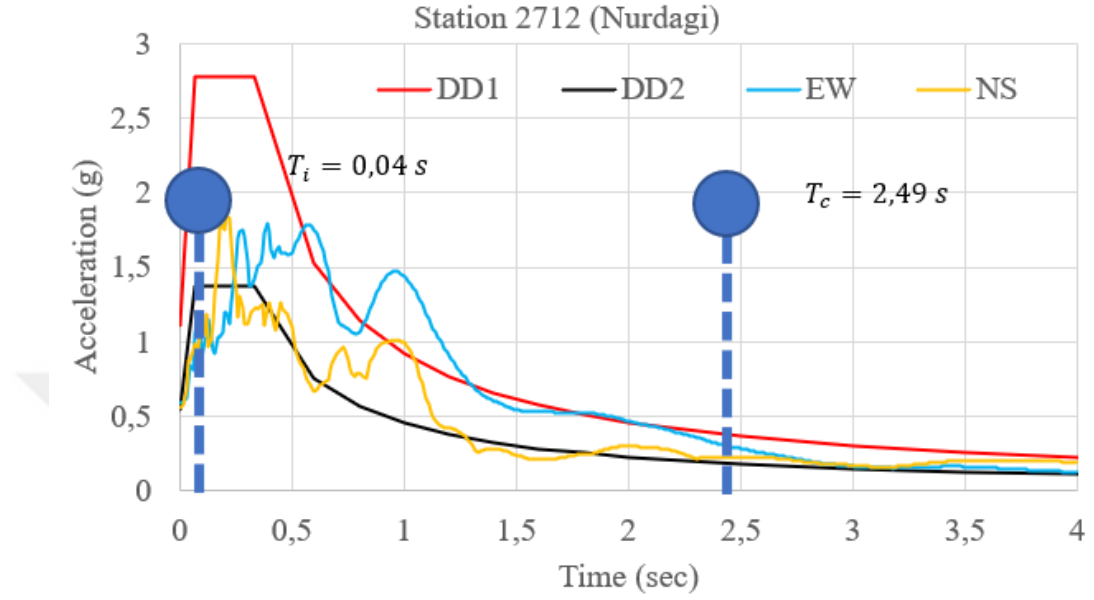
Depolama tankları için Türk kodu, API 650[17] ve NZSEE-2009 [54] tasarım kodlarının bir karışımıdır. Tankların performans kriterlerinin, maksimum dikkate alınan deprem (DD1) altında hasarı en aza indirmek için tasarım seviyesi deprem (DD2) ve arıza hiyerarşisi altında işlevsel kalması olduğu düşünülmektedir. Türk tasarım koduna [55] gelince, farklı performans hedeflerine sahip yer hareketi seviyeleri açısından üç farklı tasarım sınıfı vardır (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 Tank tasarım sınıfları

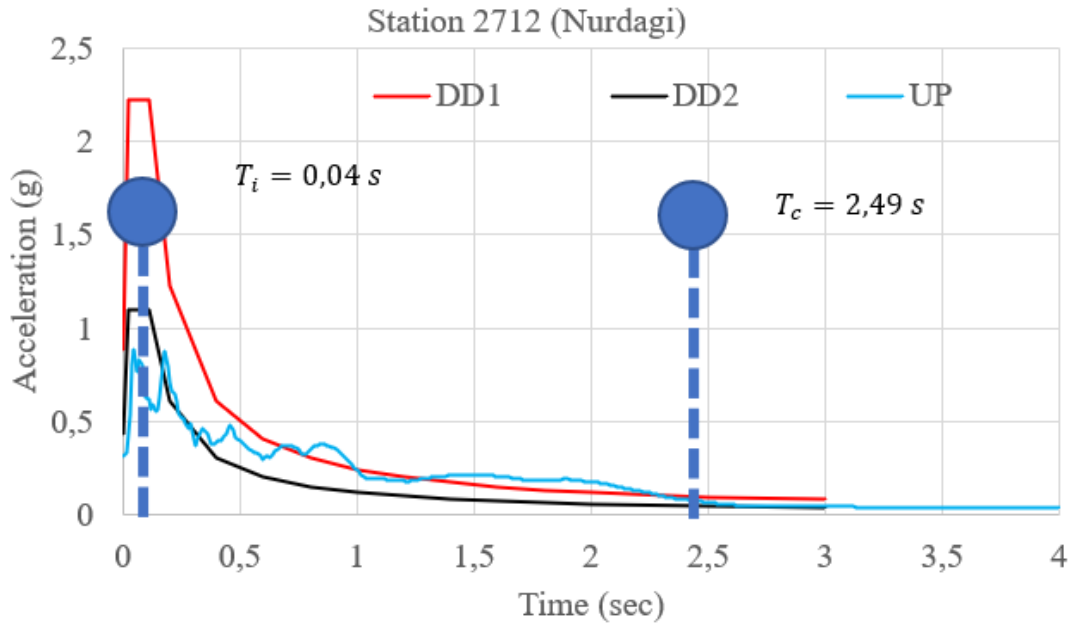
Tank Tasarım Sınıfı	Deprem Yer Hareketi Düzeyi		
	DD1	DD2	DD3
I	-		Kontrollü Hasar
II	-	Kontrollü Hasar	Kesintisiz Kullanım
III	Kontrollü Hasar	Kesintisiz Kullanım	-

İşletme emniyet limit durumu, ankraj ve boru bağlantılarında sızıntı, taşma ve hasar olmadığını gösterirken, hasar kontrolü yapısal stabilitenin korunması, gevrek arıza mekanizmalarının önlenmesi, sınırlı ankraj hasarları ve çökmenin önlenmesi için işaret eder. Depolama tankları için Türk yönetmeliği, esas olarak sünek ve gevrek arıza mekanizmalarının tanımları nedeniyle diğer yönetmeliklerden farklıdır. API650 ve NZ2009' da, elastoplastik (Fil ayağı) burkulma fenomeni sünek arıza olarak kabul edilirken, Türk yönetmeliğinde bu gevrek arıza olarak kabul edilir.

İstasyon 2712'den alınan kayıtlara bağlı yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de Kabul Edilen Maksimum Deprem (DD1) ve Tasarım Esaslı Deprem (DD2) spektrumlarına göre verilmiştir. Darbeli (T_i) ve konvektif (T_c) periyodu tankların bileşenleri de Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de çizilmiştir.



Şekil 3.10 Mw 7.7 Pazarcık Depreminin yatay spektrum tepkisi

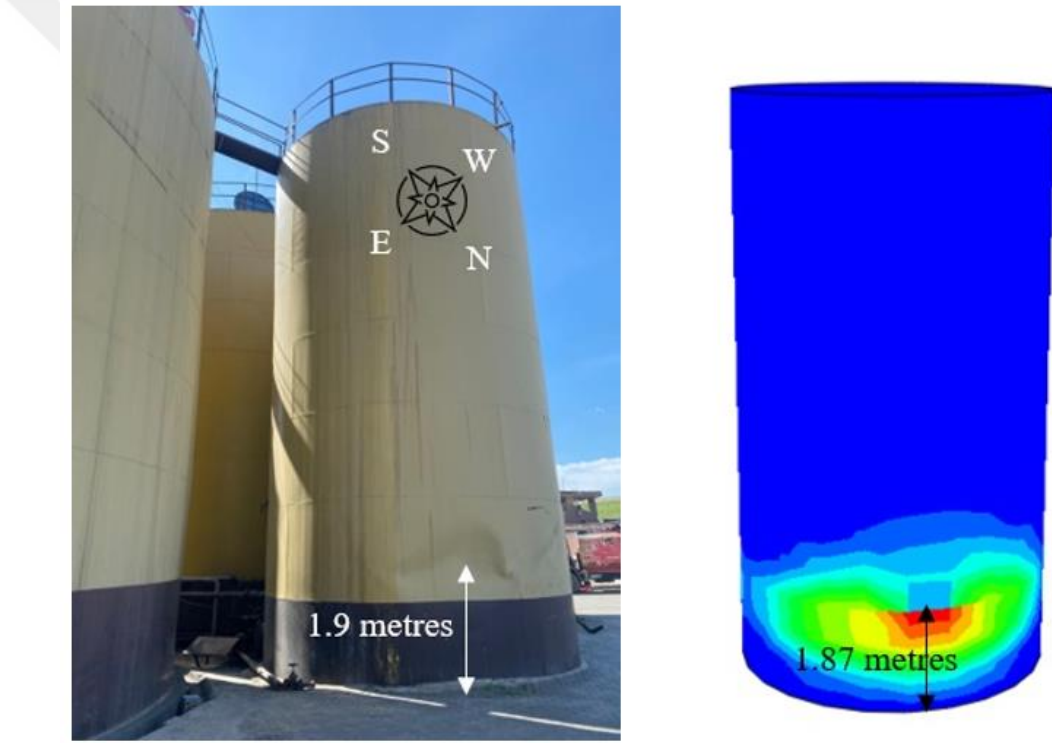


Şekil 3.11 Mw 7.7 Pazarcık Depreminin düşey spektrum tepkisi

4. BULGULAR

4.1. Analiz Sonuçları

Yağ tankıyla ilgili en dikkat çekici hasar, yerden yaklaşık 1,8 metre yükseklikte, NS yönünde meydana gelen burkulma hasarıydı (Şekil 4.1). Buna ek olarak, ankraj arızası nedeniyle alt plakanın plastisiteye uğraması ve tank tabanında kalıcı deformasyonlar da vardı (Şekil 4.1). İnce tank, taban plakasında sabit sınır koşuluyla sıkıştırıldığından, hidrodinamik kuvvetler, %50 doluluk oranı nedeniyle sadece yağ tankının alt yarısına etki etti. Ancak, etki eden kuvvetler devrilme momentinin altında sınırlı kaldı ve Şekil 4.1/'de görülebileceği gibi sadece lokal bir burkulma hasarına yol açtı.



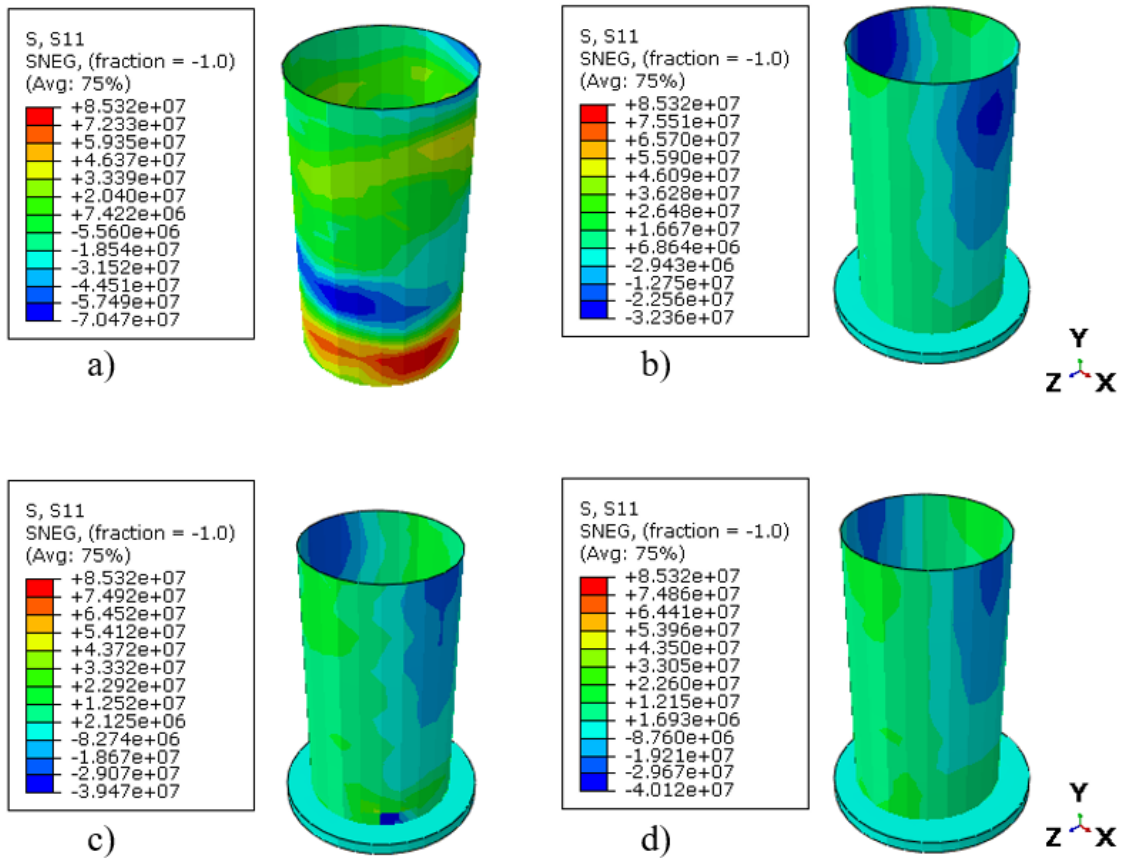
Şekil 4.1 Nurdagi'ndeki yağ tankı hasarı ve modeldeki hasar



Şekil 4.2 Tankın yükselmesi sonucu taban plakasında deformasyonlar ve betonun dökülmesi.

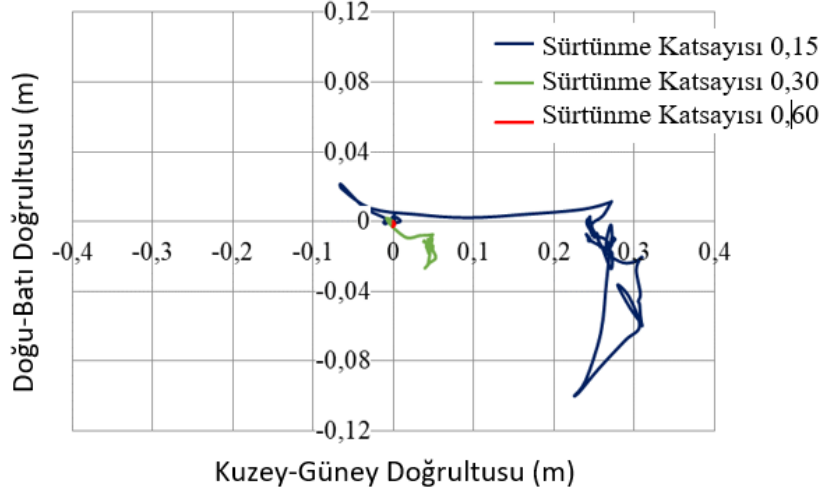
4.2. Tankın kayma tepkisi

Daha önce bahsedildiği gibi, ankrajsız tank cidarı gerilmelerini ve plastik deformasyonlarını ankrajlı yağ tankı ile karşılaştırmak için $\mu = 0.6, 0.3$ ve 0.15 değişen sürtünme katsayısı ile üç ek model oluşturulmuştur. Tüm modeller, malzeme ve doğrusal olmayan geometri dikkate alınarak yukarıda belirtildiği gibi aynı yükleme prosedürüne tabi tutulmuştur. Dikkat çekici bir şekilde, sabit durumda olduğu gibi tank duvarında lokal burkulma hasarı görülmemektedir (Şekil 4.3). Ayrıca, sürtünme katsayısı azaldıkça tank cidarı gerilmeleri de azalma eğiliminde olmuştur.



Şekil 4.3 Sürtünme katsayısının azalmasına bağlı olarak tank duvar gerilmelerinin azaltılması a) kendinden destekli ve ankrajsız tanklar; Sürtünme katsayısı; b) 0.6, c) 0.3 ve d) 0.15

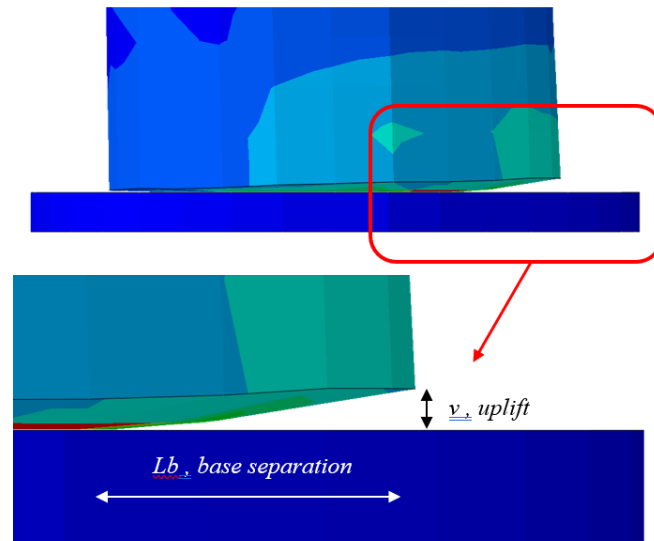
Kuzey-Güney ve Doğu-Batı yönleri boyunca yörüngesel yer değiştirmeler, değişen sürtünme katsayılarına sahip tüm ankrajsız tank modelleri için verilmiştir (Şekil 4.4). Sürtünme katsayısı $\mu = 0.15$ için maksimum yer değiştirmeler Kuzey-Güney ve Doğu-Batı yönleri boyunca sırasıyla 0,32 ve 0,22 metre olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4 Farklı sürtünme katsayıları μ için, demirlenmemiş tankın NS ve EW yönlerindeki parçacık yörüngeleri.

Sürtünme katsayısı $\mu = 0.3$ olduğunda, maksimum kalıcı yer değiştirmeler NS ve EW yönleri boyunca sırasıyla 5 cm ve 4 cm olmuştur. Yer değiştirmeler, vaka çalışmasında olduğu gibi sabit duruma en yakın senaryo olduğu için 0,6 katsayılı durum için sadece birkaç milimetre ile sınırlı kalmıştır.

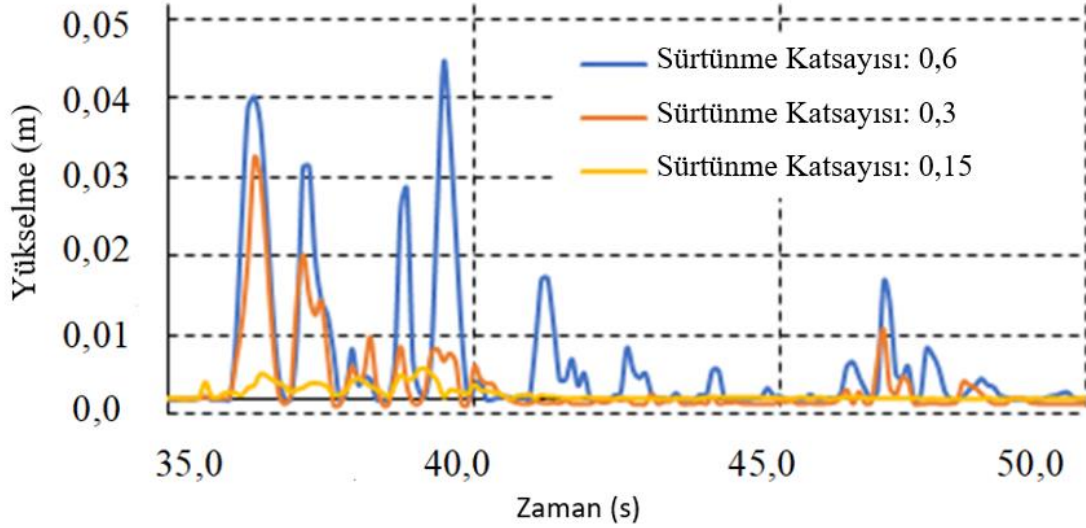
İlgili kılavuzlara göre (NZ2009) tanktan malzeme kaybını önlemek için tank tabanındaki plastik menteşenin dönüşü 0,20 radyan ile sınırlandırılmalıdır. Şekil 4.5'te, taban yükselmesi (v) ve taban ayrılması (Lb) nedeniyle hesaplanan taban dönmesinin 0,01 radyan mertebesinde olduğu görülebilir. Bu değer, belirtilen yükselme için gereken maksimum dönme ile karşılaştırıldığında (0,2 radyan) tank tabanının elastik davrandığı söylenebilir.



Şekil 4.5 Tankın yükselmesi

4.3. Tankın Yükselmesi (Uplift)

Son olarak, sürtünme katsayısı arttıkça tankın yükselme tepkisinin yanı sıra hasar formlarının da kayda değer miktarlarda değiştiği görülmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Tankın farklı sürtünme katsayılarına göre tank yükselmeleri

Yapılan saha gözlemleri ve analiz sonuçlarına dayanarak, yüksek şiddetli yer hareketlerinde ankajsız sıvı depolama tanklarının genel performansının yeterli olduğu söylenebilir. Bu tanklarda bazı yapısal hasarlar gözlemlenmiş olsa da, bu hasarlar kritik bir seviyeye ulaşmamıştır. Tank duvarında yerel deformasyonlar ve taban plakası üzerinde kalıcı yer değiştirmeler meydana gelmiş olsa da, taban plakası veya tank duvarında yırtılma gibi ciddi hasar türleri ya da sıvının taşması gibi felaket senaryoları oluşmamıştır.

5. TARTIŞMA

Bu tezde hedeflendiği gibi; özellikle taban kayması, tankın maruz kaldığı deprem yüklerinin üst yapıya olan etkisini azaltmış ve bu durum, yapının daha güvenli bir şekilde davranmasını sağlamıştır. Bununla birlikte kayma ve yükselme hareketlerinin kontrol edilmemesi durumunda tankın boru bağlantılarında hasarlar meydana gelmiştir. Bu tür hasarların esnek bağlantı elemanları kullanılarak önlenebileceği anlaşılmıştır.

Ankajsız tankların deprem tepkisini daha ayrıntılı olarak anlamak için yapılan vaka çalışmasında, farklı sürtünme katsayılarının etkileri araştırılmıştır. Düşük, orta ve yüksek sürtünme katsayılarının tankın kayma ve yükselme davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte tankın davranışının ve hasar biçimlerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Yüksek sürtünme katsayılarının kalıcı yer değiştirmeleri azalttığı ancak taban yükselmesini artırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, taban yükselmesinin tüm durumlarda ilgili standartlarda belirtilen kabul edilebilir sınırların altında kaldığı tespit edilmiştir.

Simülasyon sonuçları ile gözlemlenen hasar arasındaki en iyi uyum, sürtünme katsayısının 0.6 olduğu durumda elde edilmiştir. Bu değer için hesaplanan bağıl yer değiştirme ihmal edilebilir düzeyde olmuştur. Bu da, bu sürtünme katsayısının ankajsız tanklar için optimum tasarım parametresi olabileceğini düşündürmektedir.

Ayrıca, depremin dikey bileşeninin tank tepkisi üzerindeki kritik etkisi de yapılan çalışmalarda belirgin bir şekilde görülmüştür. Dikey yer hareketi dikkate alınmadığında, tank üzerindeki çevresel gerilmeler ve meydana gelen hasar biçimleri tam olarak modellenememiştir. Bu durum, ankajsız tankların karmaşık dinamik davranışlarının daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle, bu tür tankların doğrusal olmayan 3 boyutlu modellerle analiz edilmesi, tankın tepkisini ve hasar öngörülerini daha doğru bir şekilde ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, ankajsız sıvı depolama tanklarının güvenli tasarımı için hem yatay hem de dikey deprem bileşenlerinin dikkate alınması gerektiği açıkça görülmektedir. Ayrıca, tank tabanının kayma ve yükselme davranışlarının olumlu etkileri ile boru bağlantılarındaki olası zararların dengelenmesi için esnek bağlantı sistemlerinin kullanılması önerilmektedir. Bu tür detaylar, yalnızca tankın güvenliğini değil, aynı zamanda tankın hizmet ömrü boyunca işlevselliğini de koruyacaktır.

Bu çalışmalardan çıkabilecek sonuçlardan bahsetmek gerekirse; doğrusal olmayan sismik yükler altında elik tanklarında meydana gelen hasarların minimize edilebilmesi için tankların genel davranışını sınırlandırabilmek ve içerisinde ihtiva edilen sıvıyı barındırmaya devam etmesi ve ikincil bir afet yaratmasına engel olabilmek için gerekli hesaplamalar ışığında en optimum tedbirlerin alınmasıdır.

Bu alışma sonucunda tankların tasarımında sadece yatay elastik tasarım spektrumlarının değil hem yatay hem düşey elastik tasarım spektrumlarının birlikte göz önünde tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Tankların daha az hasarla sismik etkiyi atlattması için yatayda serbest (tank ve temelinde sürtünmenin en düşük olduğu) bırakıldığı takdirde tank duvarlarındaki gerilmelerin azalması ve çalkalanmanın düşük olması sebebiyle en iyi nlem olarak gözükmektedir; ancak bu seferde tanklarda bulunan bağlantı elemanlarının büyük hasarlar gördüğü bilinmektedir.

Bu bağlamda tankların bağlantı elemanlarının esnek ve hareketi üstlenebilecek malzemelerden tasarlanması gerekmektedir. Tankların deprem performanslarını en optimum düzeyde tutabilmek hem içerisindeki sıvıyı ihtiva etmeye ve fonksiyonuna devam edebilmesini sağlamak hem de ikincil afetlerin önüne geçebilmek için çok önemlidir.

Bu çalışmadan çıkarttığımız sonuç bağlamında ve gelecek çalışmalara fikir olması bakımından günümüz teknolojileri kullanarak depolama tanklarının güvenliğini sağlamak üzere sürdürülebilir, ekonomik güçlendirmeler tasarlanabilir. Örneğin; gelişmiş nano teknoloji malzemeler ile kaplamalar yapılması, doluluk oranlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilen izolatör imkanları, gerçek zamanlı veri sağlayan akıllı sistemlerin geliştirilmesi gibi ileri teknoloji ürünleri tasarlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] H. Sezen and A. S. Whittaker, "Seismic performance of industrial facilities affected by the 1999 Turkey earthquake," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 20, no. 1, pp. 28–36, 2006.
- [2] M. Erdik, Report on 1999 Kocaeli and Düzce Earthquakes. Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, İstanbul, 2000.
- [3] L. S. Jacobsen, "Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of a fluid surrounding a cylindrical pier," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 39, pp. 189–204, 1949.
- [4] E. W. Graham and A. M. Rodriguez, "The characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics," *J. Appl. Mech.*, vol. 19, pp. 381–388, 1952.
- [5] G. Housner, "The dynamic behavior of water tanks," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 53, pp. 381–387, 1963.
- [6] G. Housner, "Dynamic pressure on accelerated fluid containers" *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 47, pp. 15–35, 1957.
- [7] D. C. Barton and J. V. Parker, "Finite element analysis of the seismic response of anchored and unanchored liquid storage tanks," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 15, pp. 299–322, 1987.
- [8] A. S. Veletsos and J. Y. Yang, "Dynamics of fixed base liquid storage tanks," in *Proc. U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems*, Tokyo, Japan, 1976, pp. 317–341.
- [9] R. D. Hanson, "Behavior of liquid storage tanks," Report, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 331–339, 1973.
- [10] A. S. Veletsos, "Seismic effects in flexible liquid storage tanks," in *Proc. 5th World Conf. Earthq. Eng.*, Rome, Italy, 1974, vol. 1, pp. 630–639.
- [11] Veletsos, A.S., and Yang, J.Y., "Dynamics of Fixed Base Liquid Storage Tanks," *Proceedings of U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems*, Japan Society for Promotion of Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 1976, pp. 317-341.
- [12] Haroun, M.A., "Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks," *Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No. EERL 80-4*, California Institute of Technology, 1980.
- [13] Haroun, M.A., "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 11, 1983, pp. 179–206.
- [14] Haroun, M.A., and Abdel-Hafiz, E.A., "A Simplified Seismic Analysis of Rigid Base Liquid Storage Tanks Under Vertical Excitations with Soil-Structure Interaction," *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 5, 1986, pp. 217-225.
- [15] Haroun, M.A., Mourad, S.A., and Pence, P.W., "Vibration Suppression through Liquid Oscillations," *Proceedings of the Engineering Mechanics Specialty Conference*, ASCE, Ohio, 1991, pp. 656-660.
- [16] Haroun, M.A., and Abou-Izzeddine, W., "Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction. 1. Horizontal Excitation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 118, 1992, pp. 783-797.

- [17] Haroun, M.A., and Tayel, M.A., "Response of Tanks to Vertical Seismic Excitations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 13, 1985, pp. 583–595.
- [18] Zhou, M., Zheng, S., and Zhang, W., "Study on Elephant-Foot Buckling of Broad Liquid Storage Tanks by Nonlinear Theory of Shells," *Journal of Computers and Structures*, vol. 44, 1992, pp. 783-788.
- [19] Veletsos, A.S., and Shivakumar, P., "Sloshing Response of Layered Liquids in Rigid Tanks," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 22, 1993, pp. 801-821.
- [20] Cho, J.R., Song, J.M., and Lee, J.K., "Finite Element Techniques for Free Vibration and Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks," *Finite Elements in Analysis and Design*, Elsevier Science, vol. 37, 2001, pp. 467-483.
- [21] Nachtigall, I., Gebbeken, N., and Urritia-Galicia, J.L., "On the Analysis of Vertical Circular Cylindrical Tanks under Earthquake Excitation at Its Base," *Engineering Structures*, Elsevier Science, vol. 25, 2003, pp. 201-213.
- [22] Malhotra, P.K., and Veletsos, A.S., "Beam Model for Base-Uplifting Analysis of Cylindrical Tanks," *Journal of Structural Division, ASCE*, vol. 120, 1994, pp. 3471-3488.
- [23] Malhotra, P.K., and Veletsos, A.S., "Uplifting Analysis of Base Plates in Cylindrical Tanks," *Journal of Structural Division, ASCE*, vol. 120, 1994, pp. 3489-3505.
- [24] Malhotra, P.K., "Method for Seismic Base Isolation of Liquid Storage Tanks," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, vol. 123, 1997, pp. 113-116.
- [25] Malhotra, P.K., "New Method for Seismic Isolation of Liquid Storage Tanks," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, vol. 26, 1997, pp. 839-847.
- [26] Malhotra, P.K., Wenk, T., and Wieland, M., "Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks," *Structural Engineering International*, vol. 3, 2000, pp. 197-201.
- [27] Shriali, M.K., and Jangid, R.S., "Non-linear Seismic Response of Base Isolated Liquid Storage Tanks to Bi-Directional Excitation," *Nuclear Engineering and Design*, Elsevier Science, vol. 217, 2002, pp. 1-20.
- [28] Shriali, M.K., and Jangid, R.S., "Earthquake Response of Liquid Storage Tanks with Sliding Systems," *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, vol. 4, no. 2&3, 2002, Summer and Fall.
- [29] Shriali, M.K., and Jangid, R.S., "Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks," *Journal of Vibration and Control*, vol. 9, 2003, pp. 1201–1218.
- [30] Bakalis, K., and Karamanos, S.A., "Uplift Mechanics of Unanchored Liquid Storage Tanks Subjected to Lateral Earthquake Loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 158, 2021, p. 107145.
- [31] Zareian, F., et al., "Reconnaissance Report of Chilean Industrial Facilities Affected by the 2010 Chile Offshore Bío-Bío Earthquake," *Earthquake Spectra*, vol. 28, suppl. 1, 2012, pp. 513-532.
- [32] Hatayama, K., "Damage to Oil Storage Tanks from the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Tsunami," *Earthquake Spectra*, vol. 31, no. 2, 2015, pp. 1103-1124.
- [33] Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts, Feb. 6, 2023. May 6, 2023.
- [34] D. P. Clough, *Experimental Evaluation of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks*. Berkeley, CA: Univ. of California, 1977.

- [35] R. W. Clough and A. Niwa, "Static tilt test of a tall cylindrical liquid storage tank," NASA STI/Recon Tech. Rep. N, vol. 80, 1979, p. 16255.
- [36] R. Peek and P. C. Jennings, "Simplified analysis of unanchored tanks," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 16, no. 7, pp. 1073–1085, 1988.
- [37] D. Hernandez-Hernandez, T. Larkin, and N. Chouw, "Shake table investigation of nonlinear soil–structure–fluid interaction of a thin-walled storage tank under earthquake load," *Thin-Walled Structures*, vol. 167, p. 108143, 2021.
- [38] M. Ormeño, T. Larkin, and N. Chouw, "The effect of seismic uplift on the shell stresses of liquid-storage tanks," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 44, no. 12, pp. 1979–1996, 2015.
- [39] P. K. Malhotra and A. S. Veletsos, "Uplifting response of unanchored liquid-storage tanks," *Journal of Structural Engineering*, vol. 120, no. 12, pp. 3525–3547, 1994.
- [40] M. Vathi and S. A. Karamanos, "A simple and efficient model for seismic response and low-cycle fatigue assessment of uplifting liquid storage tanks," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 53, pp. 29–44, 2018.
- [41] K. Bakalis and S. A. Karamanos, "Uplift mechanics of unanchored liquid storage tanks subjected to lateral earthquake loading," *Thin-Walled Structures*, vol. 158, p. 107145, 2021.
- [42] A. Niwa and R. W. Clough, "Buckling of cylindrical liquid storage tanks under earthquake loading," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 00, no. 00, pp. 1–12, 1982.
- [43] R. Nielsen and A. S. Kremidjian, "Damage to oil refineries from major earthquakes," *Journal of Structural Engineering*, vol. 112, pp. 1481–1491, 1986.
- [44] *Abaqus Users Manual, Version 6.14-1*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
- [45] H. Huang et al., "Dynamic responses of steel cylindrical tanks subjected to sequential loadings of earthquake and explosion," *Engineering Failure Analysis*, vol. 143, p. 106920, 2023.
- [46] Z. Ozdemir, M. Souli, and Y. M. Fahjan, "Application of nonlinear fluid–structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks," *Engineering Structures*, vol. 32, no. 2, pp. 409–423, 2010.
- [47] A. Rawat et al., "Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic-structural and Euler-Lagrange methods," *Thin-Walled Structures*, vol. 134, pp. 333–346, 2019.
- [48] J. D. Tippmann, S. C. Prasad, and P. N. Shah, "2-D tank sloshing using the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) capability of Abaqus/Explicit," *Proc. SIMULIA Customer Conf.*, London, England, 2009.
- [49] Y. Shoji and H. Munakata, "Sloshing of cylindrical tank due to seismic acceleration," *Abaqus Users Conf.*, Newport, RI, 2008.
- [50] Y. Liu, L. Han, H. Zhao, and X. Liu, "Numerical modelling and experimental investigation of the Riv-Bonding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 288, p. 116914, 2021.

- [51] S. Ishikawa and H. Aihara, “Modelling of self-piercing riveting with ale, cel and sph based on abaqus/explicit,” in Proc. XIV Int. Conf. Computational Plasticity: Fundamentals and Applications (COMPLAS XIV), 2017, pp. 682–691.
- [52] AFAD, “Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı,” [Online]. Available: <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/17966>.
- [53] American Petroleum Institute, Seismic Design of Storage Tanks, Welded Steel Tanks for Oil Storage, 11th ed., API 650, Washington, D.C., 2007.
- [54] NZSEE, Seismic Design of Storage Tanks: Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 2009.
- [55] Türkiye Boru Hattı Sistemleri ve Sıvı Depolama Tankları Deprem Yönetmeliği, 2022.
- [56] A. C. Saka, E. S. Kaya, and E. Uckan, “Seismic performance of cylindrical liquid storage tanks in the 2023 Kahramanmaraş earthquakes: A case study of a self-supported oil storage tank,” Journal of Earthquake Engineering, vol. 00, no. 00, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1080/13632469.2024.2390083.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Ahmet Cenk SAKA

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

Eğitim Geçmişi

- 2013, İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- 2023, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yayımları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- A. C. Saka, E. S. Kaya, and E. Uckan, “Seismic Performance of Cylindrical Liquid Storage Tanks in the 2023 Kahramanmaraş Earthquakes: A Case Study of a Self-Supported Oil Storage Tank,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1080/13632469.2024.2390083.

Yabancı Dil Bilgisi:

- İngilizce
- Almanca