

**Sismik Yükleme Altında Silindirik Çelik Su Tanklarının Gerilme ve Burkulma Analizi**

**Stress and Buckling Analysis of Cylindrical Steel Water Tanks under Seismic Loading**

<sup>1</sup>Ali İhsan ÇELİK, <sup>2</sup>Tahir AKGÜL, <sup>3</sup>Ahmet Celal APAY, <sup>4</sup>Adem YURTSEVER

\*<sup>1</sup>Besni Meslek Yüksekokulu, Adıyaman Üniversitesi

<sup>2,3</sup>Teknoloji Fak., İnşaat müh., Sakarya Üniversitesi

<sup>4</sup> Mühendislik Fak., İnşaat müh., Hasan Kalyoncu Üniversitesi

Geliş Tarihi : 05.07.2018

Kabul Tarihi : 07.08.2018

**ÖZET**

Sıvı depolamak amacıyla kullanılan çelik tanklar arasında en yaygın olanı, silindirik çelik sıvı depolama tanklarıdır. Deprem esnasında bu tanklarda oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda, sıvı depolama tanklarının depremlerde oldukça kötü performans gösterdikleri ve deprem dayanımlarının artırılması için yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sıvı-yapı etkileşimini içeren tankların sismik analizi karmaşık bir problemdir. Karmaşıklığın temelinde tankın ince bir cidara sahip olması, cidarın aksenal ve çevresel esnemelerinin ve çalkalanan sıvının modlarının çoklu dinamik tepkilerinin olması, içerdiği sıvının ve titreşen cidarın doğrusal olmayan bir davranışa sahip olması ve tank cidarının burkulma şekil değiştirme modalına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Tank-sıvı etkileşim sistemlerinin gerçek davranışlarının kısa sürede incelenmesi için en iyi yöntemlerden biride sonlu elemanlar metodudur. Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak, sismik yükleme altındaki silindirik çelik sıvı tanklarda meydana gelen gerilmeler ve bu gerilmelere bağlı olarak meydana gelen burkulmalar incelenmektedir. Üstü-açık, konik-kapalı ve kubbe şeklinde kapatılmış tanklar için 4mm, 6mm ve 8mm'lik üç farklı cidar kalınlıklarında yapılan sismik analiz sonucunda, eşdeğer gerilmelerin düşürülmesi ve burkulmaların azaltılması için en iyi tank kapak tasarımı belirlenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Silindirik çelik tanklarda gerilme, silindirik çelik tankların burkulması

**ABSTRACT**

The most common tanks are cylindrical steel liquid storage tanks among the steel tanks used to store liquid. In studies conducted to determine the type of damage that occurred in these tanks during the earthquake and the factors that caused these damages, it was revealed that liquid storage tanks performed poorly in earthquakes and requirement of new methods were developed to increase earthquake resistance. Seismic analysis of tanks containing liquid-structure interaction is a complex problem. At the basis of the complexity is the fact that the tank has a thin wall, the multidynamic responses of the axial and circumferential curves of the walls and the modes of agitated liquid, the non-linear behavior of the liquid and vibrating wall it contains and the buckling and deforming modes of the tank wall. One of the best methods for examining the real behavior of tank-liquid interaction systems in a short time is the finite element method. In this study, using the finite element method (FEM), stresses occurring in cylindrical steel liquid tanks under seismic loading and buckling due to these stresses are investigated. Seismic analysis was carried out on three different wall thicknesses of 4mm, 6mm and 8mm for the top-open, conical-closed and dome-closed tanks, and it was tried to determine the best tank lid transport to reduce equivalent stresses and reduce buckling.

**Keywords:** Stress in cylindrical steel tanks, buckling of cylindrical steel tanks

## 1. GİRİŞ

Silindirik çelik tankları su, kimyasal sıvılar ve petrol ürünleri gibi yanıcı ve tehlikeli maddeleri depolamak amacıyla kullanıldığı gibi, son yıllarda dünyada yaygınlaşan ve Türkiye’de kurulma aşamasında olan nükleer enerji santrallerinde soğutma amacıyla kullanılmaktadırlar. Geçmişte meydana gelen depremlerde bu tankların şiddetli deprem yüklemesine karşı zayıf oldukları ve içerdikleri yanıcı ve zehirli sıvılardan dolayı kontrolsüz ve yıkıcı zararlara sebep oldukları bilinmektedir. Sıvı ihtiva eden silindirik çelik tankları, hidrostatik sıvı basıncının yanı sıra, deprem yer hareketine bağlı olarak hidrodinamik sıvı basıncına maruz kalırlar. İnce cidarlı bir yapıya sahip olan bu tanklar, sıvı yapı etkileşimine bağlı olarak farklı basınçlara maruz kaldıklarından dolayı sismik analizi çok karmaşıktır. Bu karmaşıklıktan dolayı araştırmacıların ilgisini çok çekmekte ve yapılan her çalışma, bu tankların sismik performansının artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Silindirik çelik sıvı depolama tankları ile ilgili ilk çalışmalar; Cooper ve Wachholz [1], Long Beach (1933), Alaska (1964), San Fernando (1971), Imperial Valley (1979), Loma Prieta (1989), Landers (1992), Northridge (1994) ve Kobe (1995) depremleri nedeniyle, petrol içeren çelik sıvı tanklarının hasar durumları üzerine yapılmıştır. Veletsos ve Yang(1977) [2], Haroun ve Housner(1981) [3] hidrodinamik akışkan yapı etkileşiminin sismik tepki üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Zamanla diğer araştırmacılar, yer destekli izole edilmiş tankların sismik tepkisine yönelik araştırmalar yapmış ve izole edilmiş yapının hidrodinamik basınçlar sergilediğini göstermişlerdir [4-7].

Virella ve arkadaşları yatay deprem uyarımına bağlı olarak, ankrajlı silindirik çelik sıvı tanklarının dinamik burkulmalarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, silindirik tank duvarının üst tarafındaki burkulmanın, deprem uyarımından kaynaklanan impulsif (rijit) hidrodinamik basıncın hidrostatik basıncı aştığı alanda negatif (içeri doğru) basınç sergilediğini tespit etmişlerdir [8]. Şekil 1’ de silindirik tankın üst tarafında meydana gelmiş deprem hasarı görülmektedir.



Şekil 1. Silindirik çelik tankın deprem hasarı

Ülkemizde 1999’da meydana gelen Kocaeli depremleri esnasında sıvı depolama tankları, büyük darbelere maruz kaldı. İzmit-Tüpraş rafinerisindeki petrol depolama tanklarında ağır hasarlar ve göçmeler meydana geldi. Bu hasarların sonucu olarak ortaya çıkan yangınlar, ağır maddi kayıplara sebep olmuştur ve bölgede güvenlik tehlikesi oluşmuştur.

Bu tanklarda, normal yapılardan farklı olarak içerdikleri sıvının özelliği ve çalkalanmaya 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. Meydana gelen farklı hasar ve göçme türlerinden dolayı silindirik çelik sıvı tanklarının sismik analizi ilgi çekmektedir. Sahadaki araştırmacılar, silindirik çelik tankların sismik yükler altındaki dinamik burkulmaya karşı davranışları ile ilgili karmaşıklıkları vurgulamak için çeşitli analitik, deneysel ve sayısal simülasyon çalışmaları yapmışlardır.

Jacobsen (1949), Graham ve Rodriguez (1952) ve Housner (1957) gibi bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar, sıvı depolama tanklarının sismik analizi tankın rijit olması ve içerdikleri dinamik basınçlar ile ilgili olmuştur. Daha sonra, 1964 büyük ölçekli Alaska depreminde modern tasarım tanklarının büyük zarar görmesi ile (Hanson, 1973) derinden etkilenmiş ve esnek tankların titreşimsel özelliklerini araştırmaya karar vermiştir [9-12].

1963, Housner ve 1980 ve 1983'te, Haroun, tankların sismik analizinde bir sınır integral teorisi kullanmıştır. Bu yaklaşım, problemde bilinmeyenlerin sayısını önemli ölçüde azaltmıştır. Haroun'un daha sonraki analizleri daha karmaşık etkiler içeriyordu. (Haroun ve arkadaşları). 1985, 1986, 1992), çalışmaları, esnek tankların dinamik tepkilerinin çevresel bozulma üzerindeki etkileri, başlangıç çevresel stresinin  $\cos\theta$ -tipi modları ve toprak-yapı-sıvı etkileşimi üzerindeki etkisini içerir [13-18].

Sıvı depolama tankları ile ilgili Grilli ve arkadaşları (1988), Huang ve arkadaşları (1988), Kondo ve arkadaşları (1990) ve Gedikli (1996) gibi bazı araştırmacılar sınır eleman yöntemi ile sonlu elemanlar yöntemini kombine ederek problemi çözmeye çalışmışlar. Gedikli (1996), ayrıca silindirik sıvı depolama tanklarının dinamik özelliklerini rijit bölmeler ile araştırmıştır. Hwang ve Ting (1989), hidrodinamik basınçlar ve sıvının yüzey alandaki dalga etkilerini belirlemek için sınır eleman metodunu kullanmıştır [18-23].

Depreme karşı yapı tasarımı ilkeleri, iki parametrenin anlaşılmasını gerektirir. Bu parametreler deprem kuvvetinin özellikleri ve yapının dinamik özellikleridir. Silindirik çelik sıvı tankları, kapak basıncından, yatay deprem yüklerinden ve depolanan sıvının duvarlarda sürtünmesinden kaynaklanan eksenel basınç ile birlikte depolanmış sıvının hidrostatik basıncına maruz kalan ince cidarlı yapılarıdır. Sismik yükleme altında, duvarlardaki eksenel gerilmelerden dolayı devrilme momenti meydana gelir [24]. Depremin karmaşık ve öngörülemez davranışları, her depremin meydana gelmesinden sonra yeni olgular elde edilmesine neden olmuştur [25].

## 1.1 SİLİNDİRİK ÇELİK TANKLARINA MEYDANA GELEN BURKULMALAR

Son depremler sırasında çelik silindirik sıvı depolama tanklarının hasara ve çökmeye karşı performanslarının zayıf olduğu görülüyor. Tankların karmaşık deformasyon konfigürasyonları ve akışkan-yapı arasındaki etkileşim, çeşitli bozulma ve çökmelere yol açabilmektedir. Deprem esnasında sıvı depolama tanklarında sıklıkla görülen bazı bozulmalar aşağıda listelenmiştir [26].

- Fil ayağı burkulması
- Elmas şekil burkulması
- Tank tavanının çökmesi
- Bağlantı hasarı
- Elastik burkulma (tankın üst tarafında)
- Tankın kayması
- Tankın temele oturması

Bunlardan bazılarının oluş sebebi ayrı başlıklar altında ayrıntılı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.

### 1.1.1 FİL AYAĞI BURKULMASI

En yaygın hasar türlerinden birisi fil ayağı burkulmasıdır. Yapı kabuğa gelen kritik yükü taşıyamayarak akmaya başlayacak ve elastik burkulma sınırlarını aşarak tabanda fil ayağı şeklinde Şekil 2 deki gibi plastik deformasyona sebep olacaktır. Bu aslında depreme dayanıklı yapılarda istenen sünek davranışa modeldir. Yapı önce sünek davranır daha sonra burkulma meydana gelir [27].



Şekil 2. Fil ayağı burkulması

### 1.1.2 ELMAS ŞEKLİ BURKULMASI

Elmas şekilli burkulma Şekil 3 de görüldüğü gibi daha çok silindirik çelik tankın tabanına doğru meydana gelir. Genellikle elastik basınç gerilmelerinden dolayı ince cidarlı paslanmaz çeliklerden imal edilmiş tanklarda meydana gelir. Bu tür burkulmalar çalkalanmaya bağlı olarak tankın üst taraflarında da meydana gelebilir.



Şekil 3. Elmas şekli burkulması

### 1.1.3 ÇATI HASARI

Çatı hasarları genellikle çalkalanma etkisinden kaynaklanır. Bu tür bir hasarın önemli, sonucu olarak sıvının dökülebilmesi ve böylece depoda bir kayıp oluşması ve depolanan sıvının türüne bağlı olarak yangının meydana gelebilmesidir. Şekil 4 de Tüpraş ta deprem sonraki meydana gelen hasarlar görülmektedir.

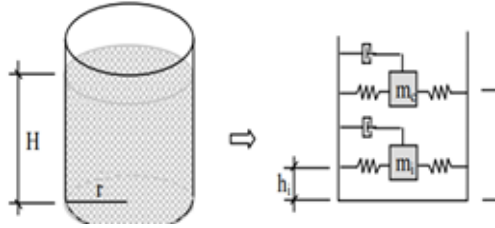


Şekil 4. Tüpraş rafinerisinde meydana gelen yangın hasarı(Erdik, 2000)

Sayısal Elemanlar Metodu (FEM), sayısal modelleme teknikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. FEM, karmaşık yapı problemlerini çözmeye avantajlara sahiptir. Bu makalede öncelikli olarak bazı temel sismik değerler API 650 standardı ile hesaplanmıştır, daha sonra El-Centro deprem yük değerleri kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Silindirik çelik tankları ile ilgili olarak, depremlerde maruz kaldıkları hasar türlerinin belirlenmesi, sismik performanslarının artırılması için binalarda uygulanan sismik izolasyon metodu uygulaması yanı sıra uzun ve kısa tankların sismik davranışlarının belirlenmesi gibi birçok çalışma yapılmıştır. Fakat standart ve standart dışı tank kalınlığına bağlı olarak üstü açık, üstü-konik ve kubbeli olan tank modellerinin sismik analiz sonuçlarını karşılaştırması bulunmamaktadır. Bu çalışma sonucunda, en düşük eşdeğer gerilmenin belirlenmesi ve gerilmeye bağlı olarak meydana gelen burkulmaların azaltılması için en uygun tank kapak şekli belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. SİLİNDİRİK ÇELİK SIVI TANKLARININ DİNAMİK DAVRANIŞI

Silindirik çelik sıvı tanklarının içindeki suyun hidrodinamik etkisini impulsif ve konvektif olmak üzere iki ayrı kütle halinde ilk defa Housner (1957) modelledi. Housner'in yay kütle modeline göre rijit temeller üzerinde duran çelik tanklarda sıvının bir kısmı, uzun süreli konvektif (çalkalanma) modunda hareket ederken, geriye kalan kısmı tank duvarı ile birlikte impulsif (rijit) hareket etmektedir[10]. Daha sonra Kim [28] tarafından deneysel olarak ve Malhotra tarafından da [29] nümerik olarak gösterilen modelde, dinamik davranışın sadece impulsif ve konvektif kütlelerin 1. mod davranışlarının göz önünde bulundurulmasının yeterli olacağı belirtilmiştir. Sürekli sıvı kütlelerinin tankla birlikte hareket eden impulsif kütle ve tankın üst tarafında tank ile ters yönde çalkalanma hareketinden elde edilen konvektif kütle gösteren tek serbestlik dereceli model Şekil 5'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Silindirik çelik sıvı tankının dinamik modeli.

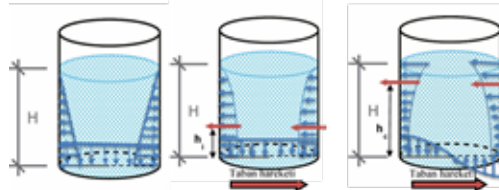
Sıvı tanklarının depremlerde hasar görmelerinin başlıca nedenlerinden biri rezonans olgusudur. Büyük kapasiteli silindirik çelik sıvı tanklarının titreşim periyotları genellikle 0,10s ile 0,50s arasında değişmektedir [9]. Bu periyot aralığı aynı zamanda kuvvetli yer hareketlerinin maksimum enerjiyi içerdiği periyot aralığına denk gelmektedir. Çelik sıvı tanklarının depremde hasar görmelerinin bir başka nedeni de, büyük miktarlardaki sismik enerjiyi sönmüleyecek bir süneklik mekanizmasına sahip olmamalarıdır [30]. Diğer modellere göre daha iyi bir sismik performansa sahip olduklarından ve tasarımlarının diğer modellere göre nispeten daha kolay olmasından dolayı silindirik çelik sıvı tankları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapıların depremlerde hasar görmemeleri için, yüksek deprem enerjisini sönmüleyebilecek bir süneklik mekanizmasına sahip olmaları gerekir.

### 2.1. SİLİNDİRİK ÇELİK SU TANKI TEORİSİ

Hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkisi altındaki silindirik çelik su tanklarının tasarım teorisi aşağıda özetlenmiştir.

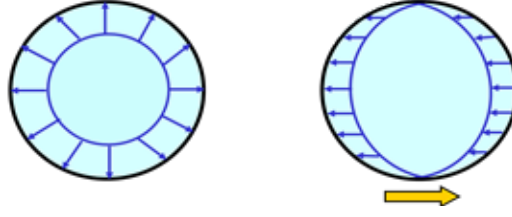
Hidrostatik sıvı basıncı, sıvı derinliği ile doğrusal olarak değişir ve tankın yüzeyine normal davranır. Sıvının üstünden herhangi bir noktaya olan yüksekliğe ve yoğunluğa bağlı olarak hidrostatik basınç  $= \gamma h$  ile basit bir şekilde hesaplanabilir. Şekil 6 (a) da görüldüğü gibi hidrostatik basınç duvar boyunca tabana doğru doğrusal artan bir şekilde sahiptir. Yerel zemin hareketine bağlı olarak Şekilde 6 (b) de görüldüğü gibi impulsif hidrodinamik basınç ve Şekilde 6 (c) 'deki konvektif sıvı basıncı meydana gelmektedir. Hidrodinamik basınç ve kuvvet prosedürü Housner'in (1963) klasik çalışmasına dayanmaktadır.

Housner'in çalışmasına göre ivmeli yer hareketine maruz kalan bir tankın alt kısmındaki sıvı duvar ile birlikte rijit hareket ederken, üst kısımdaki sıvı çalkalanır ve duvara göre ters yönde hareket eder. İmpulsif sıvı duvar ile birlikte hareket eder; rijit olarak bağlanmış duvar ile aynı ivmelenme yapar. İmpulsif kütle Şekil 6 (b) da görüldüğü gibi tabana doğru artan bir yay şeklinde hareket ederken, 6 (c) de konvektif kütle tankın üst tarafında çalkalanma etkisi ile farklı bir ivmelenme ile hareket etmektedir[23].



a) Statik b) İmpulsif c) Konvektif  
Resim 6. Statik ve Dinamik su basınçları[31]

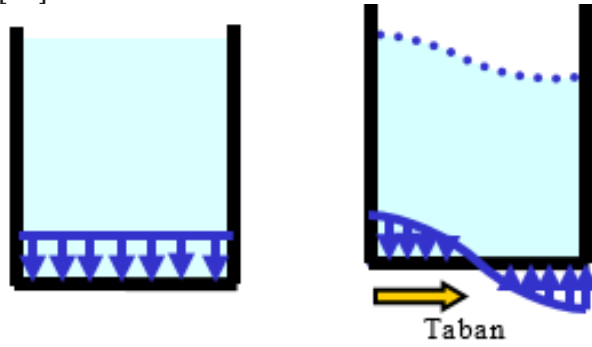
Burada tankın tabanında meydana gelen basınçlar ilgi çekicidir. Silindirik çelik tankının şekil 7(a) daki üstten görüntüsü incelendiğinde hidrostatik basınç aksisimetrik olduğundan, tüm duvar yüzeyi boyunca sıvı basıncının sıfır olduğu görülmektedir. Net hidrodinamik kuvvet ise şekil 7 (b) de görüldüğü gibi asimetrik olduğundan sıfır değildir. Burada duvar yüzeyi boyunca meydana gelen basınç toplamı, sıvı basıncının neden olduğu toplam kuvveti vermektedir.



a) Toplam net kuvvet = sıfır b) Toplam net kuvvet  $\neq$  sıfır  
Resim 7. Statik ve Dinamik su basıncının üstten görünüşü[31]

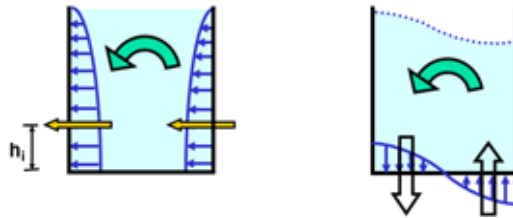
Statik tasarımda hidrostatik basınç göz önünde bulundurulur. Hidrostatik basınç, çembersel kuvvetleri ve duvardaki eğilme momentlerini harekete geçirir. Diğer taraftan tankın duvarında net hidrostatik kuvvet sıfır olduğundan, temelde veya ileriki evrelerde hiçbir devrilmeye sebep olmaz. Sismik tasarımda ise hidrodinamik basınç göz önünde bulundurulur. Tankta bulunan net hidrodinamik kuvvet sıfır olmadığından temelde ve ilerleyen evrelerde bozulmaya ve devrilmeye sebep olduğundan tank tasarımını etkiler.

İmpulsif kuvvet tüm duvar yüzeyinde impulsif basıncın toplamıdır. Benzer şekilde, konvektif kuvvet ise tüm duvar yüzeyinde konvektif basıncın toplamıdır. Şekil 8(a,b) de hidrostatik ve hidrodinamik basınçların tank tabanına etkileri görülmektedir[31].



Şekil 8. İmpulsif ve konvektif ivme hareketleri[23]

İmpulsif sıvının yansıra konvektif sıvıda tank tabanında düzgün olmayan basınçlara neden olur. Hidrodinamik basıncın duvar üzerindeki etkisinin devrilmesine ek olarak taban üzerinde eşit olmayan basınç, devrilmeye neden olur. Tank duvarında ve tabanında meydana gelen devrilme etkisi Şekil 9 de görülmektedir.



Şekil 9. Duvarda ve tabanda devrilme etkisi[31]

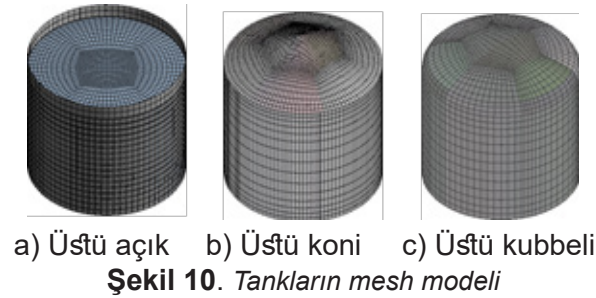
### 3. SONLU ELEMANLAR METODU İLE SİLİNDİRİK ÇELİK SU TANKININ SİSMİK ANALİZİ

Silindirik çelik sıvı tanklarının sismik analizi birkaç yoldan yapılabilir. Bunlar biri ikinci bölümde geçen Housner'in kütle yay modelinden yola çıkılarak API 650 (American Petroleum Institute) standardındaki formülasyon metodu, ikincisi daha çok basit problemlerin çözümünde kullanılan sınır şartları tekniği ve üçüncüsü sonlu elemanlar yöntemidir ki, bir sistem için en uygun ve güvenilir idealleştirilmeler sağlar. Bu çalışmada ANSYS Workbench yazılımı aracılığı ile üç farklı tank modeli tasarlandı. Modelin API 650 standardına göre doğrulanması için modal analiz, zamana bağlı (transient) olarak gerçekleştirilen analiz sonucunda eş değer gerilme (equivalent stress) analizi gerçekleştirildi. Analiz sonucunda gerilmeye bağlı olarak tanklarda meydana gelen burkulmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tablo 1'de analizde kullanılan tanklara ait sınır şartları ve parametreler görülmektedir.

**Tablo 1.** Model tanklar ve suya ait parametreler (Model tank and its parameters)

Parameterler ve birimleri	Açık	Konik	Kubbeli
Tankın Çapı m.	15,08	15,08	15,08
Tankın Yüksekliği m.	11,31	11,31	11,31
Su Yüksekliği m.	10	10	10
Duvar Kalınlığı mm.	4,6,8	4,6,8	4,6,8
Taban Kalınlığı mm.	4,6,8	4,6,8	4,6,8
Çelik Tank Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	7850	7850	7850
Suyun Yoğunluğu kg/m <sup>3</sup>	1000	1000	1000
Tankın Young Modülü Gp.	200	200	200
Çeliğin Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
Suyun bulk modülü Gp	2.2	2.2	2.2

ANSYS workbench ile sismik analizi yapılan üstü- açık, üstü-konik ve kubbeli tank modelleri için elde edilen mesh modelleri Şekil 10'da gösterilmektedir.



**Şekil 10.** Tankların mesh modeli

#### 3.1 MODAL ANALİZ

Dinamik yüke maruz kalan bir yapının tasarlanmasında yapının doğal frekansları ve mod şekilleri çok önemlidir. Bu geçici dinamik analiz için bir başlangıç noktası olarak düşünülebilir. Ayrıca, bu modlar uyarıldığında yapının tepkisi değerlendirilebilir. Model parametreleri doğru tanımlanmışsa, elde edilen sonuçlar doğru değerlere yakın olacaktır. Modal analiz, açık tank için ilk frekans değeri API 650 ile hesaplandı ve daha sonra ANSYS Workbench te hesaplanan ilk mod ile karşılaştırıldı.

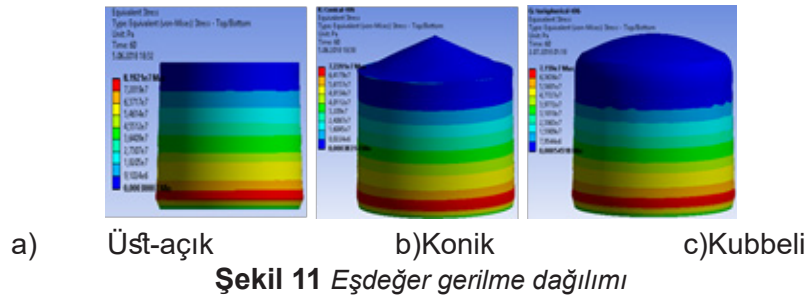
Tankların kabuğuna ait sonlu elemanların üretilmesi ve parçalanması, bunları oluşturmak için kullanılan plakaların genişliğine dayanmaktadır. Açık tank modelinin ilk 6 mod ve frekans değeri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. İmpulsif ve konvektif modal analiz sonuçları

Mod	İmpulsif		Konvektif	
	Fem	Api 650	Fem	Api650
1	3,2514 Hz	3,26 Hz	0,24446	0,246 Hz
2	3,6117 Hz	NA	0,36541	NA
3	3,6215 Hz	NA	0,36572	NA
4	4,7856 Hz	NA	0,46401	NA
5	4,8043 Hz	NA	0,46412	NA
6	5,3754 Hz	NA	0,48855	NA

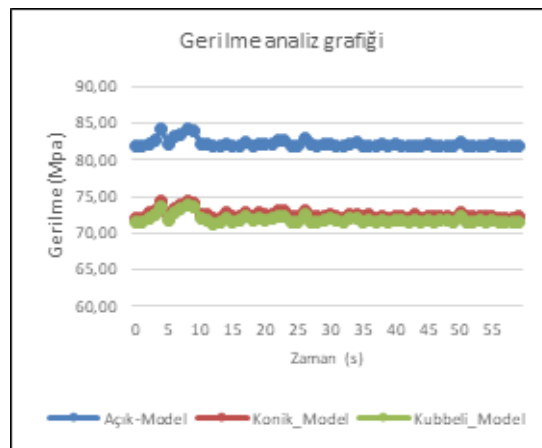
### 3.2 GERİME VE BURKULMA ANALİZİ

Bu çalışmada, Ansys workbench sonlu elemanlar yazılımı ile 1940 El-Centro (büyüklüğü: 6.9) depreminin kuzey-güney bileşeni kullanarak zamana bağlı (Transient) analiz gerçekleştirildi. Çalışma sonucunda, API 650 standardına göre 6 mm kabuk kalınlığına sahip, silindirik çelik tankların eşdeğer gerilme (von-Misses gerilimi) ile burkulması arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Eşdeğer gerilme, genellikle tankların dibinde meydana gelmektedir. Şekil 10 (a, b, c), eşdeğer gerilme dağılımını göstermektedir, kırmızı renk maksimum gerilmeyi gösterirken mavi renk minimum gerilmeyi göstermektedir. En fazla fil ayağı burkulması, üstü açık tank modelinin dibinde meydana geldi. İkincisi, fil ayağı toplanması kubbeli tank modelinde görülmektedir. Konik model en düşük fil ayağı burkulmasına sahipken, kapakta burkulmaların oluşumu dikkat çekmektedir.



Şekil 11 Eşdeğer gerilme dağılımı

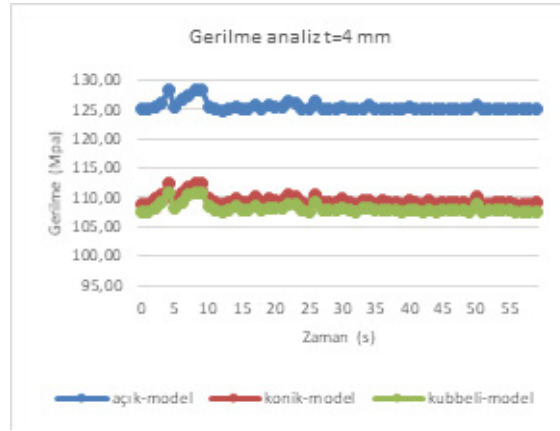
Şekil 12 üstü-açık, konik-kapalı ve kubbeli silindirik tank modelleri için maksimum gerilme karşılaştırmasını göstermektedir. Bütün modellerde maksimum gerilme 5-10 saniye aralığında meydana gelmektedir. Üstü açık tank modeli en üstte 80-85 Mpa arasında maksimum gerilmeye sahipken, konik modelde 72-75 Mpa aralığında gerilme meydana gelmiştir. Kubbeli model 71 Mpa dolaylarında en düşük gerilmeye sahiptir. Burada, en düşük gerilme için kubbeli model tasarımı tercih edilebilir.



Şekil 12. Eşdeğer gerilme karşılaştırması t=6 mm

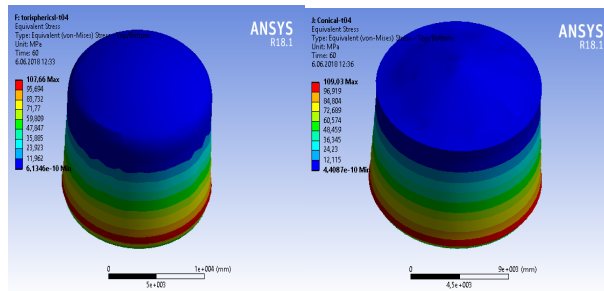


Tank kalınlığının kapak tasarımı üzerin etkilerini görebilmek için, kalınlık 2 mm azaltılarak 4 mm ve 2 mm artırılarak 8 mm alınarak analizler tekrarlanmıştır. 4 mm ve 8 mm'lik üstü-açık üstü-konik ve kubbeli tank modellerindeki gerilme sonuçları ve burkulma durumları karşılaştırılmıştır. Şekil 13, 4 mm'lik tankların gerilme karşılaştırmasını göstermektedir. Üstü-açık tank maksimum eşdeğer gerilime sahiptir ve değeri 125 MPa civarındadır. Konik model ile gerilme biraz azalarak yaklaşık 110 MPa olurken kubbeli modelde bu oran yaklaşık 106 Mpa düşmüştür.



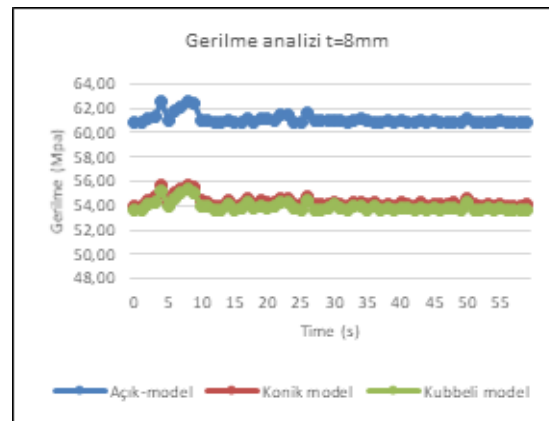
Şekil 13. Eşdeğer gerilme karşılaştırması t=4 mm

Şekil 14'de cidar kalınlığını 4 mm ye düşmesi ile konik ve kubbeli modellerin kapaklarında burkulmaların arttığı görülmektedir.



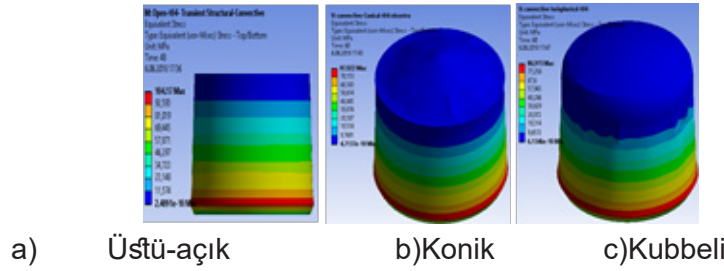
Şekil 14. Tank kapağında burkulmalar

Şekil 15, eşdeğer gerilme karşılaştırmasını göstermektedir. Üstü-açık tank modelinin eşdeğer gerilimi, tank kalınlığının 8 mm'ye çıkmasıyla 60 Ppa ile 62 Mpa arasında gerçekleşti, konik ve kubbeli çatı modellerinde ise 54 Mpa civarında görülüyor.



Şekil 15. Eşdeğer gerilme karşılaştırması t=8 mm

Şekil 16, El-Centro deprem yüklemesi altındaki konvektif eşdeğer gerilimi özetlemektedir. Üstü-kapalı tank tanklarda özellikle çalkalanma etkisi görülmektedir. Çalkalanma etkisine bağlı olarak, konik modelin çatısında ve kubbeli modelin üst kısmında çatlaklar görülmektedir.



Şekil 16 Konvektif eşdeğer gerilme dağılımı

#### 4. SONUÇ

Önemli mühendislik yapıları olarak dünyada ve ülkemizde kullanımları her geçen gün yaygınlaşan silindirik çelik sıvı tanklarının sismik performanslarının belirlenmesi ve artırılması büyük önem arz etmektedir. Silindirik çelik sıvı tankları geçmişte meydana gelen 1940 El Centro, Meksika, ABD depremi, ardından 1995, Japonya'da Kobe depremi ve 1999 İzmit depremi gibi depremlerden sonra çok sayıda silindirik çelik tank hasar gördü. Marina E ve arkadaşının raporuna göre, büyük deprem olaylarından sonra meydana gelen hasar gözlemleri, çeşitli hata modlarında ve tasarım sürecinin daha fazla ayrıntıya ihtiyaç duyabileceği muhtemel alanlarda bir öngörü sağlayabilir [32]. Ayrıca Priestley ve arkadaşlar [33], Barros [34] ve Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği Enerji Dairesi'nin Petro Kimya Komisyonu'nun [2011] kılavuzları, 'ayak taban şişmesi' olarak da bilinen taban üzerinde tank duvarının burkulması gibi hata türlerini gözlemler. Gözlem sonunda tank duvarının üst kabuğunun hasar görmesi ve yükselme sırasında yüksek gerilimli kuvvetlerin bir sonucu olarak taban plakası ve tank kabuğu arasında kaynak bozulmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, kalınlığa bağlı olarak farklı kapak tasarımına sahip silindirik çelik sıvı tanklarının gerime ve burkulma şekilleri ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda, en fazla gerilmenin tank dibinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Tank cidar kalınlığının 4 mm'ye düşmesi ile özellikle üstü-açık modelde fil ayağı burkulması artmıştır. Üst kapaktaki en fazla burkulma konik modelde meydana gelmiştir. Ülkemizde 1999'da meydana gelen Marmara depreminde birçok tankta fil ayağı burkulması meydana gelmiştir, bu burkulma, yapılarda deprem esnasında beklenen bir miktar plastik davranışa örnek olarak gösterilebilir, fakat özellikle yanıcı ve tehlikeli kimyasallar ihtiva eden tankların daha rijit yapılmasında fayda vardır. Ayrıca Tankın üst tarafında konvektif çalkalanmaya bağlı olarak meydana gelebilecek burkulmaların, konik-kapatılması ile azaltılması ortaya çıkarılmıştır.

#### REFERANSLAR

- [1] Cooper, T. W., and Wachholz, T. P. 1999. "Optimizing Post-earthquake Lifeline System Reliability" In Proceedings of the 5th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, 878-86.
- [2] Veletsos, A. S., and Yang, J. Y. 1977. "Earthquake Response of Liquid Storage Tanks—Advances in Civil Engineering through Mechanics" In Proceedings of the Second ASCE (American Society of Civil Engineers) Engineering Mechanics Specialty Conference, 1-24.
- [3] Haroun, M. A., and Housner, G. W. 1981. "Earthquake Response of Deformable Storage Tanks" Journal of Applied Mechanics 48 (2): 411-8.
- [4] Chalhoub, M. S., and Kelly, J. M. 1990. "Shake Table Test of Cylindrical Water Tanks in Base Isolated Structures" Journal of Engineering Mechanics 116 (7): 1451-72.
- [5] Bo, L., and Jia-xiang, T. 1994. "Vibration Studies of Base Isolated Liquid Storage Tanks" Computers and Structures 52 (5): 1051-9.

- [6] Malhotra, P. K. 1997. "Method for Seismic Base Isolation of Liquid Storage Tanks" *Journal of Structural Engineering* 123 (1): 1051-9.
- [7] Shenton, H. W., and Hampton, F. P. 1999. "Seismic Response of Isolated Elevated Water Tanks" *Journal of Structural Engineering* 125 (9): 965-76.
- [8] J.C. Virella, L.A.Godoy,L.E.Suarez "Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation", *Journal of Constructional Steel Research* 62 (2006) 521–531.
- [9] 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.
- [10] Graham, E.W., and Rodriguez, A.M., 1952: "The Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics", *Journal of Applied Mechanics*, 19, 381-388.
- [11] Housner, G., 1957: "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, 15-35. 103
- [12] Hanson, R.D., 1973: "Behavior of Liquid Storage Tanks, Report", National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 331-339.
- [13] Housner, G., 1963: "The Dynamic Behavior of Water Tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 381-387.
- [14] Haroun, M.A., 1980: "Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering Research Laboratory", Report No. EERL 80-4, California Institute of Technology.
- [15] Haroun, M.A., 1983: "Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 179 – 206.
- [16] Haroun, M.A., Tayel, M. A., 1985: "Response of Tanks to Vertical Seismic Excitations", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13,
- [17] Haroun, M.A., and Abdel-Hafiz, E.A., 1986: "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*, 5, 217-225.
- [18] Haroun, M.A., and Abou-Izzeddine, W., 1992: "Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction .1. Horizontal Excitation", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118, 783-797.
- [19] Grilli, S.T., Skourup, J., and Svendsen, I.A., 1988: "The Modeling of Highly Nonlinear Water-Waves - A Step Toward a Numerical Wave Tank", *Proceedings of the 10th International Conference on Boundary Element Methods*, Southampton, England, pp. 549-566.
- [20] Huang, Y.Y., Wang, S.K., and Cheng, W.M., 1988: "Fluid-Structure Coupling Boundary Element Method for Analyzing Free-Vibration of Axisymmetric Thick-Walled Tanks", *roceedings of the 10th International Conference on Boundary Element Methods*, Southampton, England, pp. 521-534.
- [21] Kondo, H., Yamamoto, S., and Sasaki, Y., 1990: "Fluid-Structure Interaction Analysis Program for Axisymmetric Structures", *JSME International Journal, Series III - Vibration Control Engineering for Industry*, 33, 315-322.
- [22] Gedikli, A., 1996: "Silindirik Sıvı Tanklarda Varyasyonel Sınır Eleman Sonlu Eleman yöntemi ile Sıvı-Yapı Etkileşimi", Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University.

- [23] Hwang, I.T., and Ting, K., 1989: "Boundary Element Method for Fluid- Structure Interaction Problems in Liquid Storage Tanks", Journal of Pressure Vessels Technology, III, 435-440.
- [24] Alemdar Bayraktar ,Barış Sevim, Ahmet Can Altunışık, Temel Türker, "Effect of the model updating on the earthquake behavior of steel storage tanks" , Journal of Constructional Steel Research, Vol 66, 2010, pp 462-468
- [25] Sunitha K R, Bobby Jacob, "Dynamic Buckling Of Steel Water Tank Under Seismic Loading", International Journal of Civil Engineering (IJCE) ISSN(P): 2278-9987; ISSN(E): 2278-9995 Vol. 4, Issue 6, Oct - Nov 015, 81-90
- [26] BOLT, B. ve diğ., "The Chile Earthquake of March 3, 1985", Earthquake Spectra, Vol.2, No. 2, Chapter 5, pp. 373- 409, 1986] [NIWA, A. and CLOUGH, R.W., "Buckling of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Loading", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 107-122, 1982
- [27] Alper Haluk ALTUN, Seismic Analysis Of Steel Liquid Storage Tanks By Api-650, M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Structural Engineering Programme, İTÜ, June 2013
- [28] Kim, N.S. and Lee, D.G. (1995). "Pseudo-Dynamic Test for Evaluation of Earthquake Performance of Base-Isolated Liquid Storage Tanks", Engineering Structures, 17(3), 198- 208.Seismology and Earthquake Engineering, 2, 45-54
- [29] Malhotra, P., Method for seismic base isolation of liquid-storage tanks, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 1, January, 1997
- [30] Gökhan YAZICI , Feridun ÇILI, "Silindirik Depolarinin Sismik Yalıtım Yöntemiyle Depremden Korunması", Deprem Smpozyumu, 23-25 Mart 2005 Kocaeli.
- [31] Sudhir K. Jain, IIT Kanpur. "E-Course on Seismic Design of Tanks/ January.» [https://civiltechnocrats.files.wordpress.com/.../tanks\\_lecture.](https://civiltechnocrats.files.wordpress.com/.../tanks_lecture.) 2006. [https://civiltechnocrats.files.wordpress.com/.../tanks\\_lecture..](https://civiltechnocrats.files.wordpress.com/.../tanks_lecture..) (erişildi: 01 11, 2018).
- [32] Marina E. Kalogerakou a, Charilaos A. Maniatakis a, Constantine C. Spyrakos a , Prodromos N. Psarropoulos, "Seismic response of liquid-containing tanks with emphasis on the hydrodynamic response and near-fault phenomena" , Engineering Structures 153 (2017) 383–403
- [33] Priestley MJN, Wood JH, Davidson BJ. Seismic design of storage tanks, Bull NZ Natl Soc Earthq Eng 1986;19(4):272–84.
- [34] Barros RC. "Determination of seismic design envelopes of bottom supported tanks by distinct FEM analyses", In: Proc. of the 6 Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sismica. Guimaraes.