

## Silindirik Çelik Su Tanklarının Sismik Analizinin FEM İle Gerçekleştirilmesi

\*<sup>1</sup>Ali İhsan Çelik, <sup>2</sup>Tahir Akgül, <sup>3</sup>Ahmet Celal Apay, <sup>4</sup>Adem Yurtsever  
<sup>1</sup>Besni Vocational High School, Adiyamana University, Adiyaman Turkey  
<sup>2,3</sup>Faculty of Technology, Department of Civil Engineering Sakarya University, Turkey  
<sup>4</sup> Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering H.K.U University, Gaziantep, Turkey

### Özet

Silindirik çelik su tankları; son yıllarda, dünyada yaygınlaşan ve Türkiye’de kurulma aşamasında olan nükleer enerji santrallerinde soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Bu tankların, depremlerde hasar görmeleri, büyük maddi ve çevresel zararlara neden olmaktadır. Depremlerden sonra, sıvı tanklarında oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla yapılan saha araştırmalarında, sıvı depolarının, 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 cidara sahip bir yapıda olması, cidarın eksenel ve çevresel esnemelerinin ve çalkalanan sıvının modlarının çoklu dinamik tepkilerinin olması, içerikteki sıvının ve titreşen cidarın doğrusal olmayan bir davranışa sahip olması ve tank cidarının burkulma şekil değiştirme modlarını içermesinden kaynaklanmaktadır. Tankların sismik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi oldukça masraflıdır. Tank-sıvı sistemlerinin gerçek davranışlarının incelenmesi için en iyi yöntem, sonlu elemanlar metodunun kullanılmasıdır. Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak model tankın sismik yükleri altındaki doğrusal-elastik olmayan davranışları incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Silindirik Tankların Sismik Analizi, FEM analizi, ve Nonlineer Davranışları

### 1. Giriş

Silindirik çelik tankları, su, kimyasal sıvı ürünleri 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 hasara karşı zayıf oldukları ve içerdikleri yanıcı ve zehirli sıvılardan dolayı kontrolsüz ve yıkıcı zararlara sebep oldukları gözlemlenmiştir. Bu yapılar, içerdikleri sıvının hidrostatik basıncı yanı sıra, deprem yer hareketine bağlı olarak hidrodinamik su basıncına maruz kalırlar. Sıvı yapı etkileşiminden dolayı farklı basınçlara maruz kalan silindirik çelik su tanklarının sismik analizi çok karmaşıktır.

1940 Southern-California El-Centro, 1995 Japonya-Kobe ve 1999 da ülkemizde meydana gelen Kocaeli depremlerinde sıvı depolama tanklarında ağır hasarlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. İzmit-Tüpraş Rafinerisi’ndeki petrol depolama tanklarında ağır hasarlar ve göçmeler meydana gelmiştir. Bu hasarların sonucu olarak ortaya çıkan yangınlar ağır maddi kayba sebep olmuştur ve

\*Corresponding author: Address: Besni Meslek Yüksekokulu Adiyaman University, 02300, Besni/Adiyaman TURKEY. E-mail address: acelik@adiyaman.edu.tr, Phone: +90533221735

bölgede güvenlik tehlikesi oluşmuştur.

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 benzetim çalışmaları yapmışlardır.

Sıvı depolama tankları ile ilgili ilk çalışmalar tankın rijitliği ve sıvıların hidrodinamik etkileri ile ilgilidir. Jacobsen (1949), Graham ve Rodriguez (1952) ve Housner (1957) gibi bilim adamları tarafından yapılan çalışmalar, sıvı depolama tanklarının sismik tepki analizi tankın katı olması ve içerdiği dinamik basınç üzerinde yoğunlaşmıştır. Daha sonra, 1964 büyük ölçekli Alaska Depremi'nde modern tasarım tanklarının büyük zarar görmesi ile (Hanson, 1973) derinden etkilenmiş ve esnek tankların titreşimsel özelliklerini araştırmaya karar vermiştir [1-4].

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  $\cos n\theta$ -tipi modları ve toprak-yapı-sıvı etkileşimi üzerindeki etkisini içerir [5-10].

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 [10-15].

Silindirik çelik su tankları, kapak basıncından, yatay deprem yüklerinden ve depolanan malzemelerin duvarlarda sürtünmesinden kaynaklanan eksenel basınç ile birlikte depolanmış sıvının hidrostatik basıncına maruz kalan ince cidarlı yapılardır. Sismik yükleme altında, duvarlardaki eksenel gerilmelerden dolayı devrilme momenti meydana gelir [16]. Depremin karmaşık ve öngörülemeyen davranışları, her depremin meydana gelmesinden sonra yeni olgular elde edilmesine neden olmuştur. Depreme karşı yapı tasarımı ilkeleri, iki parametrenin anlaşılmasını gerektirir. Bu parametreler deprem kuvvetinin özellikleri ve yapının dinamik özellikleridir [17].

Alemdar Bayraktar ve arkadaşları, sonlu elemanlar modeli ile akışkan-yapı etkileşimini göz önünde bulundurarak, çelik sıvı depolama tanklarının deprem davranışları üzerine olan etkileri üzerinde çalıştılar. Bu amaçla, Trabzon'da bulunan silindirik çelik sıvı tankını, bir miktar sıvı akaryakıt ile doldurdular. Bu çalışma sonucunda silindirik depolama tankının ilk sonlu elemanlar modeli ANSYS yazılımı ile geliştirildi ve dinamik özellikler (doğal frekansları ve mod şekilleri)

analitik olarak belirlendi[16].

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 [18].

- 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 aşağıda ayrıntılı bir şekilde aşağıda anlatılmaktadır.

### **Fil Ayağı Burkulması**

En yaygın hasar türlerinden birisi, fil ayağı burkulmasıdır. Yapı kabağa gelen kritik yükü taşıyamayarak akmaya başlayacak ve elastik burkulma sınırlarını aşarak, tabanda fil ayağı şeklinde şekil 1 de görüldüğü gibi plastik deformasyona sebep olacaktır. Bu aslında depreme dayanıklı yapılarda istenen sünek davranışa modeldir. Yapı önce sünek davranır, daha sonra burkulma meydana gelir [19].



**Şekil 1.** Fil ayağı burkulması

### **Elmas Şekli Burkulması**

Elmas şekilli burkulma, şekil 2 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 2. Elmas şekli burkulması

### Çatı Hasarı

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 3 te Tüpraş ta deprem sonraki meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 3. Tüpraş rafinerisinde meydana gelen yangın hasarı(Erdik, 2000)

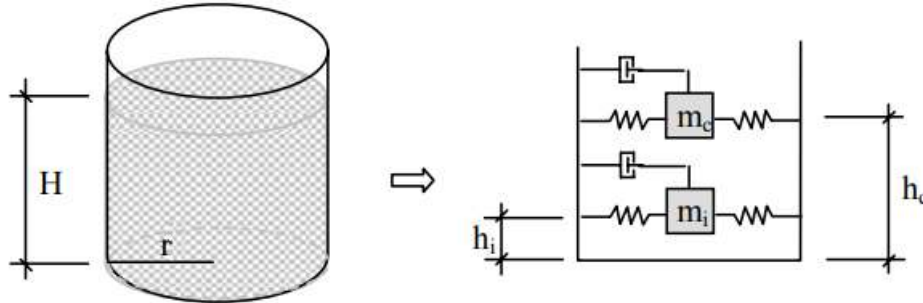
Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), sayısal modelleme teknikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. FEM, karmaşık yapı problemlerini çözmeye avantajlara sahiptir. Bu makalede öncelikle bazı temel sismik değerler API 650 standardı ile hesaplanmıştır. Daha sonra El-Centro deprem verileri

kullanılarak doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Silindirik çelik tanklarla ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur, fakat tank kapağının konik ve kubbeli olan modellerinin sismik analiz sonuçlarını karşılaştırması bulunmamaktadır. Analiz sonucunda en uygun tank modeli belirlenecektir.

## 2. Silindirik Çelik Sıvı Tanklarının Dinamik Davranışı

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[3]. Daha sonra Kim [20] tarafından deneysel olarak ve Malhotra tarafından da [21] nümerik olarak gösterilen modelde, dinamik davranışın sadece impulsif ve konvektif kütlelerin 1. mod davranışlarının göz önünde bulundurulmasının yeterli olacağı belirtilmiştir.

Tankın alt tarafında, 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 4'de şematik olarak gösterilmektedir.



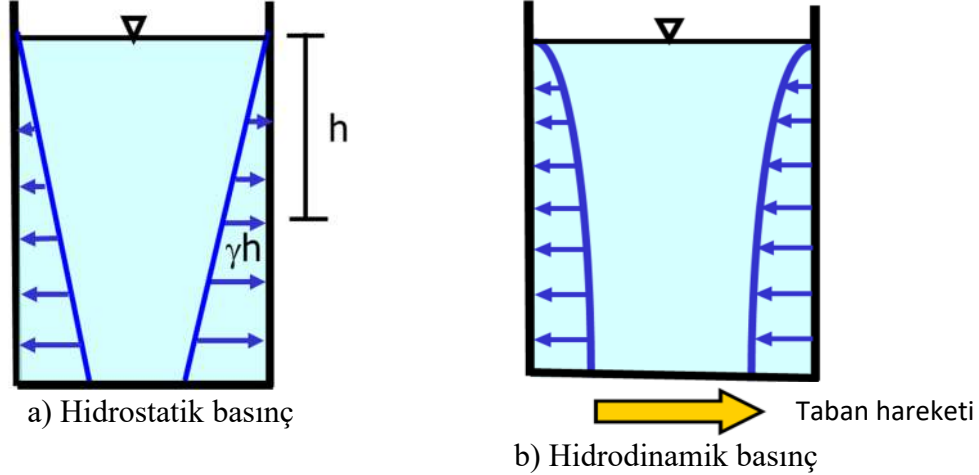
Şekil 4. Silindirik çelik sıvı tankının dinamik modeli.

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 [8]. 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 [22].

### 2.1. Silindirik Çelik Su Tankı Teorisi

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

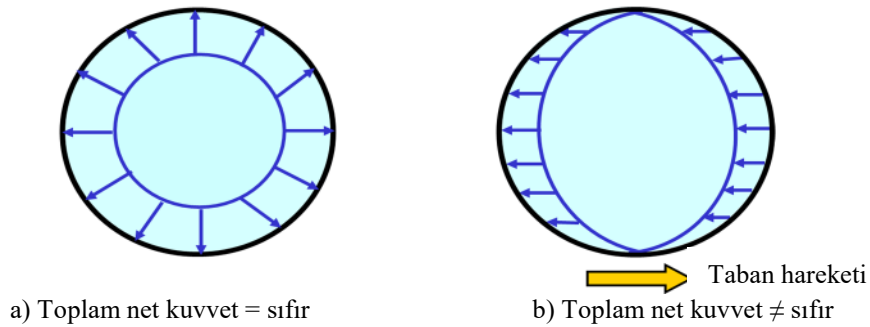
Hidrostatik su basıncı, sıvı derinliği ile doğrusal olarak değişir ve tankın yüzeyine normal davranır. Sıvının üstünden herhangi bir noktaya olan yüksekliğe ve yoğunluğa bağlı olarak hidrostatik basınç  $= \gamma h$  ile basit bir şekilde hesaplanabilir. Şekil 5 (a) da görüldüğü gibi hidrostatik basınç duvar boyunca tabana doğru doğrusal artan bir şekilde sahiptir.



**Resim 5.** Statik ve Dinamik su basıncı[23]

Hidrodinamik basınç ise şekilde 5 (b) de görüldüğü gibi duvar yüksekliği boyunca eğrisel bir şekilde sahiptir ve yönü taban hareketinin tersidir.

Silindirik çelik tankının şekil 6(a) daki üstten görüntüsü incelendiğinde hidrostatik basınç aksisimetrik olduğundan tüm duvar yüzeyi boyunca sıvı basıncının sıfır olduğu görülmektedir. Net hidrodinamik kuvvet ise şekil 6 (b) de görüldüğü gibi asimetrik olduğundan sıfır değildir. Burada duvar yüzeyi boyunca meydana gelen basınç toplamı, sıvı basıncının neden olduğu toplam kuvveti verir.

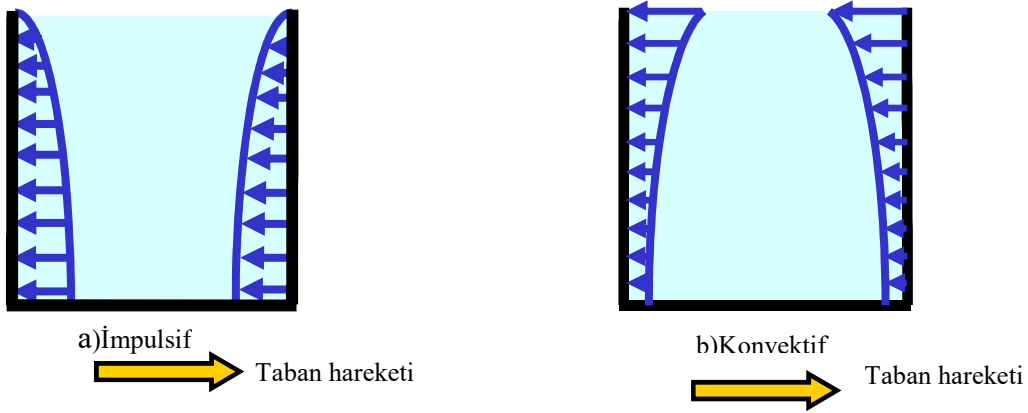


**Resim 6.** Statik ve Dinamik su basıncının üstten görünüşü[23]

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

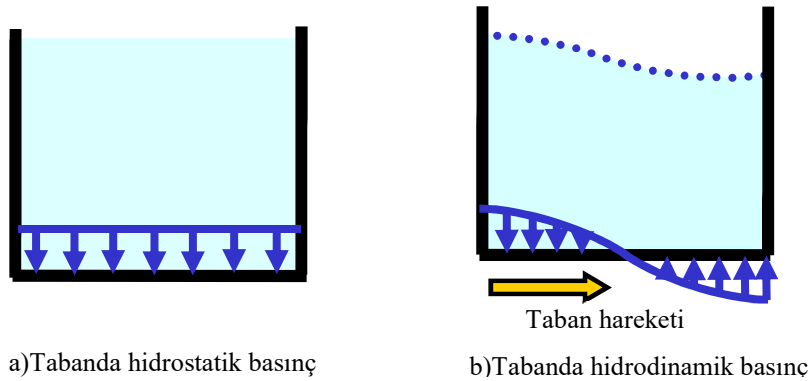
hidrodinamik kuvvet sıfır olmadığından temelde ve ilerleyen evrelerde bozulmaya ve devrilmeye sebep olduğundan tank tasarımını etkiler.

Hidrodinamik basınç ve kuvvet prosedürü Housner'ın (1963) klasik çalışmasına dayanır. Housner'ın çalışmasına göre ivmeli yer hareketine maruz kalan bir tankın alt kısmındaki sıvı duvar ile birlikte 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 ivmelenmeyi yapar. İmpulsif kütle şekil 6 (a) da görüldüğü gibi tabana doğru artan bir yay şeklinde hareket ederken, 7 (b) de konvektif kütle tankın üst tarafında çalkalanma etkisi ile farklı bir ivmelenme ile hareket etmektedir[23].



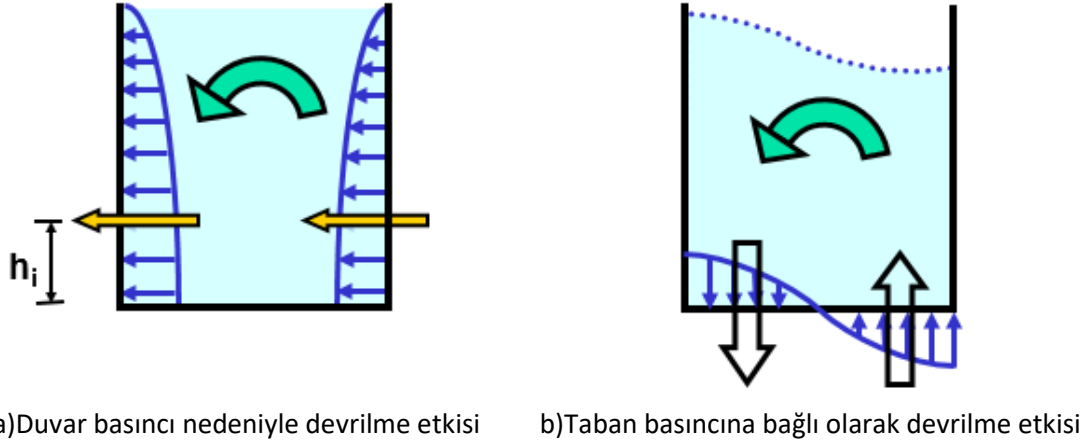
Şekil 7. İmpulsif ve konvektif ivme hareketleri[23]

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[23].



Şekil 8. Hidrostatik ve hidrodinamik taban basınçları[23].

İmpulsif sıvının yanısıra, konvektif sıvı da 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[23]

### 3. Sonlu Elemanlar Metodu ile Silindirik Çelik Su Tankının Sismik Analizi

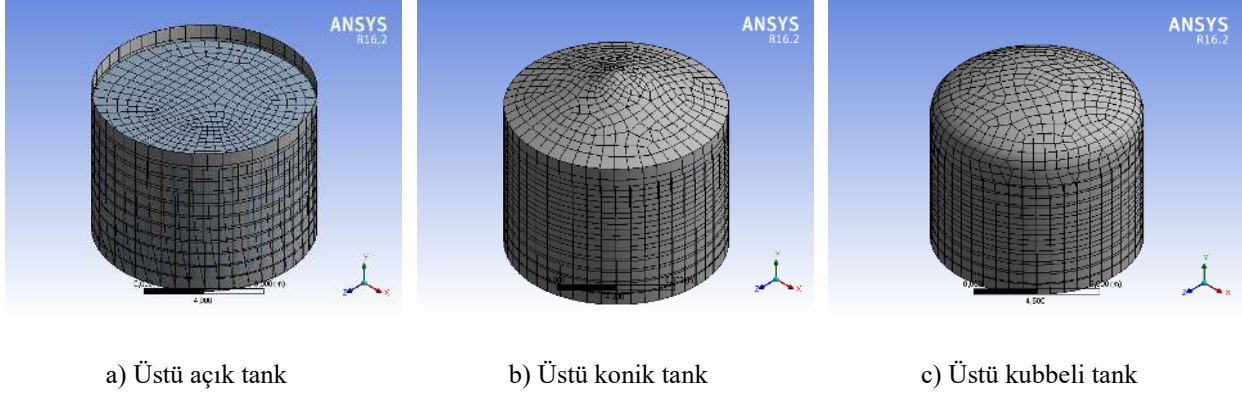
Silindirik çelik su tanklarının sismik analizi birkaç metotla yapılabilir. Birincisi, ikinci bölümde geçen Housner'in kütle yay modelinden yola çıkılarak API 650 (American Petroleum Institute) standardındaki formülasyon metodu, ikincisi, daha çok basit problemlerin çözümünde kullanılan sınır şartları tekniği ve üçüncüsü, sonlu elemanlar yöntemidir ki bu yöntem, bir sistem için uygun ve güvenilir idealleştirilme sağlar. Bu çalışmada ANSYS Workbench yazılımı aracılığı ile üç farklı tank modeli tasarlanmıştır. Bunlar için modal analiz, ve zaman geçmişi analizleri gerçekleştirilmiştir.

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 m.	0,010	0,010	0,010
Taban Kalınlığı m.	0,012	0,012	0,012
Çelik Tank Yoğunluğu	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 açık, konik ve kubbeli tank modelleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 10. Tankların mesh modeli

### 3.1 Modal Analiz

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.

Bu çalışmada öncelikle modal analiz yapıldı; açık tank için ilk frekans değeri API 650 formülasyonu ile hesaplanarak ANSYS Workbench'te hesaplanan ilk mod ile karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma ve açık tank modelinin ilk 6 modu frekans değerleri ile birlikte Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. İmpulsif ve konvektif modal analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

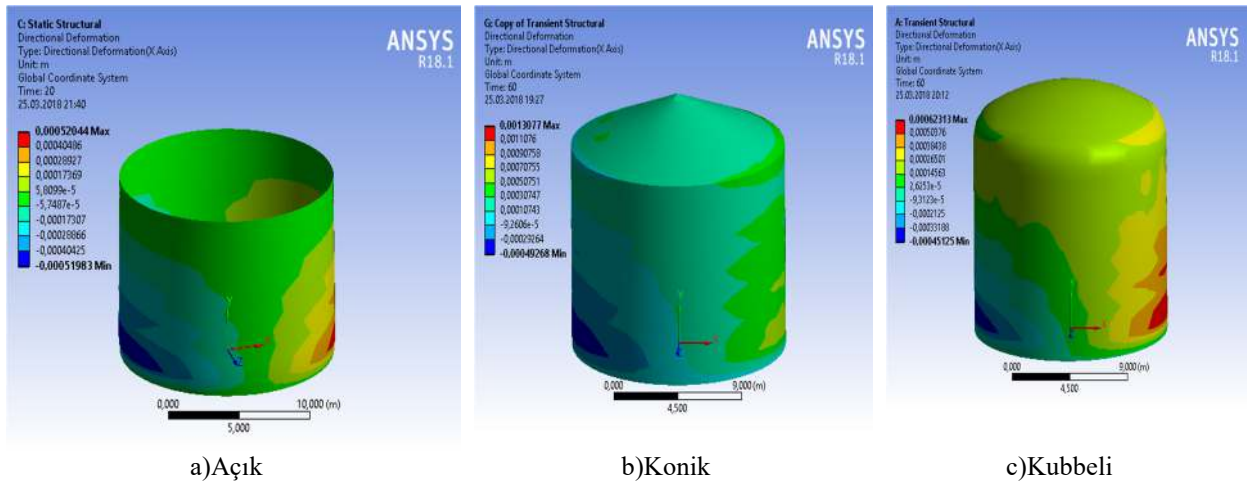
Mod	İmpulsif		Konvektif	
	Fem	Api 650	Fem	Api650
1	3,2514 Hz	3,26 Hz	0,24446	0,246 Hz
2	3,6117 Hz	NA	0,36541	NA
3	3,6215 Hz	NA	0,36572	NA
4	4,7856 Hz	NA	0,46401	NA
5	4,8043 Hz	NA	0,46412	NA
6	5,3754 Hz	NA	0,48855	NA

### 3.2 Zaman Geçmişi (Time History) Analizi

Zaman-geçmişi(Time History) analizi; bir yapının, zaman içinde değişebilen spesifik bir yüke dinamik tepkisinin adım adım analizidir. Analiz, doğrusal ve doğrusal olmayabilir. Zaman-geçmişi analizi, bir yapının keyfi yüklemeye karşı dinamik tepkisini belirlemek için kullanılır. Yük, yer ivmesi içeriyorsa, yer değiştirmeler, hızlar ve hızlanma yer hareketine bağlıdır. Herhangi bir zaman aralığı analizi vakaları tanımlanabilir. Her zaman geçmiş, uygulanan yüke ve yapılacak analiz tipine göre farklılık gösterebilir. 1940 El Centro (büyüklüğü: 6.9) depreminin verileri kullanılarak Time-History analizi gerçekleştirildi. Tank modellerinin zamanla değişen tepki karakteristiklerini belirlemek için tankların zaman öyküsü analizi impulsif ve konvektif bileşenlere ayrıldı.

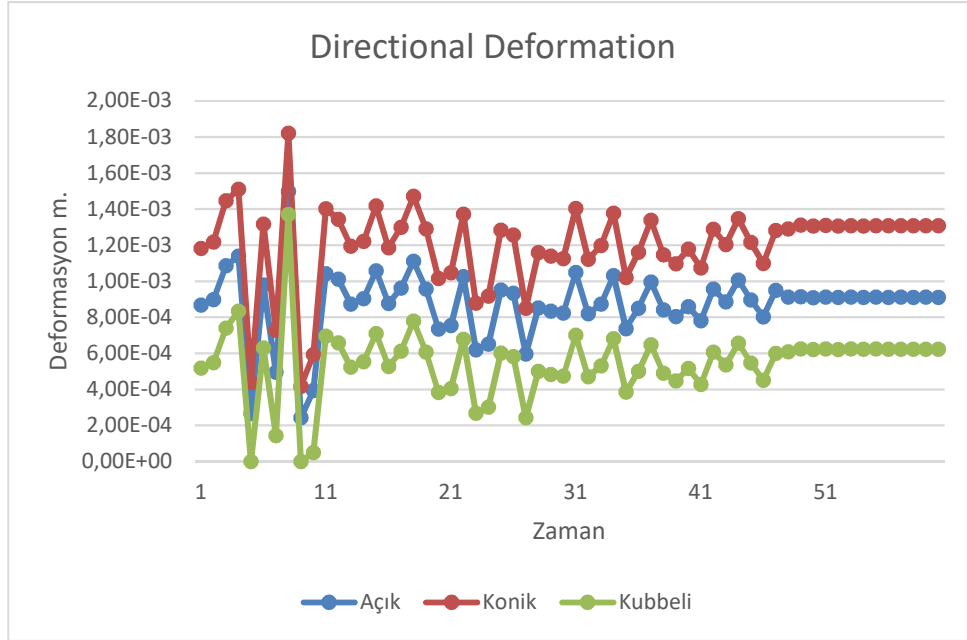
#### 3.2.1 Tartışma

İmpulsif(rijit) kütle için yapılan sismik analiz sonuçları şekil 1 de verilmiştir. Zamana bağlı (transient) ivmeli hareket üstü açık, üstü konik ve üstü kubbeli üç farklı tank modeli için gerçekleştirildi ve sonuçlar ortaya çıkarıldı.



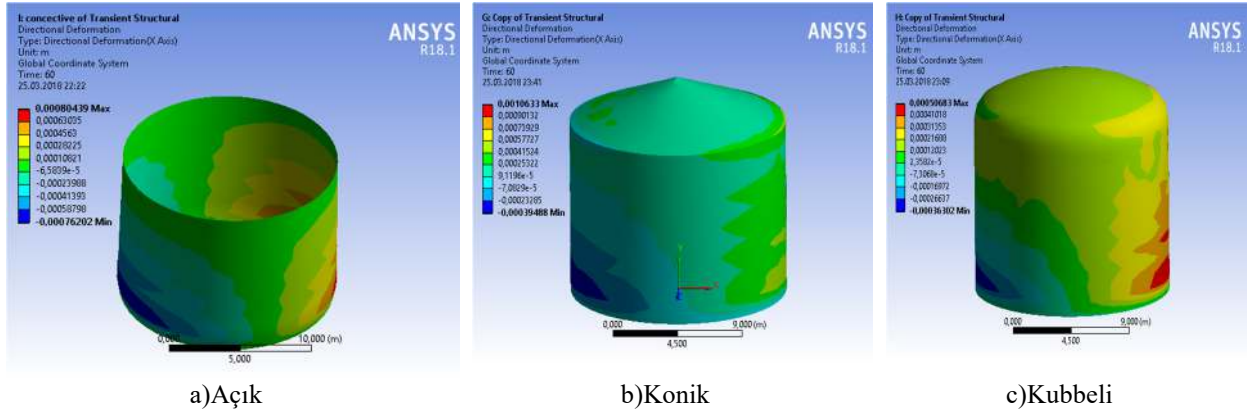
Şekil 11. İmpulsif(rijit) transient analiz sonuçları

Üç tank için elde edilen impulsif sonuç grafiği Şekil 12 de gösterilmektedir. Bütün tanklarda doğrusal olmayan davranış, 3 saniyeden sonra başlamış görülüyor. İlginç bir şekilde en yüksek deformasyon konik modelde meydana gelmiştir, daha sonra açık model ve en düşük deformasyon kubbeli modelde meydana geldi. 9. saniyede maksimum gerilme konik modelde  $1,80e^{-03}$ , açık modelde  $1,50e^{-03}$  ve kubbeli modelde  $1,40e^{-03}$  olarak gerçekleşmiştir.



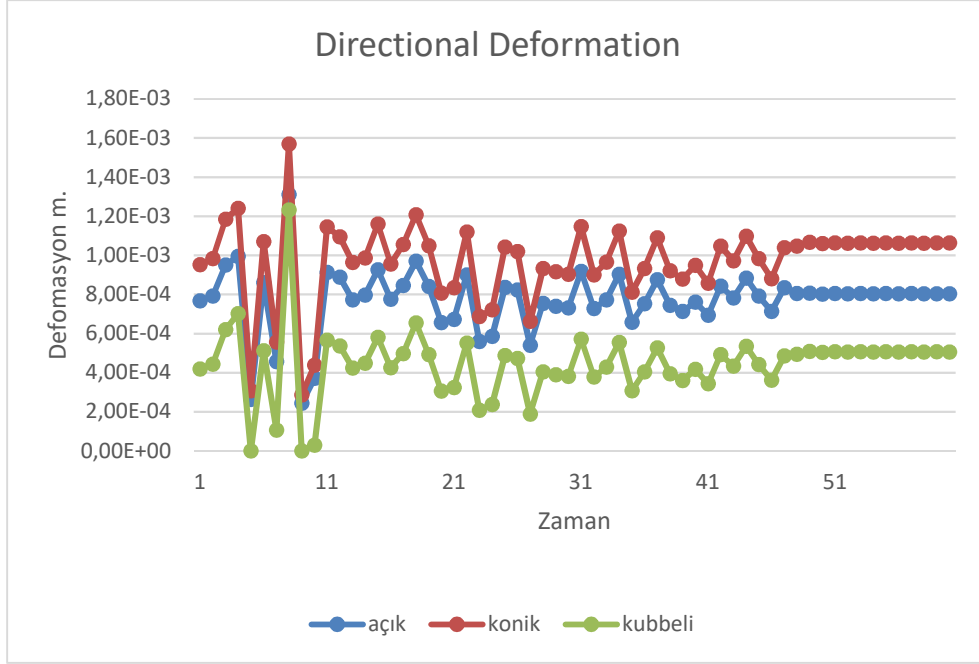
Resim 12. İmpulsif(rijit) tansient analiz grafiği

Konvektif(çalkantı) kütle için yapılan sismik analiz sonuçları resim 13 de verilmiştir. Zamana bağlı (trensient) ivmeli hareket üstü açık, üstü konik kapalı ve üstü kubbe şeklinde kapatılmış üç farklı tank modeli için gerçekleştirildi ve sonuçlar gözlemlendi.



Resim 13. Konvektif (çalkantı) tansient analiz sonuçları

Burada yine üç tank için elde edilen konvektif sonuç grafiği şekil 14 de gösterilmektedir. Bütün tanklarda doğrusal olmayan davranış, 3 saniyeden sonra başlamış görülüyor. İlginç bir şekilde en yüksek deformasyon konik modelde meydana gelmiş, daha sonra açık model ve en düşük deformasyon kubbeli modelde meydana gelmiştir. 9. saniyede maksimum gerilme konik modelde  $1,60e^{-03}$ , açık modelde  $1,50e^{-03}$  ve kubbeli modelde  $1,20e^{-03}$  civarında gerçekleşmiştir.



Resim 14. Konvektif(çalkantı) tansient analiz grafiği

#### 4. Sonuç

Silindirik çelik sıvı tankları geçmişte meydana gelen 1940 El Cenrto, 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 [24]. Ayrıca Priestley ve ark. [25], Barros [26] ve Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği Enerji Dairesi'nin Petro Kimya Komisyonu'nun [2011] kılavuzları, " ayak taban şişmesi 'olarak bilinen taban üzerinde tank duvarının burkulması gibi hata türlerini gözlemledi. ", 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.

Önemli mühendislik yapıları olan bu tankların, dünyada ve ülkemizde kullanımları her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Özellikle ülkemizde son zamanlarda yapılan tankların konik şekilde kapatıldığı görülmektedir. Hâlbuki bu çalışmada elde ettiğimiz sonuçlara göre maksimum gerilmenin konik modelde daha fazla meydana geldiği, kubbe şeklinde kapatılmasının deformasyonu düşürdüğü ve deprem anında hasar görme ihtimalinin daha düşük olduğu söylenebilir. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan bu sismik analiz özellikle ülkemizdeki silindirik çelik tank üreticileri için bir referans olacaktır.

## Referanslar

- [1] **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.
- [2] **Graham, E.W., and Rodriguez, A.M.**, 1952: The Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics, *Journal of Applied Mechanics*, **19**, 381-388.
- [3] **Housner, G.**, 1957: Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **47**, 15-35. 103
- [4] **Hanson, R.D.**, 1973: Behavior of Liquid Storage Tanks, Report, National Academy of Sciences, Washington D.C., pp. 331-339.
- [5] **Housner, G.**, 1963: The Dynamic Behavior of Water Tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53**, 381-387.
- [6] **Haroun, M.A.**, 1980: Dynamic Analyses of Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No. EERL 80-4, California Institute of Technology.
- [7] **Haroun, M.A.**, 1983: Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**, 179 – 206.
- [8] **Haroun, M.A., Tayel, M. A.**, 1985: Response of Tanks to Vertical Seismic Excitations, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**.
- [9] **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.
- [10] **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.
- [11] **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.
- [12] **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 10<sup>th</sup> International Conference on Boundary Element Methods, Southampton, England, pp. 521-534.

[13] **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.

[14] **Gedikli, A.**, 1996: Silindirik Sıvı Tanklarda Varyasyonel Sınır Eleman Sonlu Eleman yöntemi ile Sıvı-Yapı Etkileşimi, *Ph.D. Thesis*, Istanbul Technical University.

[15] **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.

[16] **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

[17] **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

[18] **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

[19] **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

[20] **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

[21] **Malhotra, P.**, Method for seismic base isolation of liquid-storage tanks, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 1, January, 1997

[22] **Gökhan YAZICI , Feridun ÇILI**, Silindirik Depolarinin Sismik Yalıtım Yöntemiyle Depremden Korunması, Deprem Smpozyumu, 23-25 Mart 2005 Kocaeli.

[23] **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).

[24] **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

[25] **Priestley MJN**, Wood JH, Davidson BJ. Seismic design of storage tanks. Bull NZ Natl Soc Earthq Eng 1986;19(4):272–84.

[26] **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.