



YIKICI SİSMİK YÜKLER ALTINDA SİLİNDİRİK ÇELİK SU TANKLARININ DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Ali İhsan ÇELİK^{1,*} , M. Metin KÖSE² , Tahir AKGÜL³ , Ahmet Celal APAY³ 

¹Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Tomarza, Kayseri, Türkiye

²KSÜ, Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Onikişubat, Kahramanmaraş, Türkiye

³Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Serdivan, Sakarya, Türkiye

⁴Düzce Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık, Düzce, Türkiye

ÖZET

Silindirik çelik sıvı tankları; su, petrol ve endüstriyel kimyasallar gibi çeşitli sıvıları depolamak için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca son yıllarda nükleer enerji santrallerinde soğutma amaçlı kullanımları yaygınlaşmaktadır. Çelik sıvı tanklarındaki petrol veya diğer tehlikeli kimyasallar, deprem esnasında oluşan hasarlar sebebi ile büyük finansal ve çevresel zarara neden olabilmektedirler. Önemli mühendislik yapıları olan bu tankların, doğal titreşim periyotları 0,1 sn.- 0,5 sn. aralığındadır. Bu kısa periyotta meydana gelen maksimum deprem enerjisinden dolayı tanklarda hasarlar oluşabilir. Bu çalışma için, silindirik çelik tanklardaki deformasyonlar, burkulmalar çok kısa sürede meydana geldiği için 0,22 saniyelik El-Centro deprem kaydı kullanılmıştır. Bununla birlikte, yıkıcı ve kısa süreli kuvvetler altında yapıların dinamik analizinde ANSYS Workbench “Explicit Dynamics” aracı çok iyi sonuçlar ürettiğinden, seçilen bu süre ve deprem verisi, doğrusal olmayan analiz için ideal olmuştur. Su ve tank duvarı arasındaki etkileşimi sağlamak için suyun modellenmesinde, “Eulerian Body” ağ tekniği, “Explicit Dynamics” aracında tercih edilmiştir. Analizde üstü-açık tank modeli, üstü-konik model ve üstü-kubbe şeklinde kapatılan model kullanılmış ve üç farklı cidar kalınlığı için analizler tekrar edilmiştir. Tank cidar kalınlığına ve tankın kapak şekline bağlı olarak, meydana gelen deformasyon ve burkulmaların sebepleri irdelenmiştir. Analiz sonucunda, silindirik çelik sıvı tanklarının kubbe şeklinde kapatılmasının deformasyonları ve burkulmaları azalttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çelik su tankı, “Explicit Dynamics” analiz, Sismik analiz, Deformasyon, Burkulma

ABSTRACT

Cylindrical steel tanks are widely used to store variety liquids such as water, petroleum, and industrial chemicals. They also have been becoming widespread for cooling in nuclear power plants last years. Steel liquid tanks can be exposed during earthquakes and also they can cause great financial and environmental damage with their containing petroleum or other hazardous chemical liquid. The natural vibration periods of these tanks, which are important engineering works, are in the range of 0,1 s - 0,5 s. If there is no mechanism to absorption the maximum earthquake energy that occurs in this short period, the tank will resonate and damage will occur. For this study, deformations in cylindrical steel tanks were used for earthquake recording of 0.22 seconds since buckling occurred in a very short period. In addition, this time and earthquake values are ideal for nonlinear analysis because ANSYS Workbench “Explicit Dynamics” tool provides very good results in the dynamic analysis of structures under destructive and short-term forces. In order to provide the interaction between the water and the tank wall, the “Eulerian Body” mesh technique is preferred in “Explicit Dynamics” model. In the analysis, an open-top tank model, a conical model and a torispherical closed model were used and the analyzes were repeated for three different tank wall thicknesses. Depending on the shell thickness of the tank and the shape of the tank roof, the causes of deformation and buckling were examined. As a result of the analysis, it was seen that torispherical closing of the cylindrical steel liquid tanks reduced deformation and buckling.

Keywords: Steel Water Tank, Explicit Dynamic Analysis, Seismic Analysis, Deformation, Buckling

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, ANSYS Workbench yazılımı içindeki “Explicit Dynamics” aracı kullanılarak silindirik çelik su depolama tanklarının doğrusal olmayan dinamik sismik analizi sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir. Karmaşık dinamik yapılar hakkında çoğunlukla fikir edinmek ve deneysel testler gerçekleştirmek çok pahalı veya zor olduğundan sonlu elemanlar metodunu kullanarak analizler

*Sorumlu Yazar: acelik@kayseri.edu.tr

Geliş: 23.12.2018 Yayın: 31.08.2020

gerçekleştirmek daha fazla avantaj sağlamaktadır. ANSYS Workbench “Explicit Dynamics” aracı son derece doğrusal olmayan, geçici dinamik kuvvetlere maruz kalan yapılar ve kısa süreli olayların fiziksel durumunu yakalamada tercih edilen önemli bir araçtır. Buradan yola çıkarak, “Explicit Dynamics” ile yapılan analizler sayesinde bir yapının, şiddetli yüklere maruz kaldığında nasıl tepki verdiğine ilişkin fikirler edinilebilir [1]. Explicit dinamik analiz metodu, büyük malzeme deformasyonlarını, arızaları, cisimler arasındaki etkileşimleri ve hızla değişen yüzeylere sahip olan sıvılar gibi karmaşık tepkileri doğru olarak tahmin etmektedir.

Silindirik çelik sıvı depolama tankları ile ilgili ilk çalışmalar; Cooper ve Wachholz [2], Long Beach (1933), Alaska (1964), San Fernando (1971), Imperial Valley (1979), Loma Prieta (1989), Landers (1992), Northridge (1994) ve Kobe (1995) depremlerinde, silindirik çelik petrol depolama tanklarının hasar durumları üzerine yapılmıştır [3]. Veletsos ve Yang(1977) [4], hidrodinamik akışkan yapı etkileşiminin sismik tepki üzerindeki etkisi ilk defa Haroun ve Housner(1981) tarafından araştırılmıştır[5]. Daha sonra diğer araştırmacılar, yerden destekli tankların sismik tepkisine yönelik araştırmalar yapmış ve bu yapıların deprem esnasında ortaya çıkardıkları hidrodinamik basınçları sergilemişlerdir [6-9].

Mohamadshahi, M. ve Afrous A.’ya göre depremden kaynaklanan titreşim kuvveti, tankta ve içindeki sıvının titremesine sebep olur; titremeye bağlı olarak, akışkan yüzeyinde dalgalar oluşturur ve bu dalgalar tank cidarında basınçlar oluşturur. Doğal titreşim frekansı duvarın frekansından çok daha düşük olduğunda sıvı titreşimi meydana geldiğinde ve sıvının titreşim genliği depremlerin frekansından etkilenir. Bu nedenle, eğer bu sorunlar tahmin edilmezse, tankların çatısı ve duvarları zarar görebilir. [10]. Şekil 1’ de silindirik tankın genelde üst tarafında meydana gelmiş deprem hasarları görülmektedir.



Şekil 1. Çalkalamanın neden olduğu tank duvarı ve üst kısmı hasarlıdır [10]

Yıkıcı deprem yükü altındaki silindirik çelik su tankları için yapılmış çok özel çalışmalar da vardır. Çelik A.İ. ve Akgül T., kısa süreli ani deprem yüklemesi altındaki üstü-açık silindirik çelik su tankının gerilme analizi için, akışkan yapı arasındaki etkileşimi, eularian body-shell (lagrange) element metodu ile gerçekleştirdiler. Bu çalışmada çalkalanma etkisine bağlı olarak tank duvarının üst taraflarında gerilmenin daha fazla meydana geldiği tespit edilmiştir [11].

Akira M. ve Katsuhisa F., akışkan ve yapı arasındaki birleşik titreşime ilişkin doğrusal olmayan bir dinamik analiz yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde, geometrisi doğrusal olmayan karakteristikleri ve Euler denklemini izleyen katı bir elemanı hesaba katan bir kabuk (shell) elemanı kullanılır. Akışkan ve yapı arasındaki analizde ALE yöntemi uygulanmış ve zaman-geçmiş (time history) tepki analizi için Explicit (belirgin) zaman entegrasyon yöntemi kullanılmıştır [12]. Vaibhav Mittal ve arkadaşları, coupled Euler - Langrange formülasyonu kullanarak, patlama altındaki silindirik çelik tank çeperinde meydana gelen maksimum çember gerilimini ve kesme gerilmelerini araştırmışlar, tanktaki gerilmelerin ve sıvı çalkalanma yüksekliklerinin, patlayıcı malzemenin azalan mesafesi ve artan en-boy oranı ile arttığını yani yükseklikten yarıçap oranına kadar arttığını gözlemlemişlerdir [13].

API-650 (American Petroleum Institute -650) standardı, çeşitli boyutlarda ve kapasitelerde dikey, silindirik, yerden destekli, üst kapalı ve açık, kaynaklı sıvı depolama tankları için malzeme seçimi, tasarım, imalat, montaj ve muayene için minimum gereksinimleri belirler ve bu standarda bağlı olarak API 650 Annex E ile, sismik analizler dede kullanılmaktadır. Spritzer J.M. ve Guzey S. API 650 Annex E ile çelik tankların sismik analizini Yeni Zelanda ve Japon standartları ile karşılaştırmalı olarak yaptıkları araştırmaya göre; deprem sırasında, tank içindeki sıvı, yatay olarak hızlanır ve tank duvarında kuvvetler meydana getirir. Ayrıca karşılaştırdıkları standartlarda, hidrodinamik çember gerilimi (hoop stress), su yükselmesi, taban gerilmesi ve burkulma gibi hasar durumlarını gözlemlemişler [14].

Son yıllarda, tank duvarı ve tank zemin esnekliği konularını kapsayan çelik depolama tanklarının sonlu eleman modellemesine (Finite Element Method-FEM) eğilim artmaktadır. Bu çalışmalardan biride Nicolici S. ve Bilegan R.M. tarafından, içi kısmen dolu çelik sıvı tanklarının akışkan-yapı etkileşiminin (Fluid Structure Interaction-FSI) modellenmesi şeklinde yapılan çalışmadır. Modellemede, çalkalanma dalgası genliği, konvektif mod frekansı, duvarlara uygulanan basınç ve çalkalanmanın etkisini tahmin etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamic-CFD) analizine odaklanılmıştır. Analiz sonucunda, akışkan yapı etkileşiminin çalkalanma etkisini etkilediği ve duvar elastikiyetinin impulsif basıncı artırdığı tespit edilmiştir [15].

Yerden destekli üstü açık depolama tankları üzerindeki sismik yüklerin, API 650'de kabul edilen rijit tanklarınkine kıyasla etkilerini belirlemek için doğrusal olmayan geometriye sahip kabuk(shell) elemanları metodu J.M. Spritzer ve S. Guzey, Abaqus CAE (v16.1) kullanarak sonlu eleman modelleri oluşturmuşlardır. Araştırmaya göre, tanklarda öngörülen hidrodinamik çember gerilmeleri, API 650 standartlarının sadece % 11'inde tespit edilmiştir [16].

Mahmoud R. Maheri ve arkadaşları, tankın geometrik en boy oranlarının yapısal tepkilere etkisini araştırmak için, 0,4 (bodur tank), 0,63 (orta boy tank) ve 0,9 (ince tank) çapa sahip üç modeli incelemişlerdir. Önerilen basitleştirilmiş mekanik model kullanılarak elde edilen sonuçlar, yöntemin, kabul edilebilir bir doğrulukla, sıvı dolu tankların sallanma sıklığını belirleyebildiğini göstermektedir. Ayrıca, başlangıçtaki tankın temel doğal frekansında, önemli ölçüde azalma olduğu gözlemlenmiştir [17].

Deprem yer hareketi altında tankın davranışını tespit etmek için hangi yöntemin belirleyici olabileceği üzerine çalışan Kamyar K. ve arkadaşlarının elde ettikleri sonuçlara göre, çelik tanklar için periyot değişim aralığı çok geniş olmadığından ve her zaman spektrumun sabit ivme bölgesinde yer aldığından, diğer hedef spektrumlara genişletilebilir [18].

Bağlantısız çelik tankların sismik tepkisini değerlendirmek için Ormeno M. ve arkadaşları tarafından iyileştirilme koşulları araştırılarak, ankrajsız dikey tankın tabandan yükselmesine bağlı olarak üst taraflardaki deplasman ve tank kabuğu ivmelenmesi artarken, eksenel basınç gerilmeleri, tankın yükselmesi ile % 35 ile % 64 arasında azaldığı tespit edilmiştir [19].

Burkulma analizi, çelik tankların ince cidarlı olmalarından dolayı tasarımında önemli rol oynar. Buratti N. ve Tavano M. tarafından yapılan çalışmada, dinamik burkulmanın çeşitli yönlerini araştırmak için tankın sonlu elemanlar modelinde, sıvıyı modellemek için kütle ekleme yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada özellikle, tepe yer değiştirmesi ve tank duvarlarının maksimum nispi yer değiştirmesi göz önüne alınmıştır [20].

Luis A. Godoy, son yirmi yılda, çelik dikey çelik sıvı tankları alanındaki tüm konuları kapsayacak şekilde statik veya yarı statik yükler altında, basınç, rüzgâr, temel yerleşimi ve yangın dâhil olmak üzere burkulma problemlerine dair bir derleme yapmıştır. Her durumda burkulma statik bir süreç olarak kabul edilmiştir. Bu yapısal formun neye özgü olduğunu anlamak için ilk olarak tankların yapısal

konfigürasyonu tanımlanmış ardından, kararlılık ve burkulma için teorik çerçeve kısaca tanımlanmış ayrıca tankların karakteristiği ile ilgili iyileştirmeler yapılmıştır [21].

Djermane M. ve arkadaşları, dinamik burkulma direncinin artırılması amacıyla, üç deprem kaydı altında farklı geometrik parametrelere sahip tankları kullanarak elde ettikleri sayısal analiz sonuçlarını iki tasarım standardı ile elde edilen dinamik burkulma sonuçları ile karşılaştırmayı denemişlerdir. Geniş ve uzun tanklar için yaptıkları karşılaştırmada, tasarım standartlarının dinamik burkulma kriterlerinin belirlenebilmesi için revize edilmeye ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir [22].

Bu çalışmada, suyla doldurulmuş dikey silindirik çelik tanklarda yerel zemin hareketlerine bağlı olarak meydana gelen, hidrodinamik basınçlardan kaynaklı deformasyonlar ve burkulmalar gözlemlenmiştir. Çalışmadaki sayısal simülasyonlar ve analizler ANSYS Workbench “Explicit Dynamics” aracıyla gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda, “Explicit Dynamics” sonlu elemanlar yöntemi, çarpışma deneylerinde yaygın olarak kullanılmakta ve büyük ölçekli temas problemleriyle başa çıkmada avantajlar sağlamaktadır. Workbench Explicit Dynamics, genellikle üç boyutlu, doğrusal olmayan yapıdaki yüksek hızlı çarpışmalar, patlamalar ve metal oluşumunun doğrusal olmayan teması, yükün etkisi gibi çeşitli doğrusal olmayan problemleri çözebilmektedir. Sıvı ihtiva eden dinamik yapıların sonlu elemanlar analizinde sıvıyı doğru modellemek ve yapı ile olan etkileşimi doğru tanımlamak önemlidir. Yukarıda belirtilen çalışmalarda kullanılan FEM tekniğinde, tank içindeki sıvı genellikle katı (solid) bir eleman veya sıvı (fluid) eleman olarak tanımlanmıştır. Fluid eleman olarak tanımlansa bile kullanılan mesh tekniği sıvı gibi davranmasını sınırlandırmaktadır. Bu çalışmada ise sıvı için “eularian” mesh tekniği sıvının dinamik hareketini ve tank duvarı ile olan etkileşimi için daha doğru bir seçenek olarak kabul edilmektedir. “Explicit Dynamics” analiz metodu kullanılarak tank duvarı ile sıvı arasındaki etkileşim sayesinde ideal sonuçlar elde edilmektedir. Bu metod, daha önce dışarıdan patlamaya maruz kalmış ve gaz basıncına bağlı patlamalardan dolayı hasara uğrayan tanklar için kullanılmıştır. Ancak ilk kez bu çalışmada, yıkıcı deprem yüklemesine maruz kalan silindirik çelik tanklarda kullanılmıştır. Sıvı ihtiva eden tanklarda, tankın cidarı ve sıvının etkileşimi ile ortaya çıkan titreşim modlarının periyotları 1 saniyeden daha azdır. Bu yüzden, tankların dinamik analizlerinde kullanılacak deprem kayıtlarının davranış ivme spektrumlarının tasarım ivme spektrumu ile spektrumun yüksek periyotlu bölgeleri ile uyumlu olması gerekir [23]. Explicit dynamics analizin özelliği de dikkate alındığında kısa süreli bir deprem kaydı ile tanklardaki doğrusal olmayan deformasyonları yakalamak mümkündür. Analizler, aksenal deformasyon (directional deformation) ve burkulma (buckling); üstü-açık, üstü-konik kapalı ve üstü-kubbe şeklinde kapalı silindirik üç tank modeli için 0,22 saniyelik El-Centro deprem yükü altında üç farklı cidar kalınlığı ile gerçekleştirilmiştir.

Silindirik çelik tanklarının imalatlarının diğer modellere göre daha kolay olması kullanımlarını her geçen gün yaygınlaştırmaktadır. Bununla birlikte bu tankların sismik analizleri, içerdikleri sıvının dinamik hareketlerinden dolayı çok karmaşıktır. Yapılan ilk saha çalışmalarına göre hazırlanan bazı standartlar bu tankların karakteristiğini belirlemede yetersiz kalmaktadır. Bu ince cidarlı tankların, doğal titreşim periyotları 0,1 sn.- 0,5 sn. aralığındadır. Bu kısa periyotta meydana gelen maksimum deprem enerjisinden dolayı tanklarda hasarlar oluşabilir [8]. Çünkü, bu periyot aralığı kuvvetli yer hareketlerinin maksimum enerjisiyi içerdiği periyot aralığına denk gelmektedir, eğer bu maksimum enerjisiyi sönmüleyecek bir mekanizma olmazsa yapı rezonansa girebilir [24]. Sismik sarsıntı esnasında, meydana gelebilecek maksimum deprem enerjisine bağlı olarak tanklarda ciddi hasarlar meydana gelebilir. Bu çalışmada tankların hasar görme durumları direk olarak incelenmektedir. Analizlerde tank duvar kalınlığı API 650 standardına göre 6 mm olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra kalınlık önce 2 mm artırılarak, sonra 2 mm azaltılarak simülasyonlar tekrarlanmış ve kalınlığa bağlı deformasyonun ve burkulmanın tank kapağı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Silindirik çelik tanklarla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların çoğunda, sıvı-cidar etkileşimi (fluid-structure interaction) tam olarak modellenemediğinden, elde edilen sonuçlarda tank cidarı ve sıvı için ayrı ayrı sonuçlar gösterilmiştir. “Explicit Dynamics” simülasyon metodunda, sıvı-cidar etkileşiminde sıvı için Eularian body ağ yapısı, cidar için Lagrangian ağ yapısı tekniği kullanılarak, ikisi arasındaki sürtünme ve dinamik etkileşim

gerçeğe uygun olarak modellenir ve sonuçta sıvı ile tank cidar hareketleri birlikte gözlemlenir. Depremlerde meydana gelen hasar şekilleri ile Explicit Dynamics’in bu modelleme tekniği ile elde edilen deformasyon ve burkulma şekilleri çok yakın benzerlikler göstermektedir. Bu sayede, simülasyonlar devam ettirilerek, birçok gerçek hasar şekli elde edilebilir. Hatta aşırı yüklemekten dolayı patlama meydana gelmiş tank analizi ile içindeki sıvının tahliye oluşu birlikte modellenerek gelecekte tanklardaki patlamaların önüne geçilebilir.

2. SAYISAL SİMÜLASYON METODU

ANSYS Workbench Explicit Dynamics; katı, sıvı, gazların ve bunların etkileşimlerinin doğrusal olmayan dinamik davranışını içeren bir sonlu elemanlar analiz metodudur. Tipik bir simülasyon, modeli, etkileşimleri ve uygulanan yükleri ayarlamak, yüklerin ve etkileşimlerin zamana bağlı olarak modelin doğrusal olmayan dinamik tepkisini çözmek ve ardından çeşitli mevcut araçlar ile sonuçları incelemekten oluşur.

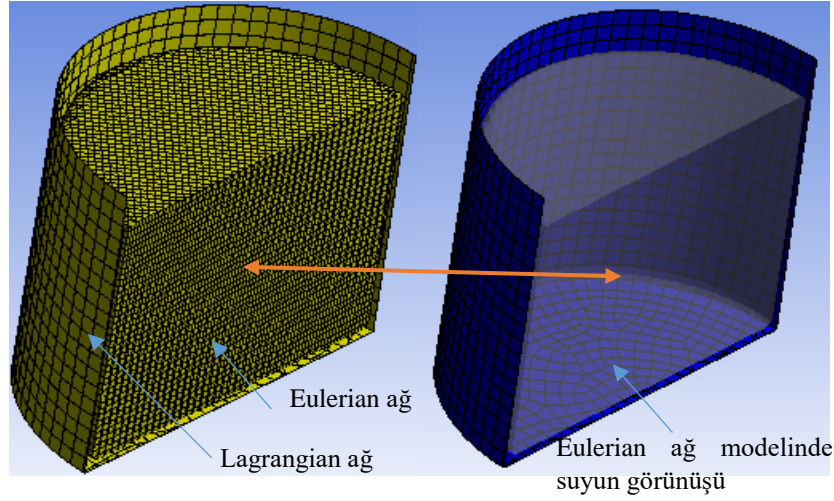
“Explicit Dynamics” uygulamasında, bir simülasyonun farklı adımları boyunca rehberlik eden bir ağaç yapısında düzenlenmiş nesnelere bulunur. Bu nesnelere genişletilerek, nesneyle ilişkili ayrıntılar ortaya çıkarılır ve simülasyonun bu bölümünü gerçekleştirmek için, ilgili araçlar ve tanımlama tabloları kullanılabilir. Nesnelere, örneğin temas yüzeyleri ve yüklemeler, çevresel koşulları tanımlamak ve gözden geçirilmek üzere sunulmak istenen sonuç türlerini tanımlamak için kullanılır.

Doğrusal olmayan Explicit Dynamics analiz için model tanklar ve suya ait değerler Tablo 1’de gösterilmektedir. Bu değerler Amerika Petrol Enstitüsü (API 650) tarafından çelik silindirik su tankları için belirtilen standartlar dikkate alınarak belirlenmiştir [25].

Tablo 1. Model tanklar ve suya ait parametreler [3]

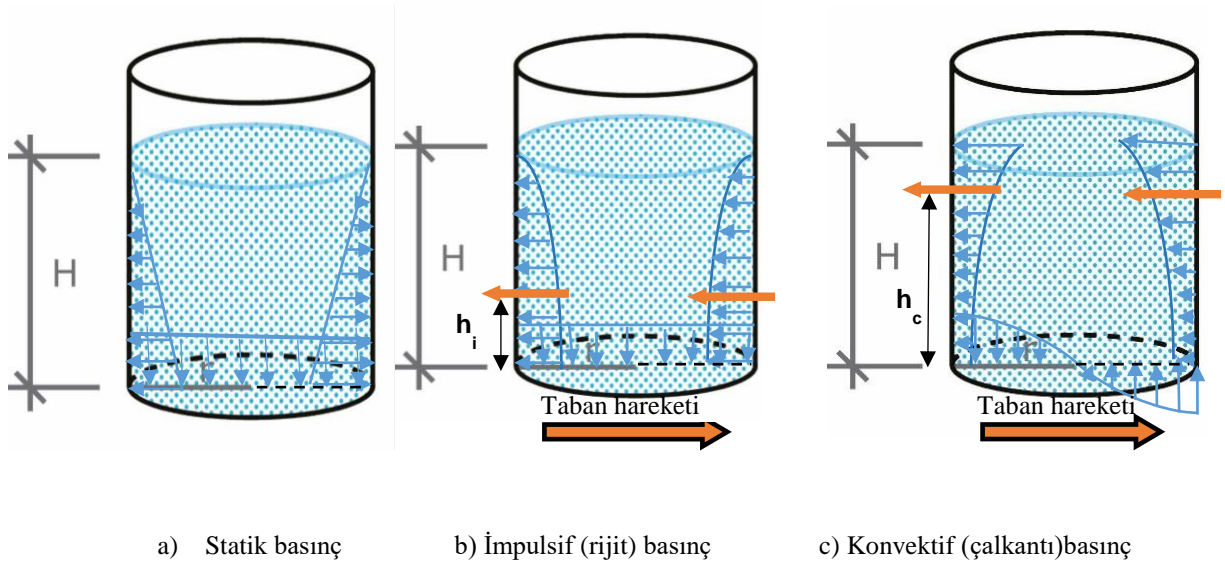
Parametreler ve birimleri	Açık	Konik	Kubbeli
Tankın Çapı m.	15,08	15,08	15,08
Tankın” Yüksekliği m.	11,31	11,31	11,31
Su Yüksekliği m.	10	10	10
Duvar Kalınlığı mm.	4, 6, 8	4, 6, 8	4, 6, 8
Çelik Tank Yoğunluğu	7850	7850	7850
Suyun Yoğunluğu kg/m ³	1000	1000	1000
Tankın Young Modülü Gpa.	200	200	200
Çeliğin Poisson Oranı	0,3	0,3	0,3
Suyun bulk modülü GPa	2,2	2,2	2,2

“Explicit Dynamics” sonlu elemanlar analizini, diğer sonlu eleman tekniklerinden ayıran en önemli özelliği, çelik gövde ve su arasındaki etkileşimi (interaction) sağlamak için çelik gövde için Lagrangian ağ yapısı, suyu modellemek için Eulerian body ağ yapısı tekniğini kullanmasıdır. Şekil 2’de yarım geometrisi görülen modelde düzgün ağ yapısı için 24712 bağlantı (node) ve 22570 element kullanılmıştır.



Şekil 2. Tankların ağ yapısı modeli

Silindirik tanktaki hidrostatik basınç tabana doğru artan düzgün üçgen şeklindedir. Diğer taraftan deprem yer hareketine bağlı olarak meydana gelen hidrodinamik basınç ikiye ayrılmaktadır. Tankın alt kısmındaki sıvı, tank ve temel ile birlikte sanki katıymış gibi hareket ederken, tankın üst tarafındaki sıvı tank ile ters yönde hareket etmektedir [25]. Hidrodinamik basınç aynı yönde hareket ettiğinden tankın hem duvarında hem de dibinde hasara neden olabilmektedir. Üst taraftaki çalkalanmalar özellikle tankın üst bölgelerinde deformasyona neden olmaktadır. Statik sıvı basıncı sadece tabanda etki yapmaktadır (Şekil 3 (a)), duvarlardaki etkisi, eksenin iki tarafında eşit olduğundan değeri sıfırdır. İlk defa Housner (1954), tarafından tanımlanan, impulsif (rijit) ve konvektif (çalkalanma) kütlelerinden kaynaklanan hidrodinamik basınçlar ise Şekil 3 ((b) ve (c))'de gösterilmektedir [26-28].



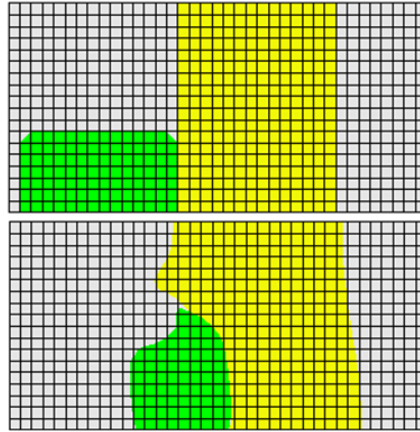
Şekil 3. Statik, İmpulsif ve Konvektif sıvı Basınçları [3]

“Explicit Dynamics” analiz ile 1 saniyeden daha az zaman ölçeğine sahip olaylar (genellikle 1 milisaniyelik) hiperlastisite, plastik akışlar, arızlar ve çökme gibi geometrik deformasyonlar simüle edilebilmektedir [29]. Dolayısıyla silindirik çelik tanklarda zamana bağlı kısa süreli ve hızla değişen yüklerden dolayı oluşan plastik deformasyonları gözlemek için “Explicit Dynamics” analiz tercih edilmiştir.

2.1 Eulerian (Sanal) Yapı Referansı

“Explicit Dynamics” analizinde tanktaki su Eulerian body ağ yapısı ile modellenir. Eulerian referans çerçevesinde, örgü simülasyon boyunca sabit kalır. Malzeme ağ üzerinden akar. Bu nedenle, örgü bozulma problemlerine maruz kalmaz ve malzemede büyük şekil değişimleri gözlemlenebilir. Hesaplama maliyeti ve malzeme arayüzlerinin yaklaşık takibi nedeniyle, Eulerian referans çerçevesi yalnızca malzemenin çok büyük deformasyonu veya akışı beklendiğinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yer hareketine bağlı hidrodinamik basınçlar nedeniyle çelik tankta meydana gelen plastik malzeme akışları, Eulerian referans çerçevesi kullanılarak gözlemlenmiştir.

Simülasyon sırasında malzeme bir hücreden diğerine akmaktadır. Hesaplamadaki bazı aşamalarda belirli bir hücrenin birden fazla malzeme içermesi muhtemeldir. Boşluk (boş alan) da bu anlamda bir materyal olarak kabul edilmektedir; Şekil 4’ te bir malzemenin başka bir malzeme üzerine akışı görülmektedir.



Şekil 4. Eulerian malzeme akışı [27]

Her bir hücredeki malzeme miktarını izlemek için bir sıvı hacim (Volume of Fluid) yöntemi kullanılır. Her malzemenin bir hacim oranı vardır ve her maddenin hacim oranının toplamı, boşluk hacminin fraksiyon (bölüntü) toplamına eşittir [28].

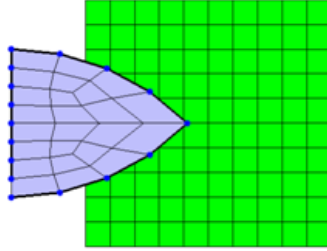
$$\sum_{i=1}^{i=nmat} F_i + F_{void} = 1 \quad (1)$$

2.2 Explicit Akışkan-Yapı Etkileşimi

“Explicit Dynamics” sisteminde katı cisimlere Lagrange referans çerçevesi veya Eulerian (Sanal) referans çerçevesi atanabilir. Referans çerçeveleri, modellenmekte olan her malzeme türüne en iyi çözüm tekniğinin uygulanmasına izin vermek için simülasyonda birleştirilebilir. Simülasyon sırasında, iki referans çerçevesinde temsil edilen cisimler birbirleri ile otomatik olarak etkileşim kuracaklardır. Örneğin, eğer bir gövde bir Lagrangian referans çerçevesi kullanılarak çelik ile doldurulursa ve bir başka gövde Eulerian referans çerçevesi kullanarak su ile doldurulursa, iki yapı temas ederse birbirleriyle

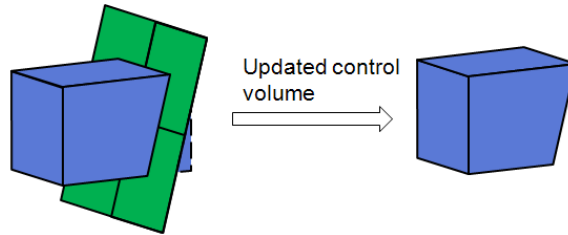
otomatik olarak etkileşime girerler. Eulerian ve Lagrangian cisimler arasındaki etkileşim, “Explicit Dynamics” sisteminde sıkıca bağlı iki yönlü akışkan-yapı etkileşimi için bir olanak sağlar.

Aşağıdaki basit örnekte, Lagrangian referans çerçevesine (mavi) sahip bir gövde, Eulerian referans çerçevesi bulunan bir gövde üzerinde soldan sağa doğru ilerlemektedir. Gövde hareket ettikçe, Eulerian hücrelerindeki kademeleri ve yüzlere aşamalı olarak örtüşerek Eulerian alanında bir sınır hareketi olarak işlev görür. Bu, Eulerian etki alanında malzeme akışı oluşturur. Aynı zamanda, Eulerian etki alanında, hareket eden Lagrange bünyesinde dış kuvvetlerin uygulanmasına neden olacak bir stres alanı gelişecektir. Bu kuvvetler Lagrange bünyesinin hareketine ve deformasyonuna geri dönecektir [30].



Şekil 5. Eulerian referans çerçevesi [30]

Şekil 6’deki örneğe daha ayrıntılı bakılırsa, Lagrange bünyesi Eulerian alanının bölgelerini kapsar. Lagrange ve Eulerian gövdeleri arasındaki kesişim, kütle, momentum ve enerjinin korunum denkleminin çözüldüğü güncellenmiş bir kontrol hacmiyle sonuçlanır.



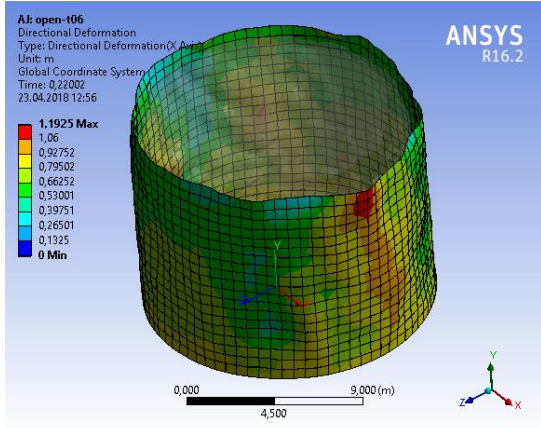
Şekil 6. Güncellenmiş kontrol hacmi [30]

3. “EXPLICIT DYNAMICS” FEM ANALİZİ

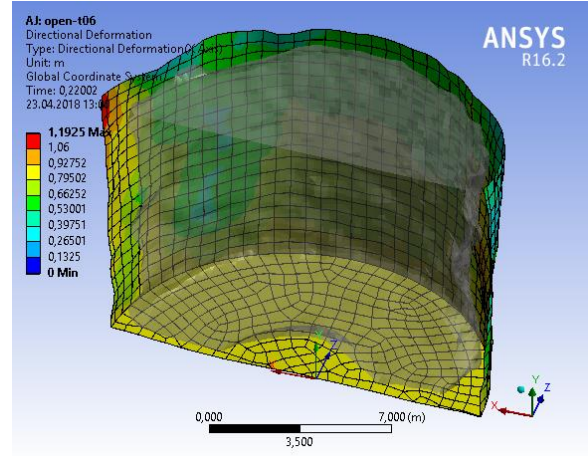
“Explicit Dynamics” kurulum süreci, ön hazırlık, yürütme ve sonuçlar olarak adlandırılan üç ardışık adımdan oluşur. İlk adımda, “Explicit Dynamics” tool yardımı ile geometri oluşturulur. Daha sonra suyun özellikleri "Engineering Data" seçeneğinin altında tanımlanır. Yoğunluk ve izotropik gibi eklenir ve fiziksel özelliklerini açarak ve belirtilen malzemeye bırakarak tanımlanabilir. Su sıkıştırılmaz olduğu için Poisson oranı 0.49999999 şeklinde tanımlanmalıdır.

3.1. Eksenel Deformasyon

Analiz için bütün ayarlamalar yapıldıktan sonra model olarak kullanılan tankın X eksenine göre “Directional Deformasyon” sonuçları Şekil 7, 8 ve 9’da gösterilmiştir. Suyun duvarlardaki çarpma etkisini görebilmek için tam ve yarım geometri şeklinde verilen şekillerde, eksenel deformasyonun, hidrodinamik konvektif (çalkalanma) basıncından kaynaklanan etkisinin, çelik tankın üst tarafında daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Üstü açık tank modelinde maksimum deformasyon 1,192 m. dolaylarında meydana gelmiştir. Tank cidarı incelendiğinde deformasyonun alt bölgelerde daha yaygın olduğu, fakat maksimum deformasyonun çalkalanma (sloshing) etkisi ile tank cidarlarının üst taraftarlarında olduğu görülmüştür.



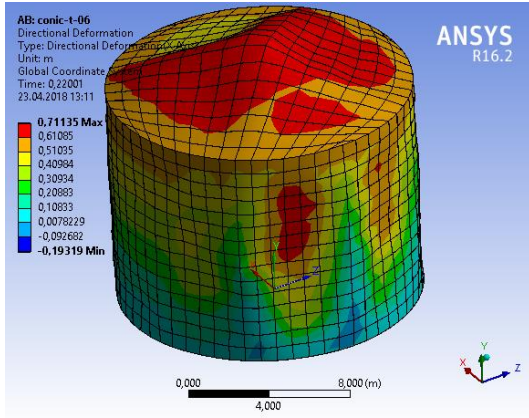
a) Directional Deformation



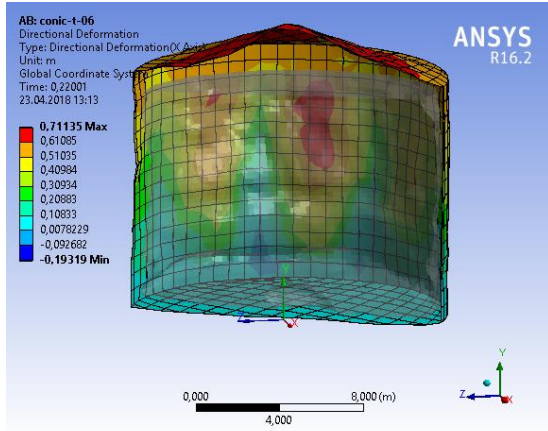
b) Directional Deformation yarım geometri

Şekil 7. Model tankın eksenel deformasyonu

Tankın Şekil 8’da konik olarak kapatılması deformasyonu bir miktar düşürerek, deformasyonun daha üst taraflara yayılmasına sebep olmaktadır. Maksimum deformasyon tepe noktada 0,711 mm seviyelerinde olsa da deformasyonun tank kapağına yayılarak artması dikkat çekicidir.



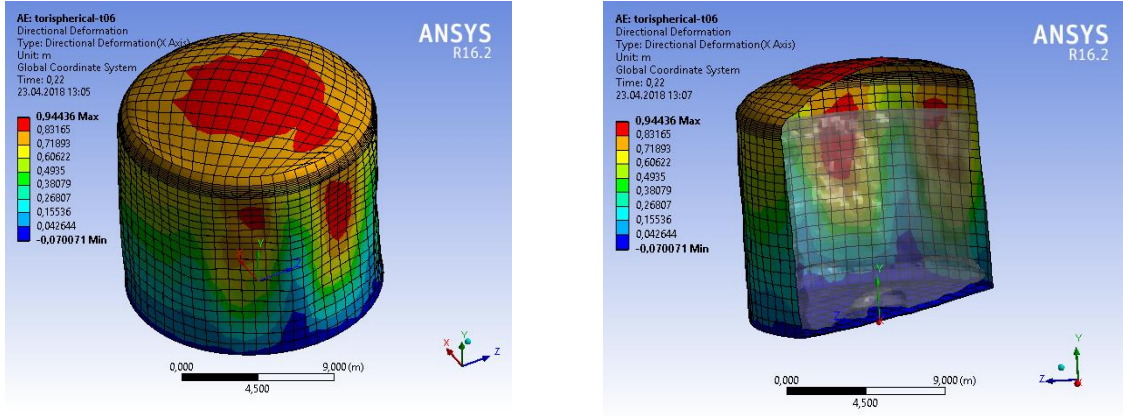
a) Directional Deformation



b) Directional Deformation yarım geometri

Şekil 8. Konik tankın eksenel deformasyonu

Tankın kubbe şeklinde kapatılması açık modele göre deformasyonu bir miktar düşürmekle birlikte, deformasyonun kubbeye yayılması dikkat çekmektedir. Kubbeli modelde 0,944 m civarında maksimum deformasyon oluşmuştur. Burada açık modelin X ekseninin her iki tarafında, deformasyonun meydana geldiği gözlemlenirken, konik ve kubbeli modelde sadece bir taraftan deformasyonun meydana gelmesi dikkat çekmektedir. Ayrıca Şekil 8 ve 9 da dikkat edilirse, konik modelin çatısı deforme olurken kubbeli modelin çatısında fazla hasar görülmemektedir.

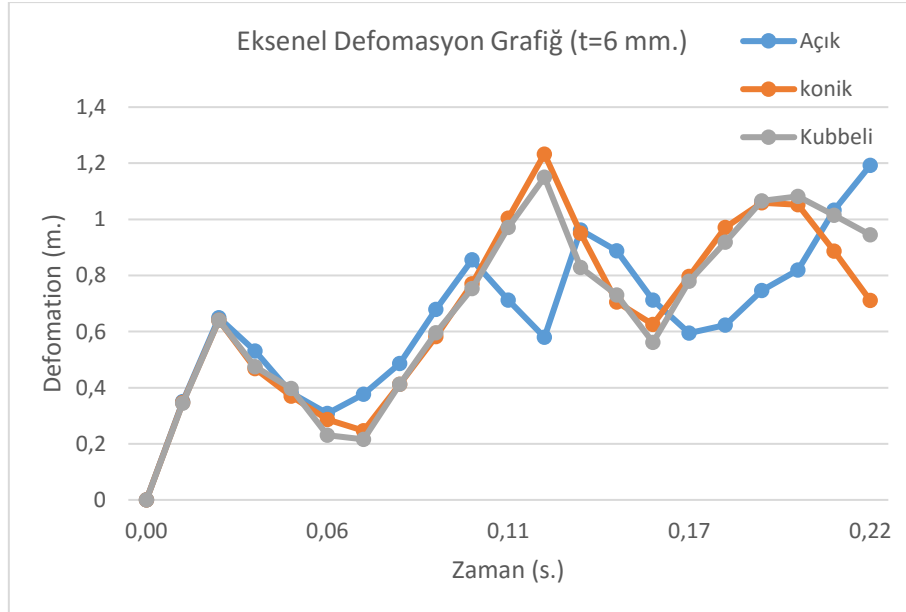


a) Directional Deformation

b) Directional Deformation yarım geometri

Şekil 9. Kubbeli tankın eksenel deformasyonu

Şekil 10’de eksenel deformasyon grafiği görülmektedir. Bütün modellerde 0,02 saniyeden sonra plastik şekil değişimi başlamıştır. Maksimum gerilme 0,12. Saniyede konik modelde 1,233 m olarak meydana gelirken aynı anda kubbeli modelde 1,15 m olarak oluşmuştur. 0,22 saniyede konik ve kubbeli modelde düşüş yaşanırken açık modelde 1,192 m olarak gerçekleşmiştir. Son andaki bu yükseliş açık modelde çalkalanma (sloshing) etkisinin devam ettiğini göstermektedir.



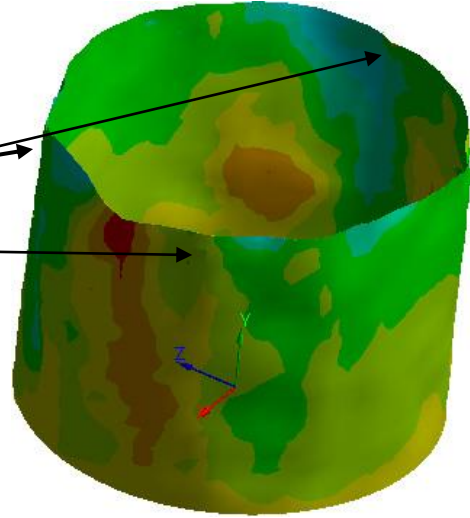
Şekil 10. Eksenel deformasyon grafiği (t=6 mm.)

3.2 Burkulma Analizi

Silindirik çelik tanklarda en çok meydana gelen burkulma nedenlerinden biri de aşırı çalkalanma etkisi ile üst taraflarda meydana gelen burkulmadır. Buna bağlı olarak meydana gelmiş bir hasar ve “Explicit Dynamics” analiz ile elde edilmiş çökme Şekil 11 ve 12 de gösterilmektedir. FEM ile elde edilen sonuç gerçekten meydana gelmiş göçük ile benzerlikler göstermektedir. Ayrıca tankın alt bölgelerinde elmas şekline benzer burkulmalar görülmektedir.

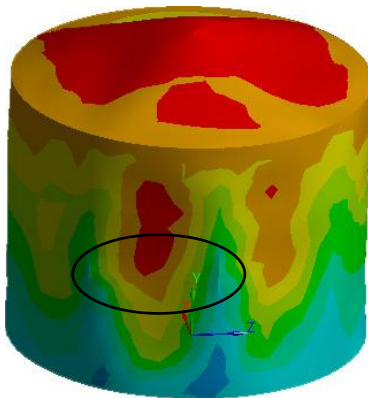


Şekil 11. Depremde oluşmuş çöküntü

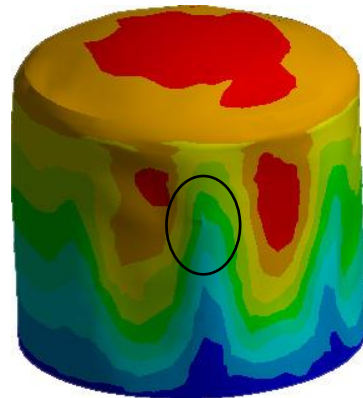


Şekil 12. FEM ile elde edilmiş çöküntü

Deprem süresine bağlı silindirik sıvı tanklarında bu tür çöküntüler daha da artabilir. Bunun nedenlerinden biri de tankların doğal titreşim periyodlarının ani aralığında meydana gelmesidir. Bu aralıkta maksimum deprem enerjisi meydana gelirse, tanklarda büyük deformasyonlar ve çatlaklar oluşabilir. Bu sorunu çözmek için Malhotra, P., sismik izolasyon metodu geliştirmiştir. Tankların tabanında oluşturulan sismik izolasyon ile yapının doğal titreşim periyodu uzatılarak rezonans aralığından uzaklaştırılmaya çalışılmıştır [8]. Sismik izolasyon metodu pahalı ve mevcut yapılara uygulanması zor olduğundan her zaman tercih edilecek pratik bir çözüm değildir. Çelik, A.İ ve Akgül T. Tarafından, üstü açık silindirik çelik tank epoxy-carbon kompozit malzeme ile sarılarak, cidardaki burkulmalar bir miktar azaltılmıştır [11]. Bu bölümde, tank kapak modelinin burkulma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 11’de dikkat edilirse, burkulma, X ekseninde silindirik tankın her iki tarafında da meydana gelmiştir. Şekil 13’de tank konik olarak kapatıldığında burkulma sadece bir tarafta meydana gelmektedir. Fakat çatıda meydana gelen aşırı deformasyondan dolayı bir miktar burkulma oluşmuştur. Şekil 14’te tank kubbe biçiminde kapatıldığında, duvardaki burkulma, eksenin sadece bir tarafında meydana gelmiştir. Kubbeli modelde konik modelde olduğu gibi gerilmeler çatıda artmış görülmüyor, fakat çatı ile duvarın birleşiminde çok az bir burkulma meydana gelmiştir.



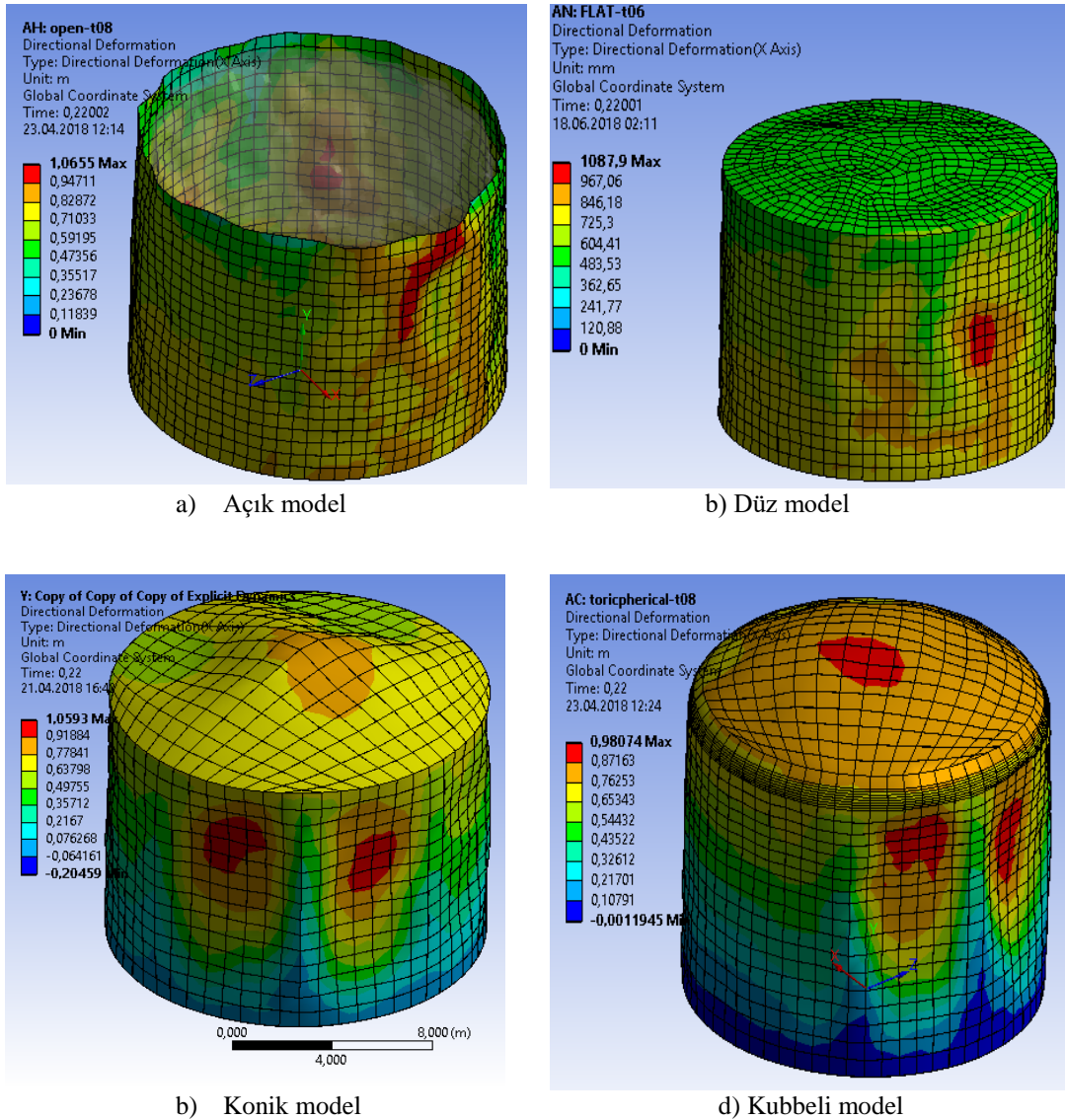
Şekil 13. Konik tankta burkulma



Şekil 14. Kubbeli tankta burkulma

2.3 Farklı cidar kalınlıklarıyla analiz

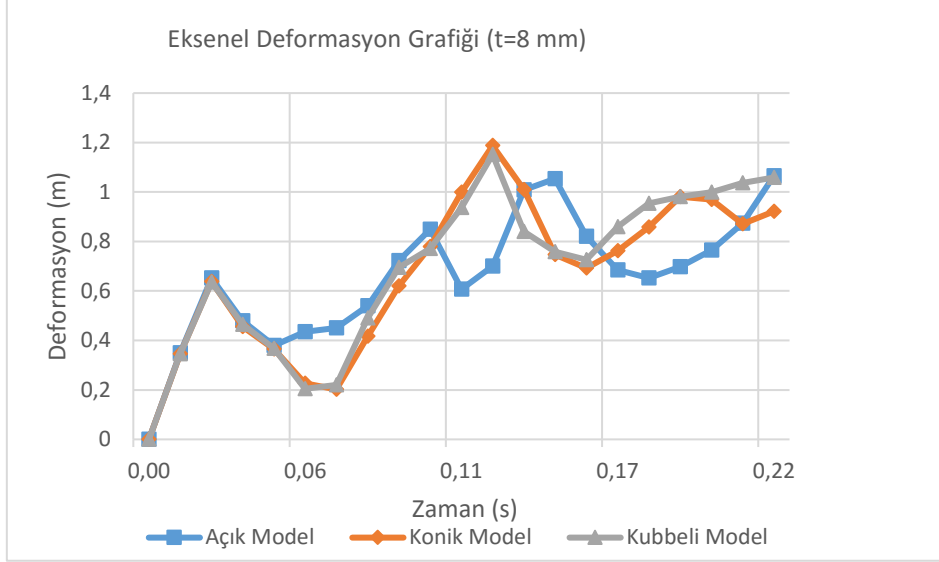
Bu çalışmada kullanılan tank için API 650 standardında belirlenen en uygun tank cidar kalınlığı 6 mm dir. Kalınlığın tank kapak şekline göre etkilerini görebilmek için analizler öncelikle 2 mm artırılarak 8 mm duvar kalınlığı tekrarlanmıştır. Daha sonra kalınlık 2 mm azaltılarak 4 mm kalınlık için aynı şekil de analizler tekrarlanmıştır. Şekil 15’ da 8 mm duvar kalınlığı ile yapılan analizlerde maksimum deformasyonlar sırasıyla açık modelde 1,065 m., konik modelde 1,059 m ve kubbeli modelde 0,980 m olarak gerçekleşmiştir. Açık modelde X ekseninin her iki tarafında meydana gelirken, konik ve kubbeli modelde sadece bir tarafta meydana gelmiştir. Açık tank modelinde kapalı modellere göre daha fazla burkulma görülmektedir. Kapalı modellerin çatısında deformasyon azalmış görülsede bir miktar burkulma her ikisinde de oluşmuştur.



Şekil 15. Duvar kalınlığı 8 mm için aksenal deformasyon

Tank şekillerinin yanı sıra Şekil 16’ da ki karşılaştırma grafiği incelendiğinde üç modelde de plastik şekil değişimi 0,035 sn. den sonra başlamış görülüyor. Açık model grafiğinde çok dalgalanma olduğu ve simülasyonun sonlarına doğru, çalkalanma etkisinin hala devam etmesi ile deformasyonun artışta olduğu gözlenmektedir. Grafikte iniş çıkışların fazla olması, duvarlarda burkulma bölgelerini

artırmaktadır. Konik model ile kubbeli modeli grafiği başlangıçta benzer hareketler yaparken, sonlara doğru deformasyonun düşüşte olduğu, özellikle kubbeli modelde deformasyonun azaldığı gözlemlenmektedir.

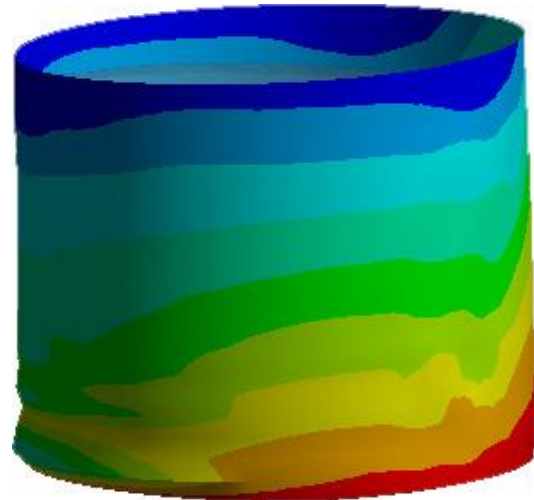


Şekil 16. Duvar kalınlığı 8 mm. için deformasyon grafiği

Silindirik çelik tanklarda deprem etkisi ile oluşan en önemli burkulma şekillerinden biri de fil ayağı burkulmasıdır. Şekil 17’de 1999 Marmara depremi esnasında TÜPRAŞ rafinerisindeki tankta oluşmuş fil ayağı burkulması görülmektedir. Şekil 18’deki FEM model 4 mm kalınlıkta gerçekleştirilmiştir. Tankın dibine dikkat edilirse Şekil 18’dekine benzer fil ayağı burkulması meydana gelmiştir. Deprem esnasında bir yapının elastik şekil sınırlarını aşarak bir miktar plastik deformasyona uğraması istenen bir durum olabilir, fakat TÜPRAŞ gibi yanıcı madde depolamada kullanılan önemli çelik tankların hasar görmesi istenmeyen bir durumdur.

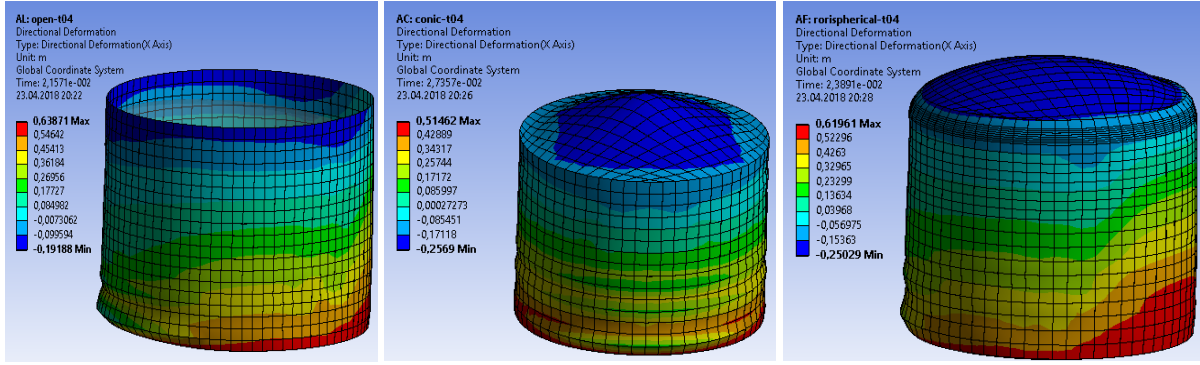


Şekil 17. Fil ayağı burkulması TÜPRAŞ (1999)



Şekil 18. Sem modelde fil ayağı burkulması

Şekil 19’de önceki modellere göre deformasyon değerleri daha az görülmektedir. Fakat duvar kalınlığı düşük (4 mm) olduğundan hidrostatik sıvı basıncı etkisi ile yerel zemin hareketi başlangıcında hemen elastik deformasyon sınırlarını aşarak tankın dibinde kalıcı fil ayağı burkulması meydana gelmiştir.



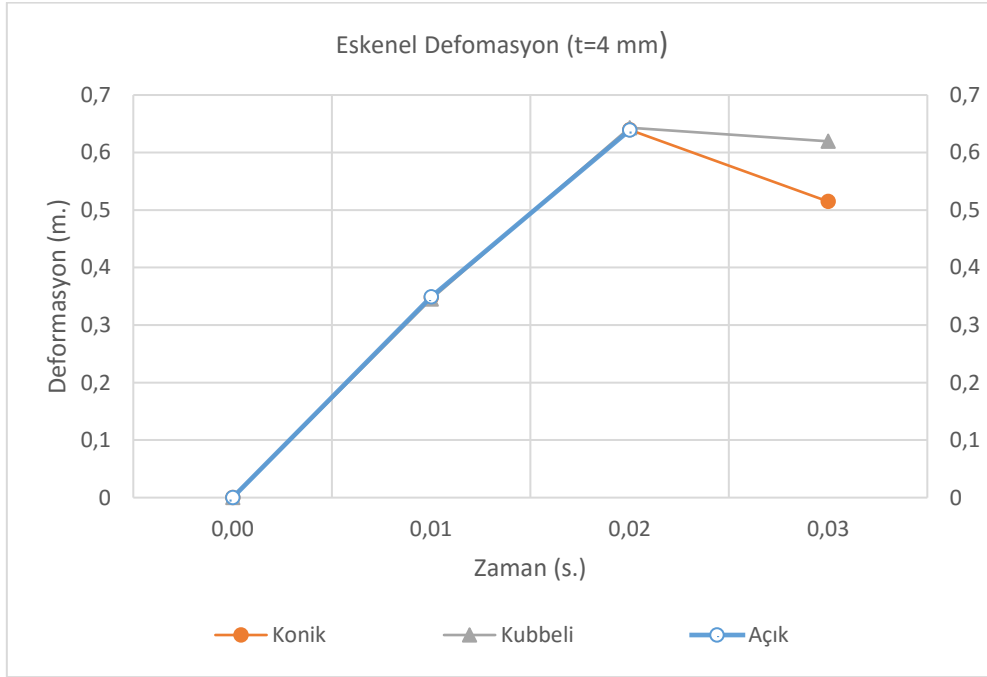
a) Açık model

b) Konik model

c) Kubbeli model

Şekil 19. Tanklarda fil ayağı burkulması

Şekil 20’de 4 mm. kalınlığındaki tankların deformasyon karşılaştırması görülmektedir. Burada cidar kalınlığının ince olmasından dolayı yapı, hidrostatik basınç etkisi ile kısa sürede fil ayağı burkulmasına uğruyor.



Şekil 20. Tanklarda fil ayağı burkulması

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Silindirik çelik su tankları önemli mühendislik yapıları olduğundan, depreme bağlı ani ve yıkıcı kuvvetlerin altında deforme olmaları istenmeyen bir durumdur. Bu yapıların sismik analizleri içerdikleri sıvının dinamik hareketlerinden dolayı çok karmaşıktır. Bu karmaşıklık ve dinamik analizin zorluğundan dolayı, silindirik çelik sıvı tanklarının sismik analizi araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Şimdiye kadar yapılan çalışmaların çoğu, sismik yükleme altında uzun süreli zamana bağlı transient dinamik davranışlarla ilgili olarak yapılmıştır. Silindirik çelik tankların doğal titreşim periyotları 0,1 sn. -0,5 sn aralığında değişmektedir. Plastik deformasyonlar genellikle kısa süre içinde meydana geldiğinden 0,22 saniyelik El-Centro deprem yükü ile kısa süreli dinamik analizlerde etkili sonuçlar vermiştir. “Explicit Dynamics” sonlu eleman analizi ile daha önceki sonlu eleman analizlerinde olmayan

tank üzerindeki deformasyon ve burkulma bölgeleri ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen en önemli bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- Analizler, silindirik çelik tankların hasara uğradığı periyotta gerçekleştirilmiş ve gerçeğe yakın deformasyon ve burkulma şekilleri elde edilmiştir. Bu burkulmalar özellikle Şekil 11-12 ve Şekil 17-18 de, gerçekte meydana gelmiş ve bu çalışmadan elde edilen burkulma şekilleri birlikte gösterilerek ispatlanmıştır.
- Farklı cidar kalınlığı ile tekrarlanan simülasyonlarda (4 mm., 6 mm., 8 mm.), bütün modellerde plastik deformasyonun 0,02. saniyeden sonra başladığı gözlemlenmiştir.
- Silindirik çelik su tankındaki deformasyon, ani deprem hareketlerinden dolayı içerdiği suya bağlı olarak oluşan hidrodinamik basınçlardan kaynaklanmaktadır. Tankın üst tarafında meydana gelen konvektif su kütlesi ile oluşan dalgalanma üst taraflarda maksimum deformasyona sebep olmaktadır.
- Silindirik çelik tanklarında meydana gelen elmas şekilli burkulma ve fil ayağı burkulması FEM ile gerçeğe benzer şekilde elde edilmiş ve bu burkulmaların oluş sebepleri üzerinde durulmuştur. 6 mm olarak belirlenen tank kalınlığına rağmen, burkulmaların oluşması standartların yetersizliğini göstermektedir. Ayrıca 4 mm cidar kalınlığında fil ayağı burkulmasının meydana gelmesi, depremde meydana gelen en yaygın hasar tipi olarak dikkat çekmektedir.
- “Explicit Dynamics” analiz ile aşırı deprem yüklemesi altında patlamaya maruz kalan tanklar içerdikleri sıvının tahliyesi ile birlikte simüle edilerek yapılacak analizler neticesinde, patlamayı engelleyici tedbirler alınabilir.
- Türkiye’de kurulan tankların çoğu konik olarak kapatılmaktadır. Tankın konik olarak kapatılması deformasyonu düşürmektedir, fakat kubbe şeklinde kapatılması deformasyonun bir miktar daha düşmesini ve gerilmelerin farklı bölgelere dağılmasını sağlamaktadır. Bu çalışma özellikle riskli deprem bölgelerinde bulunan tankların konik model yerine kubbeli model tercih edilmesi suretiyle kapatılmasının daha güvenli olacağını göstermektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Product Design and Development Inc. <http://www.productdesign-development.com/pages/impact-analysis>, yayın tarihi ocak 1 2018, erişim tarihi Nisan 16 2018
- [2] Cooper TW and Wachholz TP. Optimizing Post-earthquake Lifeline System Reliability, In Proceedings of the 5th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, 1999; 878-86.
- [3] Çelik Aİ, Akgül T, Apay AC, Yurtsever A. Sismik Yükleme Altında Silindirik Çelik Su Tanklarının Gerilme ve Burkulma Analizi, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi, 2018; Cilt 1, Sayı 2, Sayfalar 55-66
- [4] Veletsos AS and Yang JY. 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, 1977, 1-24.
- [5] Haroun MA and Housner GW. Earthquake Response of Deformable Storage Tanks Journal of Applied Mechanics, 1981; 48 (2): 411-8.
- [6] Chalhoub MS and Kelly JM. Shake Table Test of Cylindrical Water Tanks in Base Isolated Structures, Journal of Engineering Mechanics, 1990; 116 (7): 1451-72.
- [7] Bo L and Jia-xiang T. Vibration Studies of Base Isolated Liquid Storage Tanks Computers and Structures, 1994; 52 (5): 1051-9.

- [8] Malhotra PK. Method for Seismic Base Isolation of Liquid Storage Tanks, *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123 (1): 1051-9.
- [9] Shenton HW and Hampton FP, Seismic Response of Isolated Elevated Water Tanks, *Journal of Structural Engineering* 1999, 125 (9): 965-76.
- [10] Mohamadshahi M, Afrous A. General Considerations in the Seismic Analysis of Steel Storage Tanks, *Journal of Scientific Research and Development* 2 (6): 151-156, 2015
- [11] Çelik Aİ, Akgül T. Stress Analysis of Cylindrical Steel Storage Liquid Tanks During the Instantaneous Loads, The 3rd International conference on Structural Engineering, New Technology and Methods (ICSENM'18), Busapest, 8-10 april 2018.
- [12] Maekawa A and Fujita K. Explicit Nonlinear Dynamic Analysis of Cylindrical Water Storage Tanks Concerning Coupled Vibration Between Fluid and Structure, ASME 2008 Pressure Vessels and Piping Conference, vol. 8, Seismic Engineering Chicago, Illinois, USA, 2008.
- [13] Mittal V, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation, *Thin-Walled Structures*, vol. 84, pp. 91-111, 2013, 2014.
- [14] Spritzer JM, Guzey S. Review of API 650 Annex E: Design of Large Steel Welded Aboveground Storage Tanks Excited by Seismic Loads, *Thin-Walled Structures* 2017; 112 (2017) 41–65.
- [15] Nicolici S, Bilegan RM. Fluid Structure Interaction Modeling of Liquid Sloshing Phenomena in Flexible Tanks, *Nucl. Eng. Des.* 2013; 258 51–56.
- [16] Spritzer JM, Guzey S. Nonlinear Numerical Evaluation of Large Open-top Aboveground Steel Welded Liquid Storage Tanks Excited by Seismic Loads, *Thin-Walled Structures* 119 (2017) 662–676
- [17] Mahmoud R. Maheri ME. Karbaschi, Mahzoon M. Analytical Evaluation of Dynamic Characteristics of Unanchored Circular Ground-Based Steel Tanks, *Thin-Walled Struct.* 2016; 109 (1) 251–259.
- [18] Kamyar Kildashti, Neda Mirzadehb, Bijan Samali, “Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints”, *Thin-Walled Structures* 123, 2018; 382–394
- [20] Ormeno M, Larkin T, Chouw N, The effect of seismic uplift on the shell stresses of liquid-storage tanks, *Earthq. Eng. Struct. D* 44 (12) (2015) 1979–1996.
- [21] Buratti N, Tavano M. Dynamic Buckling and Seismic Fragility of Anchored Steel Tanks by the Added Mass Method, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2014; 43 (1) 1–21 Article.
- [22] Godoy LA, Buckling of vertical oil storage steel tanks: review of static buckling studies, *Thin-Walled Struct.* 2016; 103 1–21.
- [23] Ozdemir Z, Fahjan Y ve Souli M. Sivi Ihtiva Eden Ankrajli ve Ankrajsız Tankların Lineer Olmayan Çok Boyutlu Deprem Analizleri, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 11-14 Ekim 2011 – ODTÜ – ANKARA

- [24] Gökhan Y, Feridun Ç. Silindirik Depolarının Sismik Yalıtım Yöntemiyle Depremden Korunması, Deprem sempozyumu, 23-25 Mart, 2005, Kocaeli
- [25] Djermane M, Zaoui D, Labbaci B, Hammadi F, Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: numerical evaluation of code provisions, Eng. Struct. 2014; 70 181–196.
- [26] American Petroleum Institute (API) Standard, 650, Welded steel tanks for oil storage, 12th Ed., American Petroleum Institute, 2013
- [27] Housner, G.W. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers. Thechnic, California: California Institute, 1955.
- [28] Hussein MM. Storage Water Tanks. eg.linkedin.com/in/moamenmohamedh. Erişim tarihi: 28.01.2018
- [29] Ansys help, 2018; https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/exd_ag/exp_dyn_theory_expl_flui_struct_582.html, Erişim tarihi: 28.01.2018