SIVI İHTİVA EDEN ANKRAJLI VE ANKRAJSIZ TANKLARIN LİNEER OLMAYAN ÇOK BOYUTLU DEPREM ANALİZLERİ

Z. Ozdemir[1], Y. Fahjan[2] ve M. Souli[3]

[1] *Dr., Kandilli Rasathanesi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul*
[2] *Doçent Dr., Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli*
[3] *Profesör Dr., Université de Lille, Fransa*
Email: ozdemirzuhal@yahoo.com.

ÖZET:

Bu çalışmada, yer hareketine maruz zemine oturan gerçek boyuttaki çelik silindirik sıvı ihtiva eden tankların davranışları incelenmiştir. Tankların analizi için tank cidarının geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışlarını ve içerikteki sıvının serbest yüzeyinin doğrusal olmayan çalkalanmasını dikkate alan sonlu elemanlar metodunun (FEM) sıvı-katı etkileşimi teknikleri kullanılmıştır. Tankların, zemine bağlanmış ve bağlanmamış olmak üzere iki farklı mesnet koşuluna sahip olduğu düşünülmüştür. Analizlerde kullanmak üzere depremler esnasında alınmış gerçek deprem kayıtları seçilmiş ve seçilen bu kayıtlar zaman tanım alanında spektrum uyumlu kayıt elde etme yöntemleri kullanılarak Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) tasarım ivme spektrumuna uygun olacak şekilde ölçeklenmiştir. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, depremin iki yatay bileşenine ilave olarak düşey bileşeni de dikkate alınarak, tank modelleri üç boyutlu deprem hareketi altında çözülerek düşey bileşenin tankların davranışı üzerindeki göreceli etkisi belirlenmiştir. Analiz sonuçları göstermiştir ki, depremin uzun periyot içeriği doğru olarak tanımlandığında maksimum çalkalanma dalga yüksekliği basitleştirilmiş analitik metotlarla doğru olarak hesaplanabilmektedir. Ankrajlı ve ankrajsız tankların çalkalanma davranışları basitleştirilmiş metotlarda varsayıldığı gibi özdeştir. Depremin ikinci yatay bileşeni, tek yatay bileşen altında gerçekleştirilen analiz sonuçları ile kıyaslandığında, maksimum çalkalanma dalga yüksekliğini değiştirmemektedir. İncelenen tank boyutları ve malzeme özellikleri için ankrajlı tank ankrajsız tanka oranla deprem yüklemelerine karşı daha savunmasızdır.

ANAHTAR KELİMELER : Tankların deprem analizi, katı-sıvı etkileşimi, sonlu elemanlar metodu (FEM)

1. GİRİŞ

Geçmiş büyük depremler sırasında sıvı ihtiva eden çelik tank hasarlarına çok yaygın olarak rastlanmıştır. Bu hasarların oluşmasının altında hidrodinamik etkilerden ortaya çıkan kuvvetlerin yeterli doğrulukla belirlenmemesi yatmaktadır. Ayrıca, tankların deprem davranışları geleneksel yapılardan çok farklıdır. Bu yapılar yüksek sünekliğe sahip olmadıkları için enerji sönümleme kapasiteleri de düşüktür ve şiddetli depremler sırasında doğrusal olmayan bir davranış gösterirler.

Sıvı ihtiva eden tankların doğrusal olmayan davranışları, tank malzemesinin akması, sıvı serbest yüzeyinin büyük genlikli çalkalanması, doğrusal olmayan yapı-sıvı etkileşimi, tank tabanının ve cidarının büyük genlikli şekil değiştirmesi, tank-zemin etkileşimi, tank tabanı ve temelinin birbirini takip eden temas ve ayrılması ve tank tabanının plastik dönmesinden kaynaklanan pek çok karmaşık davranış mekanizmasını birlikte içerir. Bu doğrusal olmayan davranış mekanizmaları, depremler esnasında, tank cidarının burkulması (fil ayağı ve elmas şeklinde burkulma), çalkalanma dalgalarının sebep olduğu yüksek gerilmelerden ötürü tank çatısı ve duvarının ek bölgesinin ayrılması ve tank temelinin değişik miktarlarda oturması şeklinde değişik hasarlarla ortaya çıkar.

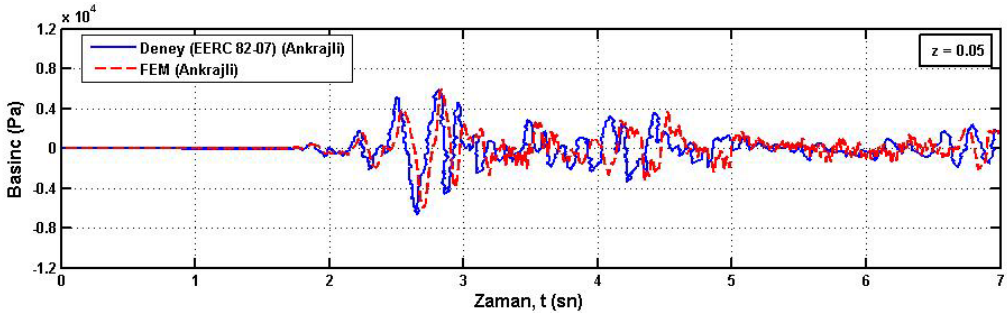
Tankların depremler esnasındaki gerçek performanslarının tam olarak belirlenmesi için tankların analizlerinde kullanılacak metodun bahsedilen bütün bu doğrusal olmayan (non-lineer) etkileri dikkate alması gerekir.

Bu çalışmada, tankların sismik yükler altındaki gerçek davranışları sıvı ve tankın bütün doğrusal olmayan (non-lineer) davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak LS-DYNA programı ile denetlenmiştir. Öncelikle, literatürde bulunan üç boyutlu modeller üzerinde gerçekleştirilmiş olan çalışmalar kullanılarak nümerik model doğrulanmıştır. Daha sonra, Türkiye'de tipik olarak inşa edilen tankların boyutları kullanılarak üç boyutlu ankrajlı ve ankrajsız tank modelleri hazırlanmıştır. Analizlerde deprem kayıt kaynağı olarak Türkiye'de meydana gelen depremlerden alınan kayıtlar kullanılmıştır. Analizlerin sonucunda tankların tepki parametreleri örneğin, çalkalanma sıvı yüksekliği, tank tabanının yukarı yükselme mesafesi, tank kabuk gerilmeleri incelenmiştir.

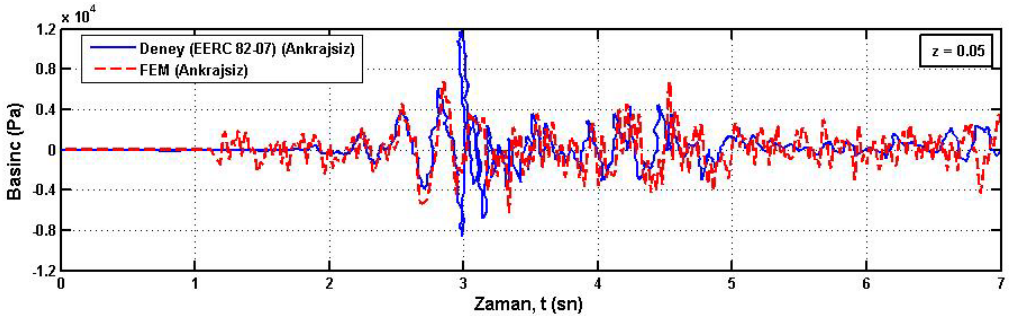
2. NÜMERİK YÖNTEMİN DOĞRULANMASI

Nümerik yöntemin doğrulanması için Manos ve Clough (1982) tarafından ankrajlı veya ankrajsız tanklar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan tanklar alüminyumdan yapılmış olup gerçek bir tankın 1/3 ölçekli modelidir. Yarıçapı ve yüksekliği 1.83 m olup taban plakasının kalınlığı 0.002 m'dir. Tank duvarı, aşağıdan yukarıya doğru, kalınlığı 0.002 m ve 0.0013 m olan iki ayrı plakadan yapılmıştır. Tanklar 1.53 m yüksekliğine kadar su ile doldurulmuştur ve ölçeklenmiş El Centro Deprem kaydının tek bir yatay bileşeni altında test edilmiştir. Bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen bazı tank tepki parametreleri örneğin, sıvı basıncı, çalkalanma dalga yüksekliği ve tank tabanının yukarı yükselme mesafesinin zamanla değişimi nümerik yöntemin doğrulanması için kullanılmıştır (Ozdemir, 2010). Burada örnek olarak, Şekil 1'de, yükleme ekseni üzerinde ankrajlı ve ankrajsız tankların tabanından 5 cm yükseklikte basıncın zamanla olan değişimi için deneysel ve nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki mesnetlenme koşulu için nümerik yöntem ve deneysel ölçüm arasında ufak faz farkları olmasına rağmen nümerik yöntem deneysel sonuçları gayet iyi bir şekilde tahmin edebilmektedir.

(a)



(b)



Şekil 1. (a) Ankrajlı ve (b) ankrajsız tanklarda basıncın zamanla değişimi

3. TANKLARIN ANALİZLERDE KULLANILACAK DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ

Tankların zaman tanım alanında doğrusal veya doğrusal olmayan analizlerinin gerçekleştirilmesinde en önemli konu, uygun kayıtların seçilmesidir. Sıvı ihtiva eden tankların içerisinde meydana gelen çalkalanmanın tipik periyotları 6-10 saniye arasında değişirken, 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 sadece düşük periyotlu bölgelerde değil, aynı zamanda yüksek periyotlu bölgelerinde de uyuşumlu olması gerekir.

Nümerik analizlerde ankrajlı ve ankrajsız tankların rijit zemine oturduğu varsayılmış ve Z1 zemin sınıfına ait tasarım spektrumu kullanılmıştır. Tankın 1. derece deprem bölgesinde (A_o = 0.4) inşa edildiği ve bina önem katsayısının (I) 1.5 olduğu varsayılmıştır. PEER (2006) kuvvetli yer hareketi veri bankasında bulunan Türkiye'de meydana gelmiş depremlerden alınan kayıtlar büyüklük, faylanma mekanizması, mesafe ve zemin koşulları gibi özelliklerine göre gruplandırılarak, duruma uygun olan kayıtlar önce zaman tanım alanında ölçekleme yöntemleri kullanılarak hedef tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiştir (Fahjan, 2008). Fakat, bu teknikle elde edilen kayıtların spektrumları çalkalanma periyotlarının yeraldığı yüksek periyot bölgelerinde hedef spektrumla iyi eşleşmediği gözlemlenmiştir. Ölçekleme sonrasında elde edilen bir kayıtla yapılan bir deneme analizinin sonucunda çalkalanma dalga yüksekliğinin şartnamelerden bulunan serbest su yüzeyi yüksekliğinden çok daha düşük olduğu görülmüştür. Böylece, tasarım ivme spektrumu ve seçilen kaydın spektrumunun eşleştirmesini arttırmak için ölçeklenmiş kayıtlar RSPMATCH programı (Abrahamson, 1993) ile işleme tabi tutulmuştur. Analizlerde kullanılmak üzere seçilen 3 adet kayda ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2'de analizlerde kullanılan kayıtların ivme tepki spektrumları DBYBHY (2007) elastik tasarım ivme spektrumu ile birlikte verilmiştir. Deprem kayıtlarının bileşenlerinin göreli etkisini belirlemek için nümerik analizler seçilen kayıtların bileşenlerinin değişik kombinasyonları altında gerçekleştirilmiştir. Yükleme 1'de deprem kaydının sadece bir yatay bileşeni, Yükleme 2'de deprem kaydının her iki yatay bileşenin birlikte etkimesi durumu düşünülmüştür. Yükleme 3, Yükleme 1'de kullanılan yatay deprem kaydı ile düşey bileşenin birlikte bulunması durumunu dikkate alır. Yükleme 4 üç boyutlu deprem yüklemesine karşılık gelmektedir.

Tablo 1. Yerel zemin sınıfı Z1 için seçilen deprem kayıtları ve ölçekleme katsayıları (α_{AT})

Kayıt No	Deprem	Tarih	İstasyon	Kayıt 1	Kayıt 2	Kayıt 3	α_{AT}^1	α_{AT}^2	α_{AT}^3
P1547	Düzce, Turkey	12.11.1999	Bolu	BOL000	BOL090	BOL-UP	0.82	0.82	2.07
P1087	Kocaeli, Turkey	17.08.1999	Arcelik	ARC000	ARC090	ARCDWN	3.82	3.53	4.70
P1558	Düzce, Turkey	12.11.1999	Mudurnu	MDR000	MDR090	MDR-UP	4.49	6.84	5.85

4. ANALİZLERDE KULLANILAN TANK BOYUTLARI VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

Analizlerde Türkiye'de tipik olarak inşa edilen çapı 48 m ve yüksekliği 18 m olan tank modeli kullanılmıştır. Seçilen tankın düz olarak inşa edilen çatısı çembersel kirişlere, aşık elamanlara ve kolonlara oturtulmuştur. Tank cidarı kalınlığı en altta 0.020 m ile başlayıp her iki levhada 0.002 azalarak en üstte ise 0.012 m kalınlığa ulaşan 9 sıralı levhadan oluşmaktadır. Tank taban plakasının kalınlığı 0.007 m, çatısının kalınlığı ise 0.015 m'dir. Çatı elemanları ve tank cidarı elastik modülü E = 200 GPa, Poison oranı 0.30, ve yoğunluğu 7800 kg/m^3 olan çelik malzemeden üretilmiştir. Çeliğin akma gerilmesinin 3.55 10^8 Pa olduğu ve elasto-plastik olarak davrandığı düşünülmüştür. Tankların yoğunluğu ρ = 1000 kg/m^3 olan su ile doldurulmuş olduğu varsayılmıştır. Depremler

sırasındaki hasarlar genellikle %50 den fazlası dolu olan tanklarda meydana geldiği için tanktaki sıvı yüksekliği 14 m olarak belirlenmiştir.

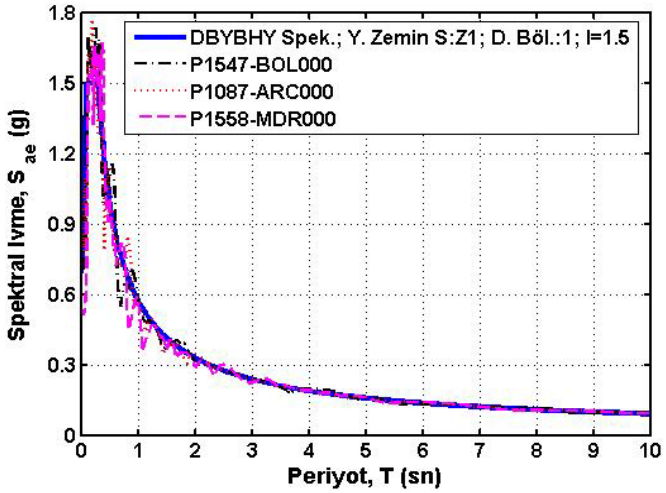
Analizler, aynı tank modeli üzerinde iki değişik mesnetlenme koşulu altında gerçekleştirilmiştir. İlk durumda tankın ankastre olarak temele mesnetlendiği; ikinci durumda ise tankın zemin üzerine doğrudan oturduğu varsayılmıştır. Zemine ankre edilmemiş tankın tabanı ve zemini temsil eden rijit kabuk arasında statik ve dinamik sürtünme katsayıları sırasıyla 0.50 ve 0.45 olan temas (contact) algoritması kullanılarak zemin ve tank arasındaki etkileşim tanımlanmıştır. Sıvı ve tankın arayüzeyindeki düğüm noktaları birleştirilmiş ve sıvı için ALE katı elemanlar kullanılmıştır. Hidrostatik etkileri dikkate almak için 1 g'lik düşey ivme alanı meydana getirilmiştir. Analizlerde tank cidarının geometri ve malzeme bakımından doğrusal olmayan davranışları dikkate alınmıştır. Analizlerde kullanılan ankrajsız tankın sonlu elemanlar modelinde, 22656 kabuk eleman, 86400 ALE katı eleman, 729 çubuk eleman ve 90613 düğüm noktası bulunmaktadır.

5. NÜMERİK ANALİZ SONUÇLARI

Deprem kayıtlarının bileşenlerinin değişik kombinasyonları için doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilerek, çalkalanma dalga yüksekliği, taban yukarı kalkma mesafesi, kabuk gerilmeleri, tank cidarı plastik şekildeğiştirmeleri gibi ankrajlı ve ankrajsız tankların tepki parametreleri belirlenmiştir (Ozdemir, 2010).

5.1. Çalkalanma Dalga Yüksekliği

Tankların içinde oluşan maksimum çalkalanma yüksekliğinin elde edilmesi, serbest sıvı yüksekliği ve tank çatısı arasında bırakılacak boşluğun belirlenmesi için önemlidir. Bu boşluğun bırakılmasıyla tank duvarlarının üst kısmının ve tank çatısının yüksek hızdaki çalkalanma dalgalarının çarpması sonucu ortaya çıkabilecek zararların önlenmesi hedeflenir. Şekil 3'de P1087-ARC deprem kaydının bileşenlerinin değişik kombinasyonları altında ankrajlı ve ankrajsız tanklarda meydana gelen çalkalanma dalga yüksekliğinin zamanla değişimi verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi X-ekseni üzerindeki iki noktada (r = -23.5 ve r = 23.5) çalkalanma dalga yüksekliği deprem bileşenlerinin değişik kombinasyonlarından ve tabandaki mesnetlenme koşulundan ihmal edilebilecek kadar az etkilenmektedir. Maksimum çalkalanma dalga yüksekliği 3.6 m civarındadır. Depremin ikinci yatay bileşeni, tek yatay bileşenin bulunması durumuna göre maksimum çalkalanma dalga yüksekliğini değiştirmemektedir.



Şekil 2. Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Z1 zemin sınıfı elastik tasarım ivme spektrumu ve analizlerde kullanılacak RSPMATCH (1993) programı ile üretilmiş kayıtların tepki spektrumları

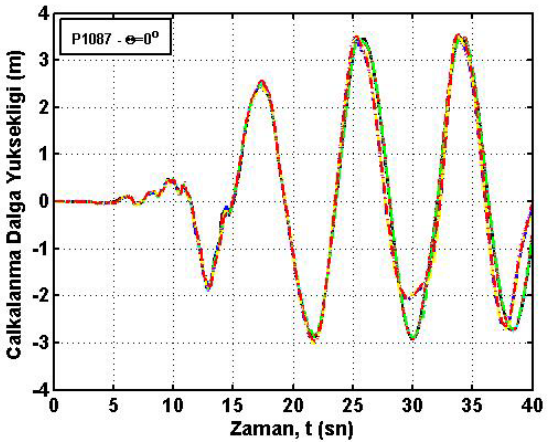
5.2. Tank Tabanının Yukarı Kalkma Yüksekliği

Tank tabanının yukarı kalkmasıyla birlikte tankın davranışı tamamıyla değişime uğrar. Tank tabanının bir ucu yukarı doğru kalkarken diğer ucu zemin ile temasta kalarak aşırı gerilme artışına maruz kalır. Tabanın yukarı kalkma mesafesi, zeminle temasta kalan bölgedeki gerilmelerin belirlenmesi ve borulama sistemini tanka bağlayan bağlantı elemanlarının esnek olarak yapılması için önemlidir. P1547 kaydı altında değişik yüklemeler için, tank tabanının çevresi boyunca tank tabanının yukarı kalkma yüksekliğinin değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Burada, θ +X-ekseni ile saat dönüş yönünün tersi yönde yapılan açıdır. Yükleme 1 ve 3 için tank tabanının çevresi boyunca değişimi çok benzerdir ve X-eksenine göre simetriktir. Yükleme 2 ve 4 için tank tabanının yukarı yükselme mesafesinin maksimum değeri X-ekseni üzerinde olmaz. Depremin düşey bileşeni tank tabanının yukarı kalkma mesafesini çok az etkilemesine rağmen depremin ikinci yatay bileşeninin uygulanması ile tabanın yukarı kalkma mesafesi yaklaşık olarak 4 kat artar.

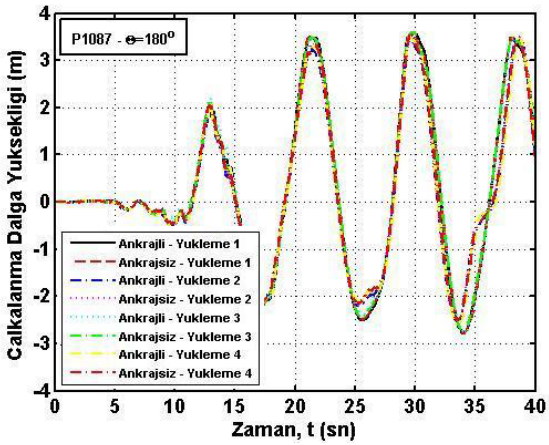
5.3. Tank Cidar Gerilmeleri

Ankrajlı tanklarda maksimum eksenel basınç gerilmeleri tank cidarının tabana yakın bölgelerinde ve tank kesitinin düzgün daireselliğinin bozulduğu bölgelerde meydana gelir. Nümerik analiz sonuçları, ankrajsız tank tabanının yukarı kalkma davranışının tankın dinamik özelliklerini (rijitlik ve enerji yutma kapasitesini) değiştirdiğini doğrular. Ankrajsız tankta eksenel basınç gerilmeleri zemin ile temasta kalan bölgelerde ve dışa doğru şişliğin olduğu burkulma bölgelerinde yoğunlaşır. Tank tabanının yukarı yükselmesi küçük genlikli tank kesitinin düzgün daireselliğinin bozulmasına sebep olur. Fakat, bu deformasyonlar ankrajlı tankta daha büyük genliklere sahiptir. Deformasyonlar, deprem hareketinin genliğinin azalması ile birlikte azalır. Bu tür deformasyonların tank tabanının yukarı doğru kalkma davranışı ile birleşmesi sonucunda tank cidarındaki eksenel basınç gerilmeleri artar. Depremin düşey bileşeni bu tür tank kesitinin düzgün daireselliğinin bozulması şeklinde ortaya çıkan deformasyonları arttırır. Ankarajlı tankta ankrajsız tanka göre bu tür deformasyonlar daha fazladır. Ankrajlı tankta oluşan eksenel basınç gerilmeri $3.5x10^8$ Pa civarında olup çevresel gerilmeler bazı yükleme kombinasyonları ve deprem kayıtları için akma gerilmesini aşmaktadır. Ankrajsız tankta eksenel basınç gerilmeleri maksimum $3.0x10^8$ Pa civarında olup, çevresel gerilmeler ankrajlı tankta olduğu gibi genellikle akma limitini aşmaktadır. Ankrajlı ve ankrajsız tankta kesitsel bozulmalar, radyal deformasyonlar, plastik şekil değiştirmeler ve tank cidar gerilmeleri bakımından en elverişsiz durum üç boyutlu deprem hareketi altında oluşmaktadır.

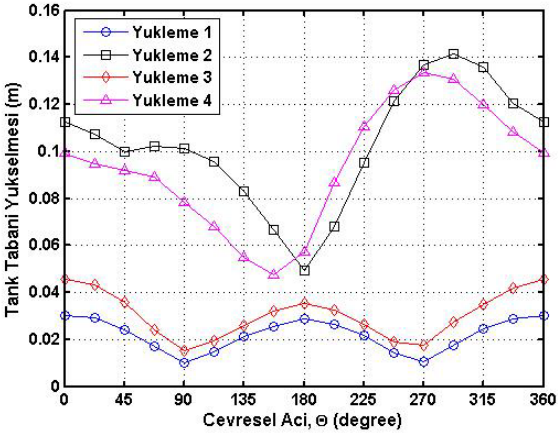
(a)



(b)



Şekil 3. P 1087-ARC kaydı altında gözlemlenen çalkalanma dalga yüksekliğinin zamanla değişimi (a) r = -23.5 ve (b) r = 23.5.



Şekil 4. P1547 kaydı altında tank tabanı yükselmesinin tank tabanının çevresi boyunca değişimi

5.4. Plastik ve Radyel Şekil Değiştirmeler

Bütün yükleme durumları için ankrajlı tankta meydana gelen plastik şekil değiştirmeler ve deformasyonlar ankrajsız tanktan daha büyük değerlere erişmektedir. Ankarajlı ve ankrajsız tankın plastik şekil değiştirmeleri ve deformasyonları Yükleme 4 durumunda en yüksek değere ulaşır. Nümerik analizler sonucunda bulunan tank radyal deplasmanları, plastik şekil değiştirmeleri ve tank gerilmeleri göstermiştir ki incelenen tank boyutları ve malzeme özellikleri için ankrajlı tank, ankrajsız tanka oranla deprem yüklemelerine karşı daha savunmasızdır.

6. MEVCUT ŞARTNAMELERE GÖRE TANKLARIN TEPKİ PARAMETRELERİ

Mühendislik hesaplamalarında ve sismik tank tasarım şartnamelerinde deprem yükleri altında tankların sismik analizleri basitleştirilmiş yöntemlerle gerçekleştirilir. API 650 (2005) Housner (1954) tarafında geliştirilen basitleştirilmiş yöntemi kullanırken, EuroCode 8 (2006) hem Veletsos and Yang (1977) hem de Malhotra et al. (2000) tarafından geliştirilen metodu benimsemiştir. Yeni Zelanda Şartnamesi (NZSEE, 1986) ise Haroun and Housner (1981) tarafından geliştirilen metodu esas almıştır. İncelenen ankrajlı ve ankrajsız tank modellerinin yürürlükteki şartnamelerine göre değerlendirilmesi Tablo 2'de verilmiştir.

Çalkalanma dalga yüksekliği, Housner (1954) ve Malhotra ve diğerlerinin (2000) metotlarıyla 3.84 m olarak hesaplanırken, Yang ve Veletsos (1977) ve Haroun ve Housner (1981)'in metotları çalkalanma dalga yüksekliğini 3.21 m olarak tahmin etmektedir. Nümerik olarak bulunan çalkalanma dalga yüksekliği 3.6 m civarındadır ve bu değer analitik olarak bulunan bu iki sınır değerin arasında yeralmaktadır. Böylece, depremin uzun periyot içeriği doğru olarak tanımlandığında maksimum çalkalanma dalga yüksekliği basitleştirilmiş analitik metotlarla doğru olarak hesaplanabilmektedir.

Ankrajlı tankta ortaya çıkan eksenel basınç gerilmelerinin elastik (elmas şeklinde) burkulmaya sebep olan kritik yükten daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, ankrajlı tank için elastik burkulma beklenmemektedir. Nümerik yöntemin sonuçları da bu bulguyu desteklemektedir. Nümerik yöntemle elde edilen ankrajlı tankın eksenel basınç gerilmeleri şartnamelerle elde edilenden yaklaşık 10 kat daha büyüktür. Ankrajsız tankta gözlemlenen eksenel basınç gerilmeleri sadece Yeni Zellanda (NZSEE, 1996) şartnamesine göre belirlenebilmiş olup bu şartnameye göre bu gerilme elmas şeklinde burkulmaya sebep olabilecek büyüklüktedir. Fakat, nümerik analizlerde ankrajsız tanklarda elmas şeklinde burkulma gözlemlenmemiştir. Nümerik yöntem ankrajsız tank için bu şartnamede tahmin edilen değerden 2 kez daha fazla eksenel basınç gerilmesi tahmin eder. Eksenel basınç

gerilmeleri için şartname ve nümerik analiz sonuçları arasındaki fark şartnamelerin tankın kesitinde meydana gelen şekildeğiştirmeleri dikkate almamasından kaynaklanır. API 650 (2005)'ye göre ankrajlı tank üzerinde ortaya çıkan çevresel gerilmeler izin verilenden az iken Yeni Zelanda Şartnamesi'ne (1996) göre çevresel gerilmeler izin verilen limiti aşmaktadır. Nümerik sonuçlara göre hem ankrajlı hem de ankrajsız tank üzerinde meydana gelen çevresel gerilmeler akma gerilmelerini aşmaktadır. Şartnamelere göre ankrajlı tank için hasar şekli küçük genlikli fil ayağı şeklinde (elasto-plastik) burkulmadır ve nümerik sonuçlarda bu sonucu desteklemektedir. Tankın tabanının yukarı yükselme mesafesini Yeni Zelanda Şartnamesi 11 cm olarak tahmin eder. Eğer tank şartnamelerin önerdiği gibi depremin sadece 1 yatay ve 1 düşey bileşeni altında analiz edilirse nümerik metot bu mesafeyi 5 cm olarak bulur. Fakat depremin 3 boyutlu olduğu dikkate alınırsa bu mesafe 14 cm çıkarak şartnamelerin tahmin ettiği değeri aşar.

Tablo 2. Şartnamelere göre bulunan tank tepki parametreleri (birimler: N, m and sn)

	FEM	API 650 (2005)	Eurocode 8 (2006)		NZSEE (1986)
		Housner (1954)	Veletsos and Yang (1977)	Malhotra et al. (2000)	Haroun and Housner (1981)
Çalkalanma dalga yüksekliği	3.65 m (ankrajlı) 3.65 m (ankrajsız)	3.84 m	3.21 m	3.84 m	3.26 m
Taban yukarı kalkma mesafesi	0.05 m	Tank ankrajlanmalı	Grafiklerin aralığının dışında		0.11 m
Eksenel kabuk gerilmeleri (Ankrajlı)	$3.55\text{x}10^{8}$	$1.05\text{x}10^{7}$	$1.81\text{x}10^{7}$	$3.37\text{x}10^{7}$	$2.59\text{x}10^{7}$
Eksenel kabuk gerilmeleri (Ankrajsız)	$2.50\text{x}10^{8}$	Tank ankrajlanmalı	Grafiklerin aralığının dışında		$1.03\text{x}10^{8}$
Müsade edilen gerilme					
Elastik burkulma	-	$3.12\text{x}10^{7}$	$8.12\text{x}10^{7}$	$8.16\text{x}10^{7}$	$8.16\text{x}10^{7}$
Elasto-Plastik Burkulma	-	-	evet	evet	evet
Çevresel gerilme	$> \sigma_{yield}$ (ank. ve anksız.)	$2.97\text{x}10^{8}$	-	-	$4.50\text{x}10^{8}$
Müsade edilen çevresel gerilme	-	$3.20\text{x}10^{8}$	$3.55\text{x}10^{8}$	$3.55\text{x}10^{8}$	$3.55\text{x}10^{8}$
Tank yukarı yükselme mesafesi	0.05	-	-	-	0.11

7. SONUÇ

Bu çalışmada, gerçek boyuttaki ankrajlı ve ankrajsız tank modellerinin sismik davranışları deprem hareketinin bileşenlerinin çeşitli kombinasyonları altında sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile incelenmiştir. Analizlerde tank cidarının malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranışları gözönüne alınmıştır. Analizler sonucunda, tanklarda serbest sıvı yüzeyinde meydana gelen çalkalanma davranışının mesnet koşulundan ve depremin değişik bileşenlerinden etkilenmediği gözlenmiştir. Aynı özelliklere sahip ankrajlı ve ankrajsız tanklar aynı deprem hareketine maruz kaldığında ankrajlı tankta daha büyük plastik şekil değiştirmeler, kabuk

gerilmeleri, çevresel (radyal) deformasyonlar ve tankın düzgün dairesel kesiti dışında oluşan kesitsel bozulmalar meydana gelmektedir. Böylece, incelenen tank boyutları ve malzeme özellikleri için ankrajlı tank, ankrajsız tanka oranla deprem yüklemelerine karşı daha savunmasızdır. Depremin düşey bileşeni, tankların düzgün dairesel kesiti dışında oluşan kesitsel bozulmaları arttırmaktadır. Depremin düşey bileşeninin çalkalanma dalga yüksekliği ve ankrajsız tank tabanının yukarıya yükselme mesafesi üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek derecede küçüktür. Üç boyutlu deprem hareketi altında tankın düzgün dairesel kesiti dışında oluşan kesitsel bozulmaları, radyal tank deformasyonları, plastik şekil değiştirmeleri ve tank cidar gerilmeleri artmaktadır.

Teşekkür

Çalışmamız, TÜBİTAK tarafından 108M607 nolu proje kapsamında ve Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Araştırma Fonu tarafından 2009-A-25 nolu proje ile desteklenmiştir. Her iki kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abrahamson, N.A. (1993). Non-Stationary Spectral Matching Program RSPMATCH, User Manual.

API 650. (2005). Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute Standard, Washington D. C., Addendum 4, December,

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY). (2007). T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi, http://www.deprem.gov.tr.

EUROCODE 8. (2006). Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4-Silos, Tanks and Pipelines. European Committee for Standardization, Brussels, BS EN 1998-4: 2006.

Fahjan, Y.M. (2008). Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi. İMO Teknik Dergi, yazı 292, pp. 4423-4444.

Haroun, M.A. ve Housner, G.W. (1981). Seismic Design of Liquid Storage Tanks. Journal of the Technical Councils of ASCE, **107**, TC1, April.

Housner, G.W. (1954). Earthquake Pressures on Fluid Containers. 8th Technical Report under Office of Naval Research, California Institute of Technology, Pasadena, California, August.

Malhotra, P.K., Wenk, T. ve Weiland, M. (2000). Simple Procedure of Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks. Structural Engineering International, **10:3**, pp.197-201.

Manos, G.C., ve Clough, R.W. (1982). Further Study of the Earthquake Response of a Broad Cylindrical Liquid Storage Tank. Earthquake Engineering Research Center, Report UCB/EERC 82-07.

NZSEE (New Zealand National Society for Earthquake Engineering), Seismic Design of Storage Tanks. (1986). Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Editors: M. J. N. Priestley, B. J. Davidson, G. D. Honey, D. C. Hopkins, R. J. Martin, G. Ramsey, J. V. Vessey and J. H. Wood, Wellington, New Zealand.

Ozdemir, Z. (2010). Nonlinear Fluid-Structure Interaction For Multi-Dimensional Seismic Analyses of Liquid Storage Tanks, Boğaziçi Üniversitesi Doktora Tezi.

Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center. (2006). PEER Strong Motion Database, http://peer.berkeley.edu/smcat/.

Veletsos, A.S. ve Yang, J.Y. (1977). Earthquake Response of Liquid Storage Tanks. Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics, Proceedings of the Engineering Mechanics Division Specialty Conferences, ASCE, Raleigh, North Carolina, pp.1-24.