



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NONLİNEER SIVI-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN
MODELLENMESİ VE SİLİNDİRİK TANKLARIN
DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ**

Kayahan AKGÜL

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN

II. Danışman

Doç. Dr. Yasin FAHJAN

Aralık, 2014

İSTANBUL

Bu çalışma 12/12/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

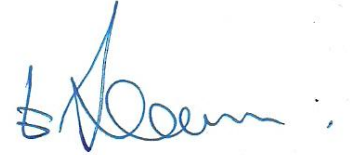
Tez Jürisi:


Prof.Dr. Namık Kemal ÖZTORUN(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç.Dr. Eren UÇKAN
Boğaziçi Üniversitesi
Deprem Araştırma Enstitüsü


Doç.Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Doç.Dr. Sadık ÖZTOPRAK
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi


Yrd.Doç.Dr. Erdem DAMCI
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım; Doç. Dr. Cenk ALHAN' a ve Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN' a saygı ve sevgilerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans tezimde ikinci danışman olarak bulunan, yaşama sevincini hiçbir an kaybetmeyen değerli hocam Doç. Dr. Yasin FAHJAN' a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışma, 111M382 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklendiğinden dolayı TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Aralık,2014

Kayahan AKGÜL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xiv
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. TANKLARIN DEPREM PERFORMANSLARI.....	3
2.2. YAPI-SIVI ETKİLEŞİMİ	4
2.2.1. Analitik Yaklaşımlar	5
2.2.1.1. Housner Yaklaşımı	5
2.2.1.2. Bauer Yaklaşımı	6
2.2.1.3. Yang ve Veletsos Yaklaşımı	7
2.2.1.4. Haroun ve Housner Yaklaşımı	7
2.2.1.5. Malhotra Yaklaşımı	7
2.2.2. Nümerik Yaklaşımlar	7
2.2.2.1. Lagrange Yaklaşımı	8
2.2.2.2. Euler Yaklaşımı	9
2.2.2.3. ALE Yaklaşımı	10
2.2.3. Yönetmeliklerde Tank-Sıvı Etkileşimi	12
2.3. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ	14
2.3.1. Analitik Yaklaşımlar	14
2.3.1.1. Veletsos Yaklaşımı	15
2.3.1.2. NEHRP-2001 Yaklaşımı	18
2.3.2. Nümerik Yaklaşım Yöntemleri	20
2.3.2.1. Direkt (Doğrudan) Çözüm Yöntemi	23

2.3.2.2. Altsistem Çözüm Yöntemi.....	24
2.4. ANALİZ PLATFORMU	27
3. MALZEME VE YÖNTEM	28
3.1. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN LS-DYNA YAZILIMI İLE MODELLENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM TEKNİKLERİ.....	28
3.1.1. Saçılma Analizinin Ana Yapısı	28
3.1.2. Emici Tabakaların (PML) Tanımlanması.....	30
3.1.3. Etkili Sismik Giriş Yöntemi	32
3.1.3.1. Deprem Giriş Hareketi.....	33
3.1.3.2. Nonlinear Yapı-Zemin Etkileşimi	35
3.2. DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI	35
3.3. NONLİNEER ZEMİN MODELLERİ.....	39
3.3.1. Malzeme Modelleri.....	39
3.3.2. Analizlerde Kullanılacak Zemin Tipleri.....	41
3.3.2.1. Cuddeback Soil B.....	42
3.3.2.2. Carson Sink Dry.....	43
3.3.2.3. Carson Sink Wet.....	45
3.4. NÜMERİK TANK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI İÇİN MATLAB YAZILIMI İLE GELİŞTİRİLEN PROGRAMIN ÇALIŞMA MEKANİZMALARI	46
3.4.1. Tank-Sıvı Etkileşimin Modellenmesi.....	47
3.4.2. Tank-Zemin Etkileşimin Modellenmesi.....	48
3.5. 3BOYUTLU SİLİNDİRİK TANK-SIVI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ NÜMERİK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI.....	56
3.5.1. Tank Geometrisinin Belirlenmesi.....	56
3.5.2. Zemin Geometrisi ve PML Tabakaların Geometrisi	56
3.5.3. Tank Sisteminde Sönüm Oranının Elde Edilmesi	58
3.6. ANALİZLERDE KULLANILACAK DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ.....	59
4. BULGULAR	64
4.1. SERBEST SIVI YÜZEYİNDE OLUŞAN İVMELER	64
4.2. SERBEST SIVI YÜZEYİ ÇALKALANMA YÜKSEKLİĞİ DEĞİŞİMİ.....	70
4.3. TANK ÇEPERİNDE OLUŞAN YATAY DEFORMASYONLAR.....	73
4.4. TANK TABANINDA OLUŞAN KESME KUVVETİ.....	75
4.5. TANK TABANINDA OLUŞAN DEVRİLME MOMENTİ	81
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	88

5.1. NÜMERİK YÖNTEMİN ÇALIŞMASI.....	88
5.2. ZEMİN ETKİSİ	90
5.3. ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ.....	98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Tankların deprem performanslarının değerlendirilmesini hatalı yapılması durumunda ortaya çıkabilecek hasar tipleri;(a):Elmas şeklinde burkulma, (b):Fil Ayağı şeklinde burkulma (Özdemir,2010).	4
Şekil 2.2: Housner yaklaşımında tank sisteminin eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ile modellenmesi (Livaoğlu,2005).	6
Şekil 2.3: Katı-sıvı etkileşimi çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması;(1):Lagrange, (2):Euler, (3):ALE (Do ve Day,2005).	8
Şekil 2.4: Lagrange yöntemi malzeme deformasyonu (Do ve Day,2005).	8
Şekil 2.5: Lagrange yönteminde aşırı deformasyonların oluşumu (Do ve Day,2005).	9
Şekil 2.6: Euler yönteminde sonlu elemanlar ağı ve malzeme deformasyonu (Do ve Day,2005).	9
Şekil 2.7: Sonlu elemanlar ağına ait düğüm noktalarının ve malzeme noktalarının hareketlerinin (a) Lagrange, (b) Euler ve (c) ALE algoritmaları için gösterimleri (Özdemir,2010).	10
Şekil 2.8: ALE yönteminde sonlu elemanlar ağı ötelenmesi ve malzeme deformasyonu.	11
Şekil 2.9: ALE yöntemi ile Euler yönteminin karşılaştırılması.	11
Şekil 2.10: Aşırı deformasyonlara karşı yöntemlerin reaksiyonu; (a) Lagrange (b) ALE.	11
Şekil 2.11: EuroCode 8'e göre önerilen salınım periyot hesabı için C_c katsayısı.	13
Şekil 2.12: Yapı-zemin etkileşiminde Veletsos yaklaşımı (Veletsos ve diğ, 1988).	15
Şekil 2.13: Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\bar{\zeta}$) periyot oranları ($\tilde{T}/T$) ile değişimi (Veletsos,1988).	17
Şekil 2.14: Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\bar{\zeta}$) periyot oranları ($\tilde{T}/T$) ile değişimi (FEMA 368, 2001).	19
Şekil 2.15: Düşey doğrultuda ilerleyen deprem dalgası (Aydinoğlu,2012).	20
Şekil 2.16: Yapı-zemin etkileşiminde deprem dalgalarının hareketi (Aydinoğlu,2012).	22
Şekil 2.17: Geçirgen sınırlar (Aydinoğlu,2012).	23
Şekil 2.18: Yapı-zemin etkileşiminde Altsistem Yöntemi (Aydinoğlu,2012).	24

Şekil 2.19: Kinematik Etkileşim mekanizması (Aydinoğlu,2012).	25
Şekil 2.20: Eylemsizlik Etkileşimi mekanizması birinci adımı (Aydinoğlu,2012).	26
Şekil 2.21: Eylemsizlik Etkileşimi mekanizması ikinci adımı (Aydinoğlu,2012).	27
Şekil 3.1: Zeminin yapı olmadığı durumda (a) ve yapı olduğu durumda (b) deprem hareketine maruz kalması (LS-DYNA,2013).	29
Şekil 3.2: Zeminin yapı olmadığı durumda (a) ve yapı olduğu durumda (b) deprem hareketine maruz kalması (LS-DYNA,2013).	29
Şekil 3.3: PML Model (LS-DYNA,2013).	30
Şekil 3.4: PML için yarı sonsuz çubuk modeli (LS-DYNA,2013).	31
Şekil 3.5: PML içerisindeki kusursuz uyumlu ortam (PMM) (LS-DYNA,2013).	31
Şekil 3.6: PML ortamında saçılan dalgaların sönümlenmesi (LS-DYNA,2013).	31
Şekil 3.7: PML ortamında saçılan dalgaların sönümlenmesinin yetersiz kalması (LS-DYNA,2013).	32
Şekil 3.8: Yapı-zemin etkileşimde süreksizlik yüzeyinin oluşumu (LS-DYNA,2013).	34
Şekil 3.9: Yapı-zemin etkileşimde nonlinear zemin modeli (LS-DYNA,2013).	35
Şekil 3.10: Tekrarlı yük etkisindeki zeminlerde kayma gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkisi (Özener, 2010).	36
Şekil 3.11: Bir zemin numunesi için kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirmeye göre değişimi ve dinamik zemin davranışındaki birim şekil değiştirme eşikleri (Tönük ve Ansal,2007).	38
Şekil 3.12: Tüm zemin tipleri için basınç-birim şekildeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması (Michael A. Thomas ve diğ.,2008).	41
Şekil 3.13: Cuddeback Soil-B zemin tipi için farklı bölgelerden alınan zemin numuneleri	42
Şekil 3.14: Cuddeback Soil-B zemin tipi için basınç-birim şekildeğiştirme ilişkisi.	43
Şekil 3.15: Carson Sink Dry zemin tipi için farklı bölgelerden alınan zemin numuneleri.	43
Şekil 3.16: Carson Sink Dry zemin tipi için basınç-birim şekildeğiştirme ilişkisi.	44
Şekil 3.17: Carson Sink Wet zemin tipi için zemin numunesinin alındığı bölge.	45
Şekil 3.18: Carson Sink Wet zemin tipi için basınç-birim şekildeğiştirme ilişkisi.	46
Şekil 3.19: Tank-sıvı etkileşimi hatalı ağ örgüsü.	47
Şekil 3.20: Tank-sıvı etkileşimi ideal ağ örgüsü.	48
Şekil 3.21: Tank-zemin etkileşimi nümerik modeli.	49

Şekil 3.22: Zemin modeli ağının birinci bölümü.....	50
Şekil 3.23: Zemin modeli ağının ikinci bölümü.	50
Şekil 3.24: TFI yönteminde sınırların;(a) doğal ve (b)kartezyen koordinat sistemlerinde tanımlanması.....	51
Şekil 3.25: Ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistemin $\frac{1}{4}$ lük parçası.	53
Şekil 3.26: Tank-zemin etkileşiminde zemin modeli.	54
Şekil 3.27: Tank-zemin etkileşiminde PML tabakalar.	55
Şekil 3.28: Nümerik analizlerde kullanılan tank geometrisi ve sıvının görseli.	56
Şekil 3.29: Zemin nümerik modeli geometrisi	57
Şekil 3.30: PML nümerik modeli geometrisi.	57
Şekil 3.31: Rayleigh Yönteminde sönüm oranları için optimum sınırlar	58
Şekil 3.32: X,Y ve Z doğrultularında Kobe deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.....	61
Şekil 3.33: X,Y ve Z doğrultularında Erzincan deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.....	62
Şekil 3.34: X,Y ve Z doğrultularında Düzce deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.....	63
Şekil 4.1: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	65
Şekil 4.2: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	65
Şekil 4.3: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	66
Şekil 4.4: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	66
Şekil 4.5: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	67
Şekil 4.6: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	67
Şekil 4.7: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	68
Şekil 4.8: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	68

Şekil 4.9: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.	69
Şekil 4.10: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 4.11: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 4.12: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi	72
Şekil 4.13: Deprem1- yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	73
Şekil 4.14: Deprem-2 yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 4.15: Deprem-3 yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.....	74
Şekil 4.16: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	76
Şekil 4.17: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	76
Şekil 4.18: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	77
Şekil 4.19: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	77
Şekil 4.20: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	78
Şekil 4.21: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	78
Şekil 4.22: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	79
Şekil 4.23: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	79
Şekil 4.24: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.	80
Şekil 4.25: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında x eksenini etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	82
Şekil 4.26: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında y eksenini etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	82

Şekil 4.27: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında z eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	83
Şekil 4.28: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında x eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	83
Şekil 4.29: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında y eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	84
Şekil 4.30: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında z eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	84
Şekil 4.31: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında x eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	85
Şekil 4.32: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında y eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	85
Şekil 4.33: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında z eksenine etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.	86
Şekil 5.1: Deprem-1 altında gerilmelerin PML tarafından sönümlenmesi.	89
Şekil 5.2: Deprem-1 altında ivmelerin PML tarafından sönümlenmesi.	89
Şekil 5.3: Sıvı serbest yüzeyi oluşan maksimum ivmeleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.	91
Şekil 5.4: Sıvı serbest yüzeyi oluşan maksimum çalkalanma yükseklikleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.	91
Şekil 5.5: Tank çeperinde oluşan maksimum deformasyonlar için zemin etkisinin değerlendirilmesi.	92
Şekil 5.6: Tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.	93
Şekil 5.7: Tank tabanında oluşan maksimum devrilme momentleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.	93

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Salınım moduna ait periyotların farklı yönetmeliklere göre hesaplanması	13
Tablo 2.2: Çalkanma yüksekliklerinin farklı yönetmeliklere göre hesaplanması	14
Tablo 2.3: Dönme rijitliğine ait dinamik faktörler ($e/r_0 < 0.5$) (FEMA 368,2001).....	18
Tablo 3.1: LS-DYNA zemin modeli için gerekli parametrelerin açıklanması.....	40
Tablo 3.2: Cuddeback Soil-B zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.	42
Tablo 3.3: Carson Sink Dry zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.....	44
Tablo 3.4: Carson Sink Wet zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.	45
Tablo 3.5: Ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistemin $\frac{1}{4}$ lük parçasının düğüm nokta koordinatlarının belirlenmesi.	52
Tablo 3.6: Seçilen deprem yer hareketlerinin karakteristik özellikleri.	60
Tablo 3.7: Seçilen deprem yer hareketleri için ölçekleme katsayıları.	60
Tablo 4.1: Sıvı serbest yüzeyi x doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn^2).	69
Tablo 4.2: Sıvı serbest yüzeyi y doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn^2).	70
Tablo 4.3: Sıvı serbest yüzeyi z doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn^2).....	70
Tablo 4.4: Serbest sıvı yüzeyi maksimum çalkalanma yüksekliği (m).....	72
Tablo 4.5: Tank tavanında oluşan maksimum deformasyonlar (m).....	75
Tablo 4.6: Tank tabanında x doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).	80
Tablo 4.7: Tank tabanında y doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).	81
Tablo 4.8: Tank tabanında z doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).	81
Tablo 4.9: Tank tabanında x eksenine etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).	86
Tablo 4.10: Tank tabanında y eksenine etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).	87
Tablo 4.11: Tank tabanında z eksenine etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).....	87

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A_0	: Zemin malzeme modeli kuadratik yuvarlatma katsayısı
A_1	: Zemin malzeme modeli kuadratik yuvarlatma katsayısı
A_2	: Zemin malzeme modeli kuadratik yuvarlatma katsayısı
$A_c(T_{cn})$	: Konvektif modu taban kesme kuvveti katsayısı
B	: Dikdörgen sonlu elemanlar ağ derinliği
B_{pml}	: PML tabakası derinliği
B_s	: Zemin tabakası derinliği
C	: Çok serbest dereceli sistem sönüm matrisi
c	: Tek serbest dereceli sistem sönümü
c_0	: Eşdeğer sönüm
D	: Tank çapı
f_0	: Basitleştirilmiş ayrık analizden elde edilen katsayı
G	: Kayma modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Tanktaki sıvı yüksekliği
H_{pml}	: PML tabakası yüksekliği
H_s	: Zemin tabakası yüksekliği
H_t	: Tank yüksekliği
h_n^*	: n.moda ait etkin yükseklik
J_2	: Plastik akma fonksiyonu katsayısı
K	: Çok serbest dereceli sistem rijitlik matrisi
K_{hacim}	: Hacimsel genleşme modülü
K_H	: Temel-zemin sistemi statik yatay rijitliği
K_R	: Temel-zemin sistemi statik dönme rijitliği
K_u	: FEMA temel-zemin sistemi statik yatay rijitliği
K_v	: FEMA temel-zemin sistemi statik düşey rijitliği
K_θ	: FEMA temel-zemin sistemi statik dönme rijitliği

k	: Tek serbest dereceli sistem rijitliği
k_{ss}	: Taşıyıcı sistemin yatay rijitliği
k_c	: Salınım kütesine ait rijitlik
L	: Dikdörgen sonlu elemanlar ağ uzunluğu
L_p	: PMM sonsuz ortam içerisindeki elastik bölge uzunluğu
L_{pml}	: PML tabakası uzunluğu
L_s	: Zemin tabakası uzunluğu
M	: Çok serbest dereceli sistem kütle matrisi
M_b	: Tank tabanında oluşan eğilme momenti
m	: Tek serbest dereceli sistem toplanmış kütle
m_v	: Boş hazne kütlesi
m_{ss}	: Taşıyıcı sistem kütlesi
P,p	: Basınç
P_b^t	: Yapı-zemin etkileşiminde yapıya ulaşan reaksiyon kuvveti
P_e^0	: Yapı-zemin etkileşiminde deprem kuvveti
PGA	: Deprem yer hareketi maksimum ivme değeri
PSA	: Sözde ivme spektrumu
R	: Tank yarıçapı
RO	: Birim hacim ağırlığı
r	: Yapı sisteminin yarıçapı
r_u	: Ötelenme eşdeğer yarıçapı
r_θ	: Dönme eşdeğer yarıçapı
T_c	: Salınım periyodu
T_{cn}	: n. salınım periyodu
T	: Tek serbest dereceli sistem periyodu
$T1$	: Tank sisteminin birinci (hakim) periyodu
u	: Eylemsizliğe bağlı yerdeğiştirme
u^0	: Serbest alan hareketi (free field ground motion)
u^t	: Sistem toplam yerdeğiştirmesi
$u_{g(t)}$	: Zaman ortamında yer değiştirme hareketinin zamana bağlı değişimi
v_s	: Kayma (s) dalga hızı
$\tilde{V}$	: Tank tabanında oluşan kesme kuvveti

W	: Tanktaki sıvı yüksekliği
W_d	: Tekrarlı yükleme altında tüketilen enerji miktarı
W_s	: Tekrarlı yükleme altında en büyük şekildeğiştirme enerji miktarı
α	: Rayleigh yönteminde rijitlik matrisi katılım oranı
α_u	: Temel-zemin ve yapı dinamik davranışına bağlı katsayı
α_θ	: Temel-zemin ve yapı dinamik davranışına bağlı katsayı
β	: Rayleigh yönteminde kütle matrisi katılım oranı
δ	: Zeminin histeritik ve ya malzeme sönüm kapasitesi
δ_s	: Çalkalanma dalga yüksekliği
ϕ	: Deviatorik plastik akma fonksiyonu
σ_y	: Tek eksenli akma gerilmesi
λ_n	: Birinci mertebeden birinci türde Bessel fonksiyonunun kökleri
ζ	: Taşıyıcı sistem sönüm oranı
ζ_0	: Eşdeğer sönüm oranı
$\tilde{T}$	: Yapı-temel sistemine ait eşdeğer periyot
$\tilde{\zeta}$	: Yapı-temel sistemine ait sönüm oranı

Kısaltmalar	Açıklama
API	: Amerika Petrol Enstitüsü
BULK	: Hacimsel genleşme modülü
EPS	: Volumetrik birim şekildeğiştirmeler
FEMA	: Federal Acil Durum Yönetim Kurulu
H1	: Deprem yer hareket kaydının global x doğrultusundaki bileşeni
H2	: Deprem yer hareket kaydının global y doğrultusundaki bileşeni
MID	: Malzeme Numarası
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
PML	: Kusursuz uyumlu tabakalar (Perfectly Matched Layers)
PMM	: Kusursuz uyumlu ortam (Perfectly Matched Medium)
V	: Deprem yer hareket kaydının global z doğrultusundaki bileşeni

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NONLİNEER SIVI-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ VE SİLİNDİRİK TANKLARIN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kayahan AKGÜL

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Namık Kemal ÖZTORUN

II. Danışman : Doç. Dr. Yasin FAHJAN

Tankların deprem davranışları geleneksel yapılardan çok farklıdır. Kuvvetli yer hareketi esnasında, tank sisteminde birçok davranış mekanizması oluşmaktadır. Bu yüzden silindirik tankların dinamik performanslarının değerlendirilebilmesi için tank-sıvı ve tank-zemin etkileşimlerinin gerçekçi bir şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Nonlinear sıvı-yapı-zemin etkileşimini değerlendirilmesi için analitik, deneysel veya nümerik yöntemler kullanılabilir. Analitik yöntemler sıvı-yapı-zemin davranışı ile ilgili pek çok varsayım yapılarak geliştirilirler. Deneysel çalışmalar ise sistemin gerçek davranışını incelemek için gerekli olmalarına rağmen, zaman alıcı, pahalı ve sadece belli sınır koşulları ve hareketler için geçerlidir. Hâlbuki sıvı-katı-zemin etkileşimi tekniklerini kullanarak yapılan uygun nümerik simülasyonlarla tank dinamik davranışının değerlendirilmesi en etkili çözüm yoludur.

Tez kapsamında ilk olarak nonlinear sıvı-yapı-zemin etkileşimi modelleme teknikleri incelenmiştir. Ardından silindirik tankların dinamik davranışlarının değerlendirilmesi için nümerik modeller oluşturulmuştur. Tank-sıvı-zemin etkileşim modellerinde 3 farklı zemin tipi ve 3 farklı deprem yer hareketi kullanılmıştır. Sonuç olarak sıvı-yapı-zemin etkileşimi için kullanılan nümerik yöntemin başarısı ve zemin ortamının nonlinear davranışının tank sisteminin dinamik davranışına olan etkisi sıvı serbest yüzeyi çalkalanma yüksekliği ve ivmeleri, devrilme momenti ve tank deformasyonları açısından incelenmiştir.

Aralık, 2014, 113

Anahtar Kelimeler: Silindirik Tanklar, Yapı-Sıvı Etkileşimi, Yapı-Zemin Etkileşimi, Sonlu Elemanlar, Nonlinear Analiz

SUMMARY

MASTER THESIS

MODELLING OF NONLINEAR FLUID-STRUCTURE-SOIL INTERACTION AND EVALUATION OF DYNAMIC RESPONSE OF CYLINDRICAL TANKS

Kayahan AKGÜL

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Namık Kemal OZTORUN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yasin FAHJAN

Earthquake response of tanks is different from traditional structures. Tanks subjected to strong ground motion can have different nonlinear behavioural due to multi-domains system complexities. Therefore tank-fluid interaction and tank-soil interaction has to be modelled accurately to evaluate dynamic performance of cylindrical tanks.

The evaluation of fluid-structure-soil interactions may be investigated analytically, experimentally and numerically. The derivation of an analytical solution for the fluid-structure-soil behaviours includes many assumptions and simplifications. Even though, experimental works are necessary to study the actual behaviour of the system, they are time consuming, very costly and performed only for specific boundary and excitation conditions. However, appropriate numerical simulation using fluid-structure-soil interaction techniques is effective solution to evaluate the dynamic response of tanks.

In this thesis, modelling techniques of nonlinear fluid-tank-soil interactions were investigated and summarized. Then, mesh generation algorithms were utilized to generate numerical tank models in order to evaluate the dynamic response of the tank. Three different soil types were used to model the soil domain. The nonlinear fluid-tank-soil system was analysed for three earthquake excitation applied at the rock base of system. The sloshing of the fluid, displacement of the tank wall and shear force and overturning moment at the tank base were studied. Finally, effects of nonlinear soil domain on dynamic response of tank system were investigated. The success of the preferred numerical method for fluid-structure-soil interaction was also investigated.

December, 2014, 113

Keywords: Cylindrical Tanks, Structure-Fluid Interaction, Structure-Soil Interaction,
Finite Element, Nonlinear Analysis

1. GİRİŞ

Geçmişte gözlenen büyük depremler esnasında, sıvı ihtiva eden tanklarda, rezervuarlarda, su alma kulelerinde ve nükleer yapılarda büyük hasarların oluşması, tankların deprem performanslarının değerlendirilmesini yeniden gündeme getirmiştir.

Kuvvetli yer hareketi esnasında, sisteminde birçok davranış mekanizması olduğundan, tankların deprem davranışları geleneksel yapılardan çok farklıdır. Katı-sıvı etkileşiminin gözönüne alınarak tank sisteminin deprem performansının; analitik, deneysel veya nümerik yaklaşımlar ile değerlendirilmesi mümkündür. Analitik yöntemler hem yapının hem de sıvının davranışı ile ilgili pek çok varsayımlar yapılarak geliştirildiğinden dolayı tank-sıvı etkileşiminin gerçek davranışını yansıtmazlar. Tank sisteminin deprem performansının deneysel olarak değerlendirilmesi için, deneysel düzeneklerin kurulumu hem pahalı hem de uzun zaman gerektirdiğinden fazla tercih edilmemektedir. Ayrıca tek bir tank modeli ile deprem performansının değerlendirilmesi mümkün olmaması sebebiyle, deneysel modellerin sayısının artacağı düşünülmelidir. Diğer iki yaklaşımdan farklı olarak tank sistemlerinin gerçek performanslarının, katı-sıvı etkileşiminin tüm nonlinear etkileri gözönüne alınarak nümerik yöntemler ile değerlendirilmesi en etkili çözüm yoludur.

Yapı-zemin etkileşimi, deprem etkisi altında, zemin ortamının, üstyapının bir arada gözönüne alındığı ortak bir model çerçevesinde yapı ve zeminin deprem sırasında birbirlerini karşılıklı olarak etkilemesi olarak tanımlanabilir. Taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinden oluşan ve zemin ortamı tarafından değişikliğe uğratarak yapıya ulaşırlar veya zemin ortamına geri dönebilirler. Yapı-sıvı veya yapı-zemin etkileşiminden söz edilince etkileşim çift taraflı olguyu yansıtmaktadır.

Yapı-zemin etkileşiminde, yapı-sıvı etkileşiminde olduğu gibi çeşitli yaklaşımların bulunmasına karşın, tank-zemin karşılıklı etkileşiminin nümerik yöntem ile modellenmesi tercih edilmiştir.

Bu tez kapsamında tank-sıvı-zemin etkileşiminin deprem performanslarının değerlendirilmesi için nümerik yaklaşımlar kullanılmıştır. Yapı-zemin ve yapı-sıvı etkileşimleri tank sisteminin gerçek davranışını yansıtacak şekilde modellenmelidir. Bu yüzden tank-sıvı-zemin sistemindeki tüm etkileşimlerin ve davranış mekanizmalarının nonlinear olarak gözönüne alınmasını sağlayan LS-DYNA yazılımı, analiz platformu olarak seçilmiştir.

Tank-sıvı etkileşiminin modellenmesi için, doğrusal olmayan (nonlinear) Lagrangian kabuk elemanlar ve içerikteki sıvı için ise tank ile olan arayüzeyde yapı ile birlikte şekil değiştirebilen, tankın içerisinde ise sıvı için düzenli bir ağ oluşturabilen ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) katı elemanlar (solid) kullanılarak tank-sıvı sisteminin sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır.

Tank-zemin etkileşimini nümerik modelinde zemim ortamı ve emici sınır plakaları (PML) için katı elemanlar (solid) kullanılmıştır. PML model elastik ortam olarak modellenirken, zemin ortamının tüm nonlinear özellikleri korunmuştur. Tank-zemin etkileşiminin yapısal sisteme etkisi 3 farklı zemin ve 3 farklı deprem yer hareketi altında incelenmiştir. Deprem yer hareketi zemin anakayasında tanımlanarak zemin ortamının deprem dalgalarına olan etkisi dikkate alınmıştır. Zemin-PML sistemi ile tank-sıvı sistemi etkileşimin dikkate alınması için özel temas (contact) nonlinear algoritmaları kullanılmıştır.

Bu tez çalışması boyunca, tank-sıvı-zemin sisteminin bütün doğrusal olmayan (nonlinear) davranış kaynaklarını göz önüne alabilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanan LS-DYNA yazılımı ile sıvı ihtiva eden üç boyutlu silindirik tankların deprem yükleri altında nonlinear davranışları incelenmiştir. Tank ve sıvının malzeme özellikleri için gerçek değerler kullanılmış; yer hareketi olarak Türkiye’de meydana gelen depremlerden seçilen kayıtlar uygulanmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde tankların deprem performansının değerlendirilmesi için gözönüne alınması gereken parametrelerden, yapı-sıvı ve yapı zemin etkileşimi çözüm yöntemi için geliştirilen yaklaşımlardan ve son olarak nümerik analizler için seçilen yazılım hakkında bilgiler verilecektir.

2.1. TANKLARIN DEPREM PERFORMANSLARI

Geçmişte büyük depremler sırasında sıvı ihtiva eden tank hasarlarına çok yaygın olarak rastlanmıştır. Bu hasarların oluşmasının altında hidrodinamik etkilerden ortaya çıkan kuvvetlerin yeterli doğrulukla belirlenememesi yatmaktadır. Ayrıca, tankların deprem davranışları geleneksel yapılardan çok farklıdır. Bu yapılar yüksek sünekliğe sahip olmadıkları için enerji sönümleme kapasiteleri düşüktür ve şiddetli depremler sırasında doğrusal elastik olmayan bir davranış gösterirler. Tankların depremler sırasındaki gerçek tepkilerinin belirlenmesi için gerekli davranış mekanizmaları şöyle sıralanabilir (Livaoğlu,2005);

- Sıvı ihtiva eden tankların doğrusal elastik olmayan davranışları
- Tank malzemesinin akma yüzeyine ulaşması
- Sıvı serbest yüzeyinde büyük genlikli çalkalanmaların oluşması
- Yapı-sıvı etkileşiminde nonlinear etkilerin gözönüne alınarak tank sisteminin modellenmesi
- Deprem etkisi altında zeminin, tank sistemi üzerindeki etkisi gözönüne alınarak yapı-zemin etkileşiminin güvenilir bir şekilde modellenmesi
- Anakayadan yayılan deprem dalgalarının zemin tarafından değiştirilmesi
- Yapı-sıvı etkileşiminin farklı zemin tipleri tarafından değişikliğe uğratılması
- Çalkalanma dalgalarından kaynaklı yüksek gerilmelerden dolayı tank çatısının sistemden ayrılması
- Tank cidarının burkulması
- Tank tabanının ve cidarının büyük genlikli şekil değiştirmesi
- Tank tabanı tabanında plastik dönmelerin oluşumu

- Tank temelinin değişik miktarlarda oturması sebebi ile oluşan hasarlar

Bu davranış mekanizmalarının dikkate alınmadığı durumlarda ortaya çıkabilecek bazı hasar mekanizmaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Sıvı ihtiva eden tankların deprem etkisi altındaki gerçek performanslarının tam olarak belirlenmesi için tankların analizlerinde kullanılacak metodun bahsedilen bütün bu doğrusal olmayan (nonlineer) etkileri dikkate alması gerekir.



(a)



(b)

Şekil 2.1: Tankların deprem performanslarının değerlendirilmesini hatalı yapılması durumunda ortaya çıkabilecek hasar tipleri;(a):Elmas şeklinde burkulma, (b):Fil Ayağı şeklinde burkulma (Özdemir,2010).

2.2. YAPI-SIVI ETKİLEŐİŐİ

Yapı-sıvı etkileşimini içeren tankların sismik analizi karmaşık bir problemdir. Karmaşıklığın temelinde yukarıda bahsedilen davranış mekanizmaları yatmaktadır. Bütün bu davranış mekanizmalarını gözönüne alarak tank-sıvı sisteminin gerçek sismik davranışının analitik yöntemler yardımıyla belirlenmesi mümkün değildir. Analitik yöntemler hem yapının hem de sıvının davranışı ile ilgili pek çok varsayım yapılarak geliştirilirler. Tankların sismik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi diğer bir yöntemdir. Ancak deneysel olarak tank davranışını incelenmek hem masraflı

olduğundan hem de uzun zaman sürdüğünden tercih edilen bir yöntem değildir. Tank-sıvı sistemlerinin gerçek davranışlarının, tüm nonlinear etkilerin gözönüne alarak incelenmesi için en iyi yöntem ise nümerik metotların kullanılmasıdır.

Günümüzde, mevcut bilgisayar yazılımları ile tank-sıvı sisteminin sahip olduğu bütün nonlinear davranış kaynaklarını dikkate alarak sistemin dinamik davranışını incelemek mümkündür.

2.2.1. Analitik Yaklaşımlar

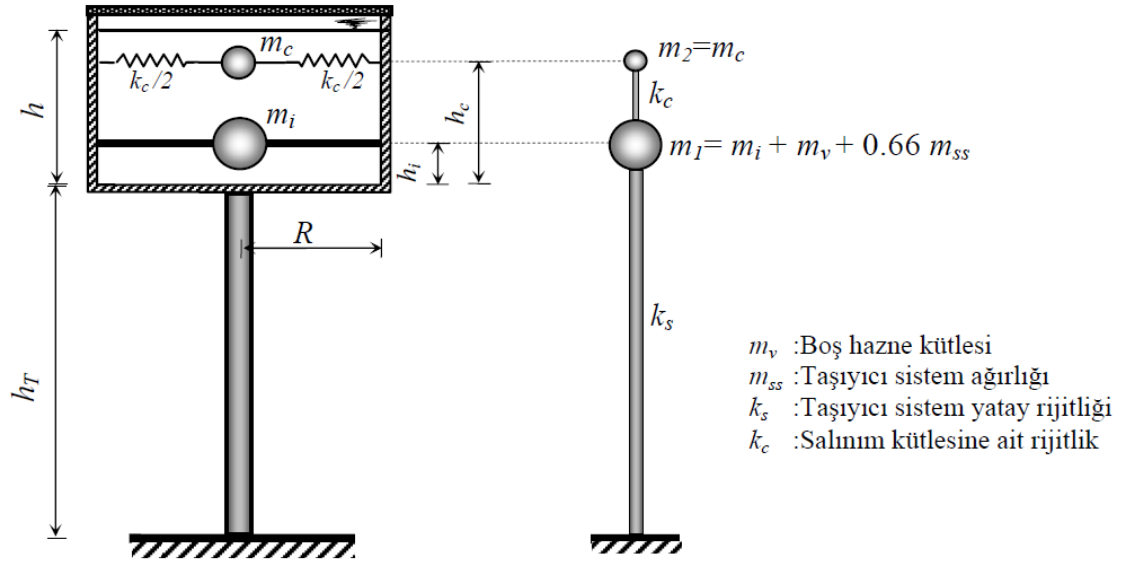
Mühendislik hesaplamalarında ve sismik tank tasarım şartnamelerinde deprem yükleri altında tankların üzerinde oluşan deprem kuvvetlerini belirlemek için basitleştirilmiş yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden en çok başvurulana Housner (1954), Yang ve Veletsos (1977), Haroun ve Housner (1981) ve Malhotra ve diğ. (2000) tarafından geliştirilmiştir.

2.2.1.1. *Housner Yaklaşımı*

Housner (1954, 1957 ve 1963) yatay harekete maruz, değişik geometrilere sahip sıvı ihtiva eden tanklarda meydana gelen hidrodinamik etkileri incelemek için kısmi diferansiyel denklemler ve seriler içermeyen yaklaşık bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Bu yöntemde, gerçek sıvı hareketine benzeyen basit bir akış belirlenmeye çalışılmış ve bu akış basıncın belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu yöntemde kabul edilen yaklaşımlar;

- Tankın duvarlarının rijit olduğu kabul edilmiştir.
- Tank içerisindeki sıvının sıkışmaz ve viskozitesiz olduğu model kullanılmıştır.
- Tankın zemine ankastre olarak bağlandığı varsayılmıştır.
- Sıvı davranışı doğrusallaştırılarak rijit tabakalar arasına sıkıştığı varsayılmıştır.
- Sıvının hareketinden doğan yerdeğiştirmelerin küçük olduğu kabul edilmiştir.

Housner (1954, 1957 ve 1963), yatay hareket altında tankın içeriğindeki sıvının yarattığı hidrodinamik etkileri temsil etmek üzere iki kütle tanımlamıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Housner yaklaşımında tank sisteminin eşdeğer tek serbestlik dereceli sistem ile modellenmesi (Livaoğlu,2005).

Tankın çeperi ile birlikte hareket eden atıl (impulsive) kütleyi ve yüzeye yakın olan bölgede çalkalanma hareketine katılan değişik periyotlara sahip çalkalanan kütle miktarını (konvektif) veren denklemleri elde etmiştir. Atıl (impulsive) kütleyi rijit olarak, çalkalanan kütleleri ise bir yay yardımıyla basit mekanik bir sisteme bağlayarak sıvı içeren tankın hareketinden ortaya çıkan hidrodinamik tepkiyi modellemiştir. Housner'in dinamik etkiye maruz kalan sıvı-tank sistemi için gerçek sıvı akış davranışını basitleştirerek önerdiği yöntem sade olsa da, bazı sınırlamalar içerir. Atıl (impulsive) kısmı veren formüller elde edilirken sıvı yüzeyinin yatay olduğu, çalkalanan kısım ile ilgili çözümlemeler yapılırken ise sıvı yüzeyindeki yerdeğiştirmelerin çok küçük olduğu varsayılmıştır. Daha sonraki tarihlerde yapılan çalışmalarda bu yöntemin dinamik basınç dağılımı gibi üst düzey mertebedeki etkilerin belirlenmesinde daha az bir doğruluk derecesine sahip olduğu kanıtlanmıştır (Livaoğlu,2005).

2.2.1.2. *Bauer Yaklaşımı*

Housner yaklaşımından farklı olarak birden fazla salınım kütlelerinin de dikkate alınabilmesidir. Eksen takımının sıvı geometrik merkezinde olduğu ve sıvı belirli yüksekliklerde ayrılarak bunlardan taban seviyesindeki kütlenin salınım yapmadığı diğer seviyelerdeki sıvıların ise ayrı ayrı salınım yapan sıvı kütleleri oldukları kabul edilmiştir (Bauer,1964).

2.2.1.3. Yang ve Veletsos Yaklaşımı

Yang ve Veletsos (1977) tankın rijit olduğunu varsayarak tank üzerine etkiyen hidrodinamik basınç kuvvetlerini tank ve sıvı arasındaki etkileşimleri ihmal ederek belirlemiştir. Tankın şekildeğiştirebilme davranışını gözönüne almak için tankın belirli mod şekillerinde ve dairesel kesitini koruyarak hareket ettiğini varsayarak sıvı için Laplace denkleminin sınır koşullarını belirlemiş ve atıl ve çalkalanma bileşenlerine ait hidrodinamik basınç dağılımları formüllerini elde etmiştir. Veletsos (1984), Yang ve Veletsos (1977)'un rijit tanklar için geliştirdiği metodu tank duvarının şekildeğiştirebilme özelliğini gözönüne almak için değiştirmiştir. Hidrodinamik basınç dağılımları tankın rijit olduğu varsayılarak bulunmuş fakat bu basınç dağılımlarına ait ifadelerde yer alan en büyük yer ivmesi değerleri spektral ivme değerleri ile değiştirilerek tankın şekildeğiştirebilmesi dikkate alınmıştır.

2.2.1.4. Haroun ve Housner Yaklaşımı

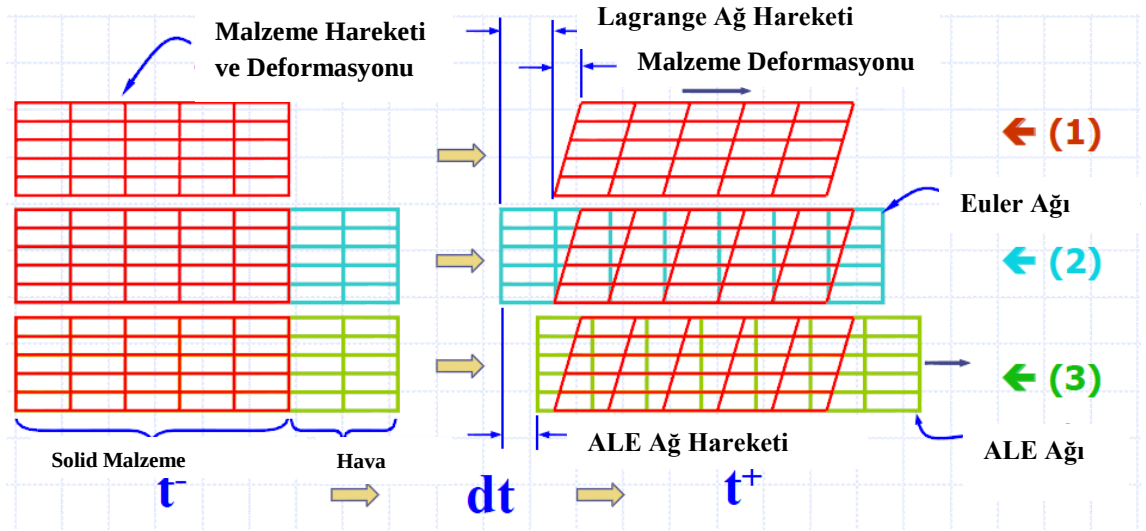
Haroun ve Housner (1981) her iki ortamı yani tank ve sıvıyı birlikte sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile modellemek yerine tank için sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanırken, sıvı için sınır entegrali yöntemini kullanarak analitik olarak çözmüşlerdir. Sıvının sıkışamaz ve viskozitesinin olmadığı ve akımın çevrintisiz olduğu varsayılarak Laplace denklemi ile modellenmişlerdir.

2.2.1.5. Malhotra Yaklaşımı

Malhotra ve diğ. (2000), Yang ve Veletsos (1977) tarafından geliştirilen yöntemleri, basit ancak doğru bir şekilde ve daha genel olarak uygulanabilir bir hale getirmek için, hem atıl hem de çalkalanmaya ait üst mertebeden modların etkilerini dikkate alarak, iyileştirmişlerdir.

2.2.2. Nümerik Yaklaşımlar

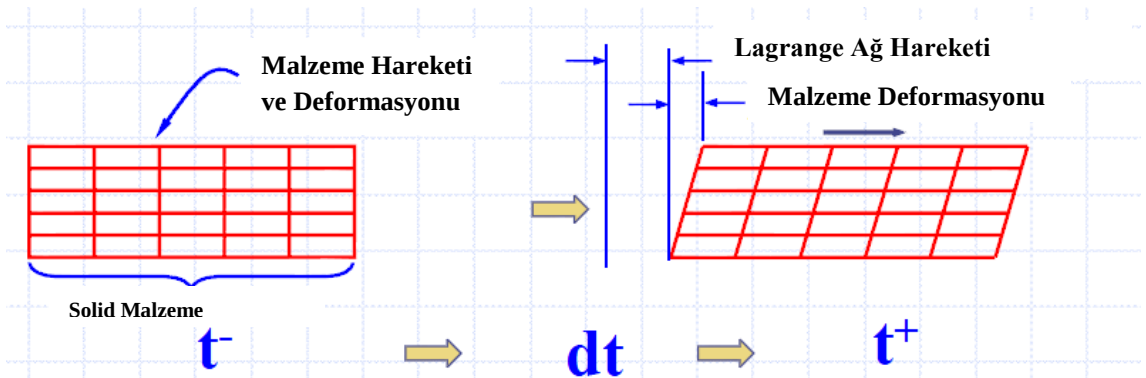
Katı-sıvı etkileşimi problemlerinin çözümü için, Lagrange, Euler ve ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) yöntemleri bulunmaktadır. Bu üç farklı yaklaşımın arasındaki farklar, örnek olarak ele alınan iki boyutlu katı (solid) elaman modelinde Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Do ve Day,2005).



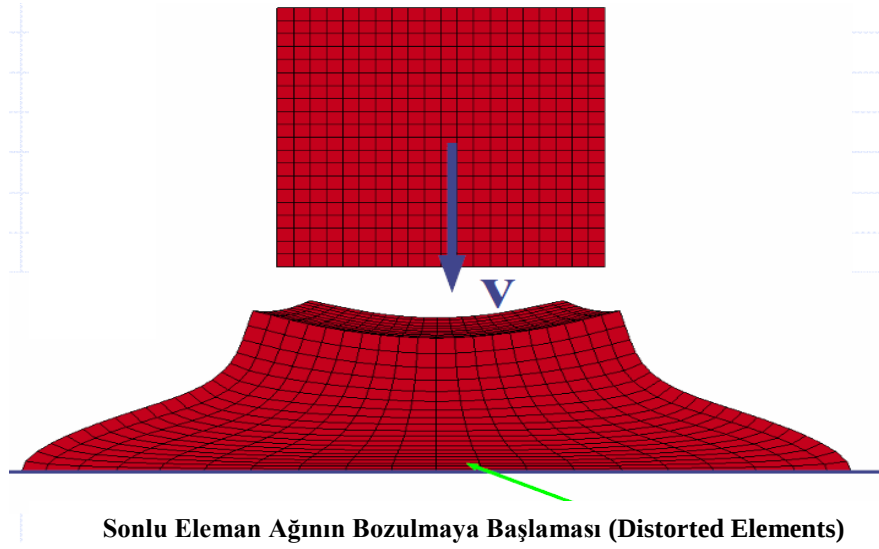
Şekil 2.3: Katı-sıvı etkileşimi çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması;
(1):Lagrange, (2):Euler, (3):ALE (Do ve Day,2005).

2.2.2.1. Lagrange Yaklaşımı

Lagrange algoritmasında, sonlu elemanlar ağı malzeme ile birlikte hareket eder (Şekil 2.4). Böylece, malzeme sınırları doğrulukla belirlenir ve sınır koşulları kolaylıkla uygulanabilir. Genellikle yapısal mekanikte kullanılan bu algoritma oldukça ekonomik olmasına rağmen malzeme aşırı şekil değiştirdiğinde malzeme ile birlikte ağıda deforme olduğu için analiz sonuçlarında doğruluk kayıpları ve nümerik instabilite ortaya çıkabilir (Şekil 2.5).



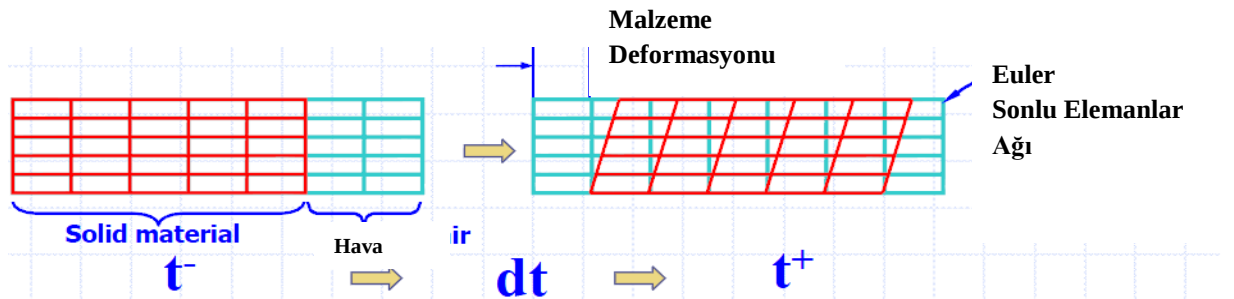
Şekil 2.4: Lagrange yöntemi malzeme deformasyonu (Do ve Day,2005).



Şekil 2.5: Lagrange yönteminde aşırı deformasyonların oluşumu
(Do ve Day,2005).

2.2.2.2. Euler Yaklaşımı

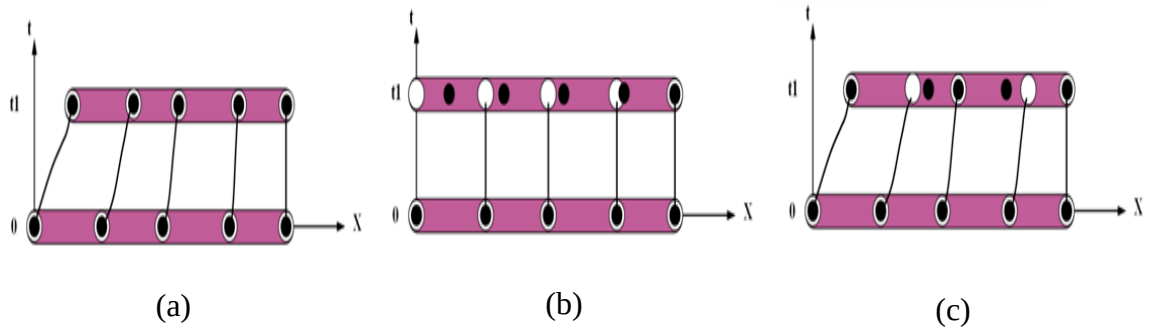
Euler algoritmasında sonlu elemanlar ağı sabittir ve malzeme bu ağı içinde hareket eder (Şekil 2.6). Genellikle sıvıların mekaniğinde kullanılan bu algorithmada ağı ve malzeme bağımsız olduğu için malzemenin yüksek genlikli hareketleri ağıda bir deformasyon sorunu yaratmaz. Fakat malzeme ağı göre göreli olarak hareket ettiği için ilave olarak ortaya çıkan konveksiyonel terimler diferansiyel denklemlerin çözümünde zorluklara sebep olur. Euler algoritmasında malzemelere ait sınırların kati olarak belirlenmesi ve sınır koşullarının uygulanması zorlaşır. Ayrıca, malzemenin içinde hareket edebileceği bütün ortamın ağı ile tanımlanması gerekir. (Özdemir,2010)



Şekil 2.6: Euler yönteminde sonlu elemanlar ağı ve malzeme deformasyonu
(Do ve Day,2005).

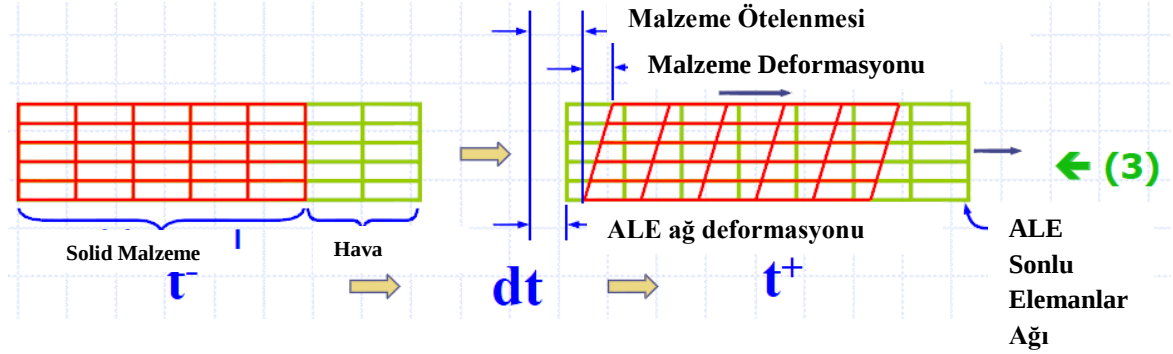
2.2.2.3. ALE Yaklaşımı

Katı ve sıvı ortamlarını birlikte içeren problemlerde her iki ortam için sadece Lagrange algoritmasının veya sadece Euler algoritmasının kullanılması optimum sonucu vermez. Çünkü sıvının büyük genlikli deformasyonları ile Lagrange algoritması başa çıkamaz. Euler algoritmasının katılar için uygulanması ise analiz sonuçlarının doğruluğunun kaybolmasına sebep olur. Çoğu sıvı-katı etkileşimi probleminin çözümü için kullanılan yöntem, sıvı için Euler algoritması kullanırken katı için Lagrange algoritmasının kullanılması ve bu iki ortam için bağımsız olarak tanımlanmış ağlar arasında etkileşimi sağlayan bağlaşım algoritmasının (coupling algorithm) uygulanmasıdır. Fakat bağlaşım algoritması oldukça karmaşıktır. Bunun yerine sıvı ve katının arayüzünde, sıvı için kullanılan Euler ağı, katı için tanımlanan Lagrangian ağına adapte ettirilerek ve bu her iki ağın aynı ortak noktaları paylaşmasının sağlanmasıyla problem büyük ölçüde kolaylaştırılabilir. ALE algoritmasının katı-sıvı etkileşimi problemlerine uygulanması ile katı-sıvı arayüzündeki her iki ortam için aynı olan düğüm noktaları katı ile birlikte hareket ederken, diğer düğüm noktaları sabit kalarak sıvı için bozulmamış bir ağ sistemi yaratılmış olur (Özdemir,2010). Bunun için, ALE yönteminde Lagrange ve Euler koordinatlarına ek olarak ilave bir koordinat sistemi daha tanımlanır ve sonlu elemanlar ağının bu ilave koordinat sistemine bağlı olarak rastgele hareket etmesi sağlanır (Souli ve diğ., 2000 ve Souli ve Zolesio, 2001). Şekil 2.7’de sonlu elemanlar ağına ait düğüm noktalarının ve malzeme noktalarının hareketlerinin Lagrange, Euler ve ALE algoritmaları için gösterimleri verilmiştir (Fahjan ve diğ.,2010).

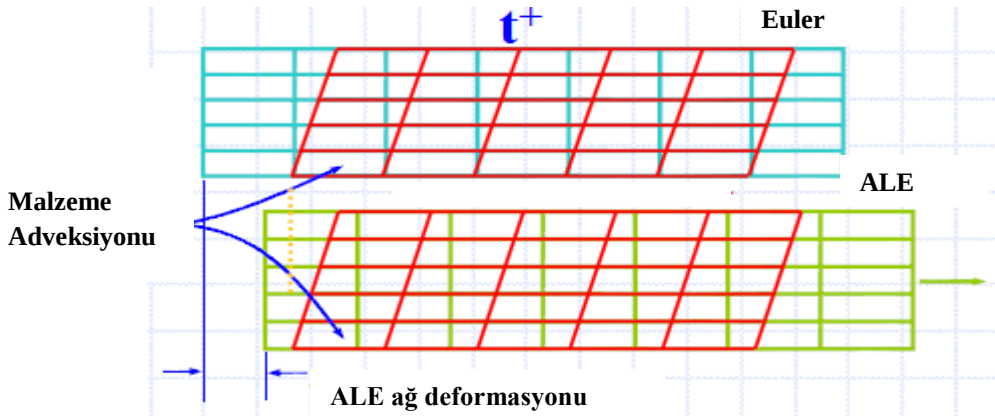


Şekil 2.7: Sonlu elemanlar ağına ait düğüm noktalarının ve malzeme noktalarının hareketlerinin (a) Lagrange, (b) Euler ve (c) ALE algoritmaları için gösterimleri (Özdemir,2010).

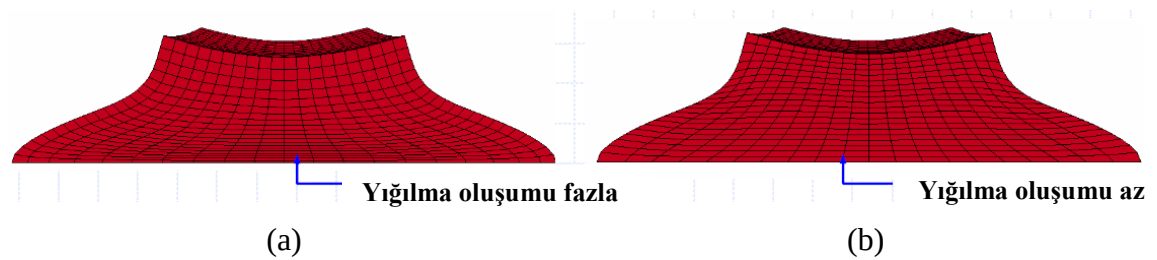
ALE yaklaşımında sonlu elemanlar ağı ve malzeme deformasyonları Şekil 2.8’de gösterilmiştir. ALE yönteminin Euler yönteminden üstünlüğü Şekil 2.9’da, Lagrange yönteminden üstünlüğü ise Şekil 2.10’da gösterilmiştir (Do ve Day,2005).



Şekil 2.8: ALE yönteminde sonlu elemanlar ağı ötelenmesi ve malzeme deformasyonu.



Şekil 2.9: ALE yöntemi ile Euler yönteminin karşılaştırılması.



Şekil 2.10: Aşırı deformasyonlara karşı yöntemlerin reaksiyonu; (a) Lagrange (b) ALE.

Sıvı ihtiva eden tankların analizleri için, serbest sıvı yüzeyindeki büyük genlikli çalkalanma hareketi ve tankın aşırı deformasyonları ile başa çıkabilecek ve sıvının tankla birlikte hareket eden kısmının ve çalkalanan bileşeninin tank duvarı üzerinde yarattığı hidrodinamik kuvvetleri doğru olarak belirleyebilecek bir metot gereklidir.

Sonlu elemanlar metodu (FEM) sadece tank-sıvı etkileşimi değil tankın zeminle olan etkileşimini de aynı sistem içinde ve etkili olarak doğrusal elastik olmayan davranışları da göz önüne alacak şekilde tankların modellenmesine olanak sağladığı için bu tür problemlerin çözümü için uygundur. Fakat Sonlu Elemanlar Yönteminin (FEM) Lagrange algoritmasının hem katı hem de sıvı için kullanılarak sıvı ve katı arasında temas algoritmasının (contact algorithm) tanımlanması sıvının aşırı deformasyonundan ötürü analizde doğruluk kayıplarına, zaman adım aralığının büyüklüğünün aşırı düşmesine ve bazı durumlarda analizin tamamlanmamasına sebep olmaktadır. Diğer yöntemlere olan üstünlüklerinde ötürü, bu çalışmada, tankların deprem yükleri altında analizlerinde hesap ağının bütünlüğünü sağlayan ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) metodu tercih edilmiştir.

2.2.3. Yönetmeliklerde Tank-Sıvı Etkileşimi

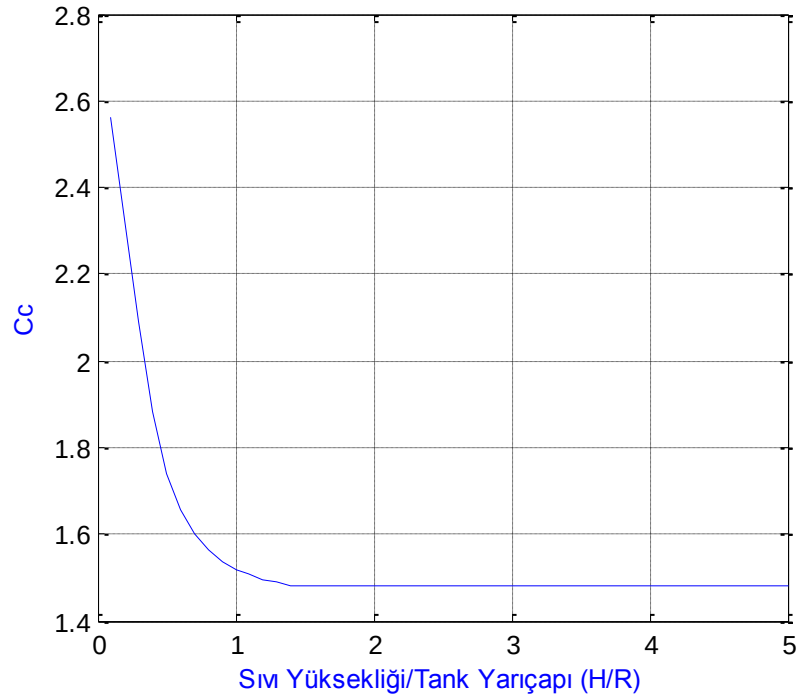
Sismik tank kodlarına göre tankların deprem etkisi altında oluşabilecek hasarları istenilen performans kriterlerine göre belirlemek oldukça sınırlıdır. Ancak her zaman tankların performanslarını deneysel veya nümerik yöntemler ile değerlendirmek, ekonomi ve zaman gibi kriterler gözönüne alındığında mümkün olmayabilir. Bu açıdan tankların performanslarını sismik kodlar yardımıyla değerlendirilmesi gerekebilir (Fahjan ve diğ.,2010).

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.

Farklı yönetmeliklere göre salınım moduna ait periyotların elde edilmesi Tablo 2.1’de verilmiştir. Bu tabloda; R tank yarıçapı, D tank çapı, g yerçekimi ivmesi, H sıvı yüksekliği, T_c salınım periyodu, λ_n katsayıları ise sırasıyla $\lambda_1=1.841$, $\lambda_2=5.331$ ve $\lambda_3=8.536$ olarak tanımlanmıştır. EuroCode 8’e göre önerilen periyot hesabında C_c katsayılarının H/R oranına göre elde edilmesi için Şekil 2.11’den yararlanılır.

Tablo 2.1: Salınım moduna ait periyotların farklı yönetmeliklere göre hesaplanması.

Yönetmelik	Salınım Periyodu
API 650 (2005) Housner	$T_c = \frac{1.04}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 H}{D}\right)}} \sqrt{D}$
EuroCode 8 (2006) (Veletsos ve Yang,1977) (Malhotra,2000)	$T_c = \frac{2 \pi \sqrt{R/g}}{\sqrt{\lambda_n \tanh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)}}$ $T_c = C_c \sqrt{R}$
NZSEE (1986) (Veletsos ve Yang,1977)	$T_c = \frac{2 \pi \sqrt{R/g}}{\sqrt{\lambda_n \tanh\left(\frac{\lambda_n H}{R}\right)}}$



Şekil 2.11: EuroCode 8'e göre önerilen salınım periyot hesabı için C_c katsayısı.

Farklı yönetmeliklere göre tank sisteminde oluşacak maksimum çalkalanma yüksekliği Tablo 2.2’de verilmiştir. Bu tabloda; D tank çapı, T_{c1} birinci salınım periyodu, T_{c2} ikinci salınım periyodu, $A_c(T_{cn})$ ise taban kesme kuvveti katsayısı olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2.2: Çalkalanma yüksekliklerinin farklı yönetmeliklere göre hesaplanması.

Yönetmelik	Salınım Periyodu
API 650	$\delta_s = 0.5DA_c(T_{c1})$
EuroCode 8	$\delta_s = 0.42DA_c(T_{c1})$
NZSEE	$\delta_s = 0.5D\sqrt{0.84A_c(T_{c1}) + 0.07A_c(T_{c2})} + \dots$

2.3. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Yapı-zemin etkileşiminde, yapı-sıvı etkileşiminde olduğu gibi analitik ve nümerik yaklaşımlar bulunmaktadır. Analitik yaklaşımlarda, önerilen çözümler belirli koşullar çerçevesinde tanımlandığından dolayı her zaman etkili bir şekilde sonuca götürmez. Tank-zemin etkileşiminin deprem yer hareketi altında analizi, birçok nonlineer parametreyi barındırdığından, tankların analizinde analitik yaklaşımların yerine nümerik yaklaşımların kullanılması daha doğru bir çözüm yöntemidir.

2.3.1. Analitik Yaklaşımlar

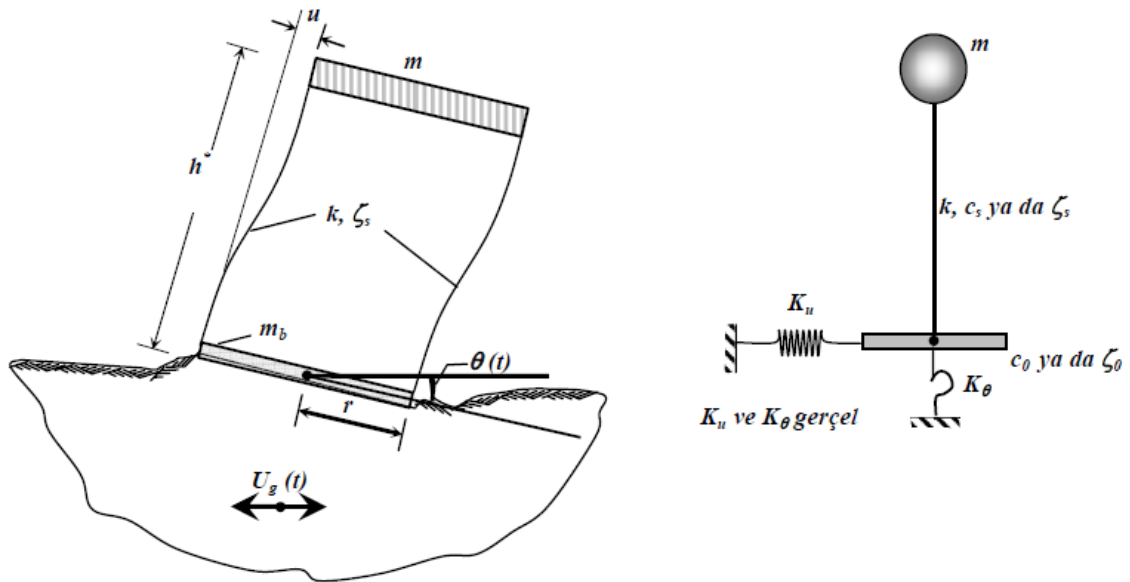
Bir bölgedeki yapının deprem davranışlarının değerlendirilmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gereklidir. Zemin, yapı davranışını değişik şekillerde etkiler;

- Yapının altındaki zemin ana kayadaki deprem etkisini değiştirerek verir. Bu durum özellikle dolgu zeminlerde deprem etkisinin büyümesine sebep olur.
- Zeminin de hareketi ile yapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklik meydana gelir.
- Yapıdaki titreşim enerjisinin önemli bir kısmı; zemine mesnetlenmenin rijit olmaması, zemindeki sönüm ve zeminde geri dönmeyen yayılma etkisiyle söner.
- Yapının üzerinde bulunduğu zeminin etkisi ile deprem sırasında taşıyıcı sistemde farklı oturmalar meydana gelebilir.

Yapı davranışının incelenmesinde ideal yol, deprem hareketinin ana kayaya uygulanması ve bunun üst zeminde ve yapıdaki etkilerinin hesaplanması olarak görülebilir. Ancak yer hareketi için elde edilen bilgilerin ana kayaya ait olup olmayıp, yeryüzü ölçümlerinden elde edildiği düşünülürse bu durumun gerçekçi olmadığı ortaya çıkabilir. Bunun yerine yapının temelinde yay ve sönüm alarak, deprem hareketinin yüzeyden etkilendiğini kabul etmek daha uygun olabilir. Diğer bir yöntem ise, zeminin dinamik karakteristiklerinin önceden belirlenip, zemin ve yapının davranışının birlikte incelenmesidir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde, zeminin rijitliğinin, sönümünü ve yarı sonsuz zemin ortamında yüzeyden yansıyan dalgaların geri dönmeyecek şekilde yayılmasını göz önüne alan çeşitli modeller geliştirilmiştir.

2.3.1.1. Veletsos Yaklaşımı

Veletsos yaklaşımında, yapının temelinde kabul edilen hem yatay hem de dönme serbestliklerine sahip eşdeğer yaylar ve sönümlerle yapı-zemin etkileşimi gözönüne alınmaktadır. (Şekil 2.12) Deprem hareketinin etkisi altında temel-zemin sisteminin tepkileri belirlendikten sonra yapı-temel-zemin sisteminin eşdeğer sönüm değerleri belirlenmektedir.



Şekil 2.12: Yapı-zemin etkileşiminde Veletsos yaklaşımı (Veletsos ve diğ, 1988).

Bu yaklaşımda temel-zemin sisteminin esnekliği yapıya ait periyotların artırılması ile yayılma (radiation) ve tekrarlı yükleme (hysteretic) etkisine bağlı olarak harcanan enerji ise sönüm değerlerinin artırılması ile dikkate alınmaktadır (Veletsos ve diğ., 1988, Kumar, 1996, FEMA 368-369, 2001).

Temel-zemin sisteminin kütleleri ihmal edilerek zemine elastik olarak mesnetli tek kütleli sistemde, harmonik yükleme altındaki periyotu T , yükseklik h_n^* , eşdeğer rijitliği k yatay rijitliği K_u ve dönme rijitliği K_r ise temel-zemin sisteminin periyotu ($\tilde{T}$) 2.1 denklemi ile hesaplanır.

$$\tilde{T} = T \sqrt{\left(1 + \frac{k}{K_u}\right) \left(1 + \frac{K_u (h_n^*)^2}{K_r}\right)} \quad 2.1$$

Zemin sistemin sönümü, harmonik tekrarlı yük etkisinde zemine ait kayma gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden zeminin histerisis ya malzeme sönüm kapasitesi (δ) 2.3 bağıntısı ile hesaplanır.

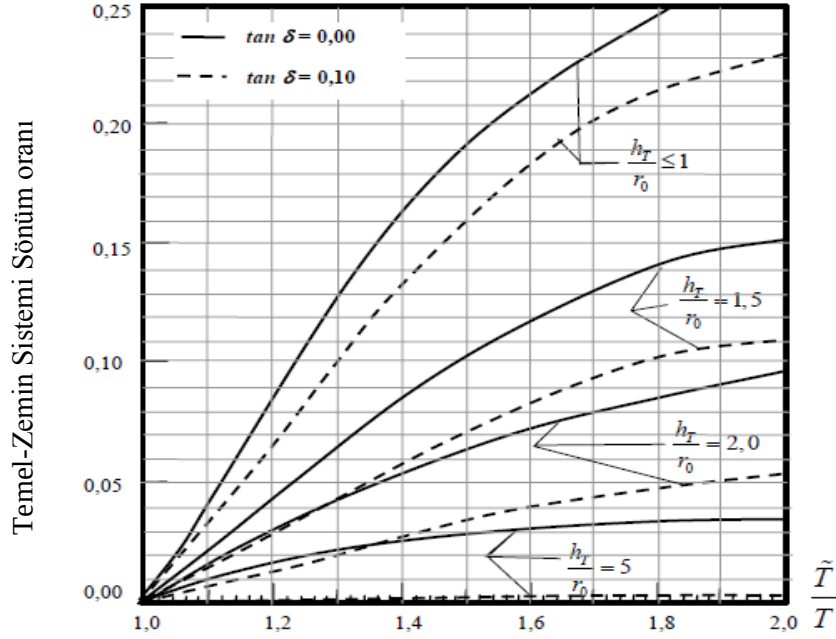
$$\tan(\delta) = \frac{1}{2\pi} \frac{W_d}{W_s} \quad 2.2$$

Burada W_d , zeminin harmonik tekrarlı yükleme etkisinde gerilme-şekil değiştirme grafiğinde devirler arasındaki alan, W_s ise en büyük şekil değiştirme enerjisini göstermektedir.

Yapı-zemin sisteminde etkili sönüm, malzeme sönümü yanında dalga enerjisinin serbest yüzeyden yansıdıktan sonra zemin içerisinde yayılarak kaybolmasını da içerir. Yapılan çalışmalar sonunda yapı-temel-zemin sistemine ait eşdeğer sönüm oranını (ζ_0), yapı sistemin sönümüne (ζ) ve temel sisteminin sönümüne ($\bar{\zeta}$) bağlı olarak 2.3 bağıntısı ile elde edilir.

$$\zeta_0 = \bar{\zeta} + \frac{\zeta}{(\tilde{T}/T)^3} \quad 2.3$$

Temel-zemin sisteminin sönüm oranının ($\bar{\zeta}$) değişimi, zemin histerik sönüm kapasitesine (δ), yapı sisteminin yüksekliğinin yarıçapına oranına (h_T/r_0) ve değiştirilmiş periyodun rijit mesnet kabulüyle belirlenen yapı periyoduna oranına ($\tilde{T}/T$) bağlı olarak Şekil 2.13’de verilmiştir.



Şekil 2.13: Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\bar{\zeta}$) periyot oranları ($\tilde{T}/T$) ile değişimi (Veletsos,1988).

Yapı-temel-zemin sistemine ait eşdeğer periyot ve sönüm oranlarının elde edilmesinin ardından tepki spektrumu çözümü yardımıyla yapıda kütle seviyesinde oluşan en büyük yerdeğiştirmeyi (u) ve tabanda oluşan kesme kuvvetini ($\tilde{V}$) ve eğilme momentini (M_b) 2.4-2.6 arasındaki denklemler ile hesaplanır. Bu bağıntılarda PSA ivme spektrum fonksiyonudur.

$$\tilde{V} = mPSA(\tilde{T}, \zeta_0) \quad 2.4$$

$$M_b = \tilde{V} h^* = mPSA(\tilde{T}, \zeta_0) h^* \quad 2.5$$

$$u = \frac{\tilde{V}}{k} + \frac{\tilde{V}(h^*)^2}{K_r} \quad 2.6$$

2.3.1.2. NEHRP-2001 Yaklaşımı

NEHRP 2001 yapı-zemin etkileşimi yaklaşımının temelini Veletsos' un çalışmaları oluşturmaktadır. Bu yönetmelik dairesel temel sistemleri için verilmiş olmasına rağmen, diğer geometrik tipteki temel sistemlerde eşdeğer yarıçap tanımlanabilmesi için düzeltme faktörü tanımlanmıştır.

Zemin modeli için tanımlanan dönme (K_θ) ve yatay yay rijitlikleri (K_U) frekansa bağımlı olarak değişeceğinden dolayı bu rijitlik değerleri α_u ve α_θ gibi temel zemin ve yapı dinamik davranışına bağlı olarak 2.7 ve 2.8 denklemlerinden elde edilir.

$$K_u = \alpha_u \frac{8}{2-\nu} Gr_u = \alpha_u K_H \quad 2.7$$

$$K_\theta = \alpha_\theta \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_\theta^3 = \alpha_\theta K_R \quad 2.8$$

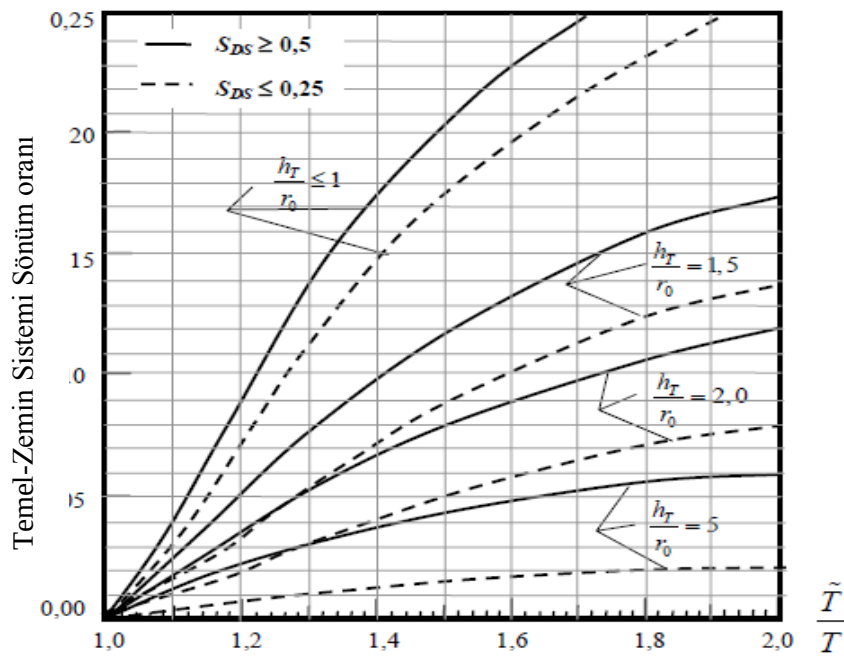
Burada G kayma modülü, α_u ve α_θ sırasıyla periyot ya da frekansa bağlı yatay ve dönme rijitliklerine ait dinamik faktörlerdir. α_u pratik kullanımlar için 1 olarak alınırken α_θ dinamik faktörü gömülme oranına bağlı olarak Tablo 2.3 hazırlanmıştır.

Tablo 2.3: Dönme rijitliğine ait dinamik faktörler
($e/r_0 < 0.5$) (FEMA 368,2001).

$(r/v_s)T$	α_θ
<0.05	1.00
0.15	0.85
0.35	0.70
0.50	0.60

Temel zemin sisteminde gömülme oranının 0.5' ten büyük olduğu durumlarda gömülme etkisi ihmal edilebilir.

Temel-zemin sistemine ait sönüm ($\bar{\zeta}$) temel-zemin sistemi içerisindeki dalgaların yayılması, histerik ya da nonlinear davranış gibi parametrelerden etkilenmektedir. Bu yapı-zemin etkileşim yaklaşımında Veletsos yaklaşımından farklı olarak yapı esnekliği ve değiştirilmiş periyodun rijit sistem periyoduna oranına bağlı olarak değişim göstermektedir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14: Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\bar{\zeta}$) periyot oranları ($\tilde{T}/T$) ile değişimi (FEMA 368, 2001).

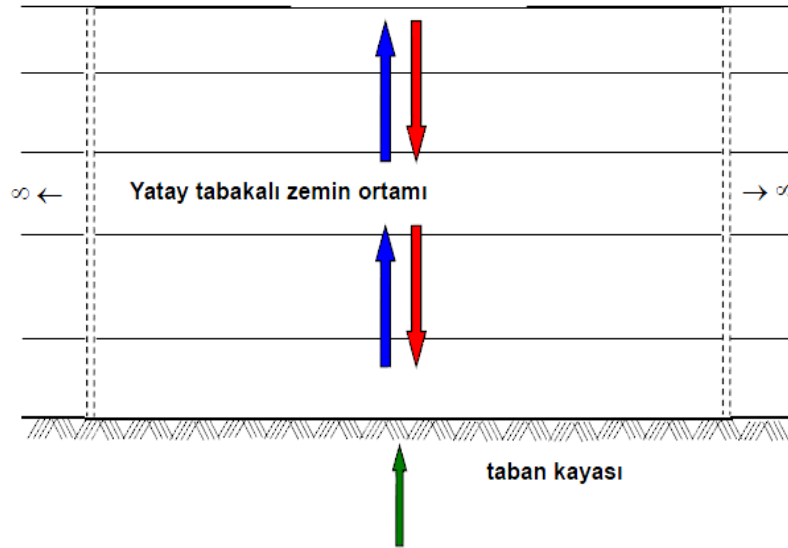
2.3.2. Nümerik Yaklaşım Yöntemleri

Yapı-zemin etkileşimi denilince iki yönlü bir olguyu, yani zeminin yapıyı etkilemesi karşılığında yapının da zemini etkilemesini ifade etmiş oluruz.

Deprem mühendisliğin pratiğinde iki temel varsayım yapılmaktadır.

- Deprem yer hareketi, düşey doğrultuda ilerlediği varsayılan deprem dalgalarının (P ve S dalgaları) sonsuz rijit yatay taban kayası düzleminde meydana getirdiği yatay ve düşey hareketler olarak tanımlanır.
- Taban kayasının üzerindeki zeminin yatay tabakalı bir ortam olduğu varsayılır.

Bu iki varsayımın sonucu olarak deprem dalgaları tabakalı zemin ortamı içinde de, yine P ve S dalgaları olarak, düşey doğrultuda ilerler ve tabaka sınırlarından kırılıp yansıyarak serbest zemin yüzeyine ulaşırlar ve yüzeyde yine yatay ve düşey yer hareketi oluştururlar (Şekil 2.15). Mühendislik pratiğinde genellikle, sadece S dalgalarının oluşturduğu yatay yer hareketlerini göz önüne alınır (Aydınöğlu,2012).



Şekil 2.15: Düşey doğrultuda ilerleyen deprem dalgası
(Aydınöğlu,2012).

Deprem dalgaları (S dalgaları) genellikle yukarı doğru zayıflayan zemin tabakalarının içinden geçerek ilerlerken genlikleri de değişime uğrar. Sağlam zeminlerde bu değişim önemli olmaz, ancak zayıf zeminlerde ivmelerin genliklerinde artışlar meydana gelir.

Bu duruma zemin büyütmesi (zemin amplifikasyonu) denilir. Ancak zeminin ileri derece nonlinear çalıştığı durumlarda ivme genliklerinde artış yerine azalmalar meydana gelebilir. Bu duruma ise zemin azaltması (zemin de-amplifikasyonu) denilir.

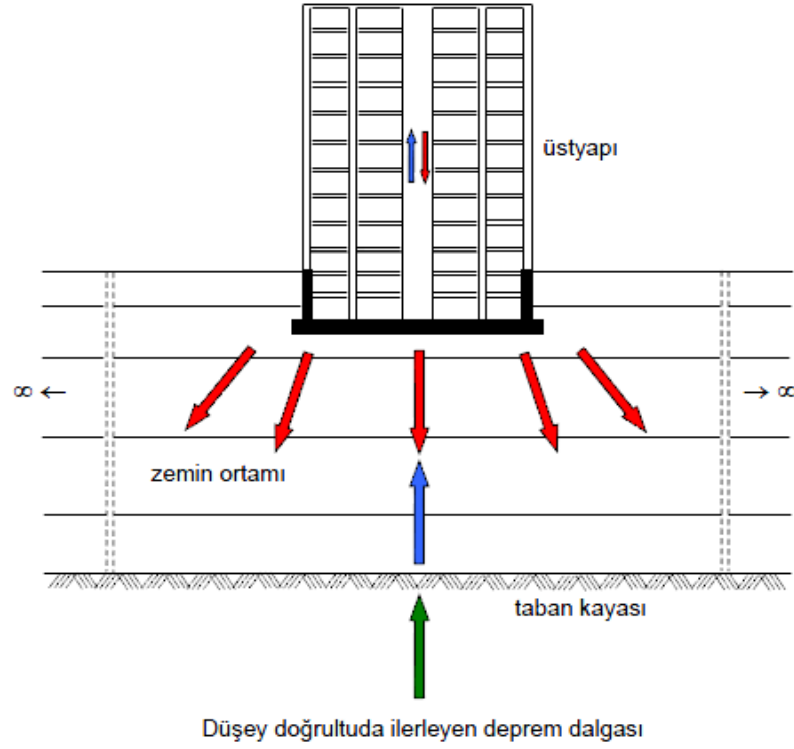
Yatay tabakalı zeminlerde düşey doğrultuda ilerleyen S (kayma) dalgalarının oluşturduğu deprem yer hareketinin analiz, tek boyutlu bir kayma dalgası yayılımı (basit bir kayma kırışının davranışı) problemidir. Pratikte nonlinear tabakalı zemin davranışının dikkate alındığı yaklaşık çözüm yöntemlerinde, taban kayasında tanımlanan depreme bağlı olarak serbest zemin yüzeyindeki deprem yer hareketi ve buna karşı gelen ivme spektrumu elde edilir.

Yönetmeliklerde verilen ivme spektrumları serbest zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini tanımlar. Bu anlamda zeminin yapı üzerindeki etkisi tek yönlüdür. Ancak tek yönlü etki de sadece temeli yüzeysel olan üstyapılar için geçerlidir. Üstyapı temelinin yüzeysel olması durumunda, bina ve temelinin kütlesi gözönüne alınmadığı durumda, düşey doğrultuda ilerleyerek zemin yüzeyine ve aynı zamanda temele ulaşan deprem dalgaları (S dalgaları), aynen serbest zemin yüzeyinden yansydıkları gibi yansılar ve yine düşey doğrultuda zemin ortamına geri dönerler. Diğer bir deyişle rijit temelde ve serbest zemin yüzeyinde oluşan deprem yer hareketleri birbirini aynısıdır (Aydinoğlu, 2012).

Bu bilgiler ışığında yapı-zemin etkileşimi yeniden tanımlarsak; yapı-zemin etkileşimi, deprem etkisi altında

- Zemin ortamının
- Yüzeysel veya gömülü yapı temelinin ve eğer varsa kazıkların
- Üstyapının

Bir arada gözönüne alındığı ortak bir model çerçevesinde yapı ve zeminin deprem sırasında birbirlerini karşılıklı olarak etkilemesi olarak tanımlanabilir. Taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinden oluşan ve zemin ortamı içinde yayılarak yapı temeline ulaşan deprem dalgaları, kısmen yapı temelinden yansıyarak zemin ortamına geri dönerler, bir kısmı da üst yapıya geçerek onun titreşimine yol açarlar ve bu kez üstyapıdan yansıyarak tekrar zemin ortamına geri dönerler (Şekil 2.16).



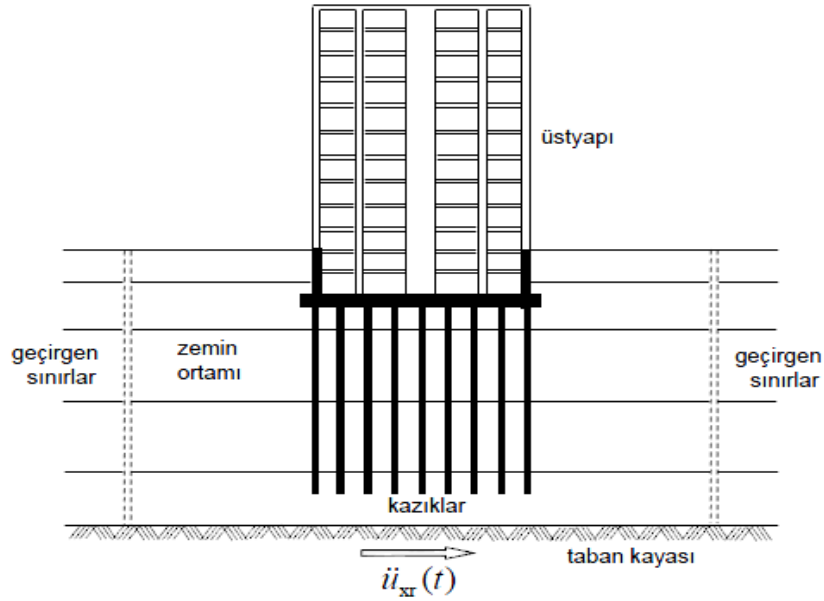
Şekil 2.16: Yapı-zemin etkileşiminde deprem dalgalarının hareketi (Aydınöğlu,2012).

Zemin ortamının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri hiç kuşkusuz üstyapıya aktarılan deprem dalgalarını etkiler ancak buna karşılık üstyapının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri de üstyapıdan zemine geri yansıyan dalgaları etkileyerek taban kayasından gelen deprem dalgalarını değişikliğe uğratırlar. Üstyapıda ve zeminde meydana gelen bu karşılıklı etkilen tanımlandığı dinamik olay yapı-zemin etkileşimini temel felsefesidir (Aydınöğlu,2012).

Üstyapının ve zeminin nonlineer davranmaları durumunda yapı-zemin etkileşimi deprem dalgalarını değişime uğratmanın ötesinde hem üst yapının hem de zeminin mekanik özelliklerini de etkiler ve bu değişen özellikler deprem dalgalarının değişimini ayrıca etkiler.

2.3.2.1. Direkt (Doğrudan) Çözüm Yöntemi

Üst yapı işe zeminin tek bir ortak sistem olarak sonlu elemanlar modeli ile idealleştirildiği ve taban kayasında tanımlanan depremin etkisi altında analiz edildiği yöntem “Direkt (Doğrudan) Yöntem” adı verilir. Bu yöntemde zemin ve üstyapıdaki tüme geometrik ve mekanik özellikler ile nonlinear davranış uygun bir biçimde gözönüne alınabilir. Zemin ortamının sonsuzluğunu ifade edebilmek için bu ortamın dış sınırlarına “geçirgen sınırlar (transmitting boundaries)” adı verilen yapay sınır koşulları uygulanır. Böylece temelden yansıyarak ve üstyapıdan geri dönerek zemin ortamı içinde dışa doğru yayılan deprem dalgalarının, sonlu eleman modelinin sınırlarından tekrar yansıyarak zemin ortamına geri dönmesi engellenmiş olur (Şekil 2.17).



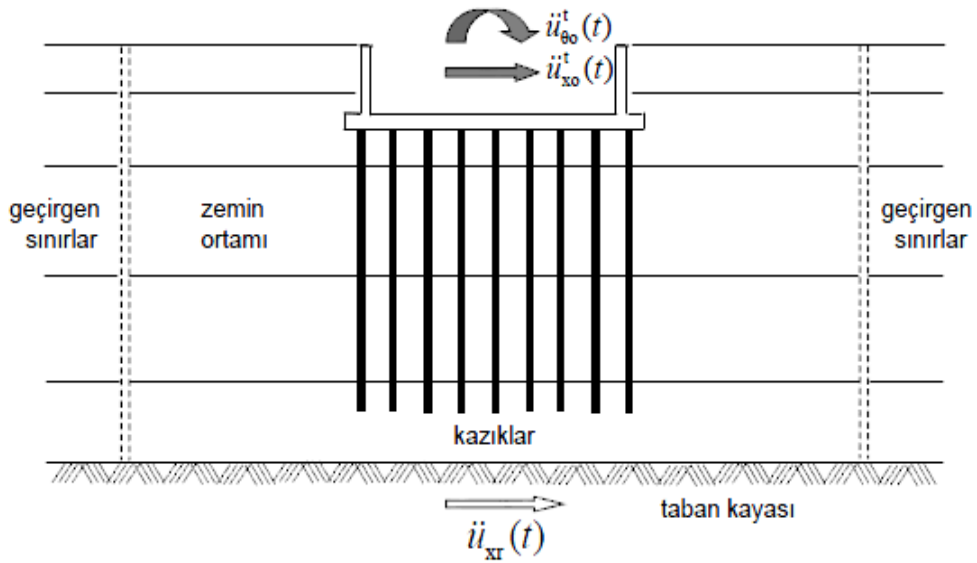
Şekil 2.17: Geçirgen sınırlar (Aydınoglu,2012).

Direkt Yöntem’ de, kuvvetli yer hareketi altında gerek üstyapıda, gerekse zeminde meydana gelebilecek nonlinear şekil değiştirmelerin üstyapı-zemin ortak sisteminin zaman tanım alanında analiz ile doğrudan elde edilmesi mümkündür. LS-DYNA yazılımı, yukarıda anlatılan prensipler ışığında yapı-zemin etkileşimini direkt yöntem ile güvenilir bir şekilde modellenme imkânını sunmaktadır.

kavramsal olarak anlaşılmasını sağlayan bu ayırım esas alınarak, yine Whitman tarafından etkileşim probleminin çözümü için “Üç Adım Yöntemi” adı verilen bir yöntem önerilmiştir.

Üç boyutlu olarak oluşturulan temel-zemin analiz modeli esas alınarak, taban kayasında veya tam anlamı ile kaya olmasa bile $V_s \geq 760$ m/s, yani yeteri kadar rijit olduğu varsayılan mühendislik anakayasında tanımlanan yatay deprem hareketi etkisi altında zaman tanım alanından nonlinear analiz (nonlinear time history analysis) yapılır. Bu analize “Kinematik Etkileşim Analizi” adı verilir. Uygulamada, kaynaktan taban kayasına ulaşan deprem etkisinin düşey doğrultuda yayılan kesme dalgalarından oluştuğu, dolayısıyla taban kayasına iki ana doğrultuda sadece yatay hareketler meydana getirdiği varsayılmaktadır.

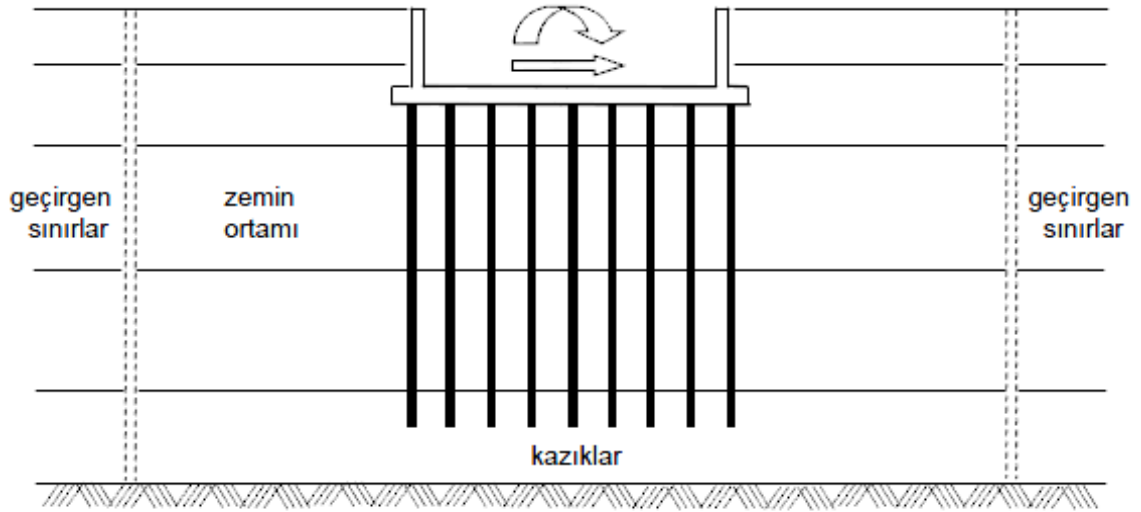
Kinematik Etkileşim Analizi’ nin çıktıları olarak, rijit temel tabanında etkin temel hareketi (effective foundation input motion)’nin bütün bileşenlerine ait toplam ivme-zaman değişimleri ayrı ayrı elde edilir. Hesaplanması öncelikli etkin temel hareketi bileşenleri, yatay iki ana eksen doğrultusundaki ötelenme ve aynı eksenler etrafındaki dönme bileşenleridir (Şekil 2.19). Bu hareket bileşenleri genellikle gömülü temelin orta ekseninin altındaki noktada tanımlanırlar. Çok özel durumlar dışında, düşey eksen etrafındaki dönme (burulma) hareketleri ihmal edilebilir (Aydınoglu,2012).



Şekil 2.19: Kinematik Etkileşim mekanizması (Aydınoglu,2012).

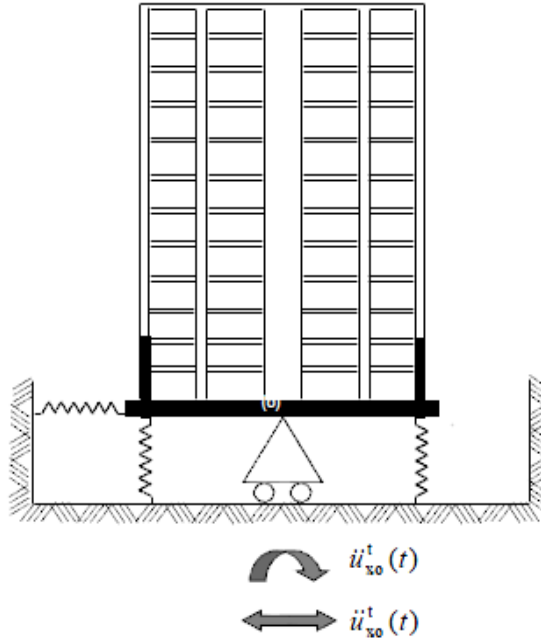
Kinematik etkileşim analizinde zeminin ve varsa kazıkların kütlesi gözönüne alınırken temelin kütlesi gözönüne alınmaz. Bu analizde temel-zemin arakesiti bir kinematik sınır koşulu olarak değerlendirilir. Her durumda, zemin ortamının nonlinear özelliklerinin zemin dinamiği konusunda uzman olan geoteknik mühendislerince, kullanılan bilgisayar yazılımının gereklerine uygun olarak saptanması özel önem taşır. Kinematik etkileşimde sıvılaşma gözönüne alınmamaktadır. Sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabalarında taş kazık, jet grout vb. iyileştirme önlemlerinin alındığı varsayılmıştır.

Altsistem Yöntemi'nde analizinin ikinci adımı "Eylemsizlik Etkileşimi" olarak adlandırılır. Bu adımda, kinematik etkileşim adımıyla elde edilen etkin temel hareketi bileşenleri, üstyapı sistemine temel alt seviyesinde etki ettirilir. Ancak yapılacak analizde zemin altsisteminin eşdeğer dinamik rijitliğinin de göz önüne alınması gerekmektedir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20: Eylemsizlik Etkileşimi mekanizması birinci adımı (Aydinoğlu,2012).

Eylemsizlik Etkileşimi analizi, üstyapı temeli tabanında tanımlanan temel etkin yer hareketi bileşenlerinin, yine temel tabanında tanımlanan eşdeğer dinamik rijitlik matrisine karşı gelen yayların altından üstyapıya etki ettirilmesi ile yapılan üstyapı deprem analizidir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: Eylemsizlik Etkileşimi mekanizması
ikinci adımı (Aydınöğlu,2012).

Eylemsizlik Etkileşimi analizinde sonsuz rijit bina temelini ve varsa bodrum katların (bodrum kutusu) tüm kütle bileşenleri de dikkate alınmalıdır. Zemin ortamının sonlu rijitliği ile birlikte bu kütlelerin de gözönüne alınması ile eylemsizlik etkileşimi analizinde üstyapının doğal titreşim periyotları, sonsuz rijit zemin varsayımı ile yapılan geleneksel analize oranla daha uzun periyotlar olarak elde edilirler. Bunun sonuç olarak, eylemsizlik etkileşiminde üstyapıya etkiyen deprem yükleri ve üstyapıda oluşan etkiler, etkileşimsiz duruma (rijit zemin durumuna) oranla daha düşük değerler olarak elde edilir (Aydınöğlu,2012).

2.4. ANALİZ PLATFORMU

LS-DYNA, yapı-sıvı ve yapı-zemin etkileşimleri de dahil olmak üzere, çeşitli türdeki dinamik mühendislik problemleri için başarıyla kullanılabilen dolaylı (explicit) sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu çalışmada, yüksek derecedeki esnekliği ve doğrusal elastik olmayan davranışlarının modellenen bilme başarısından ötürü LS-DYNA sayısal analiz platformu olarak seçilmiştir. Ayrıca, mevcut malzeme modellerinin çeşitliliği ve sıvı, yapı malzemelerinin şekil değiştirme oranı hassaslığını (strain rate sensibility) da modelleyebilmesi LS-DYNA programının sağladığı avantajlar arasında yer almaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Yapı-zemin etkileşimi depreme dayanıklı yapılar tasarlamak ve mevcut yapıların deprem performansının değerlendirilmek için güvenilir bir şekilde modellenmelidir. Barajlar, nükleer santraller, yüksek katlı binalar ve köprüler gibi yapılarda, deprem hareketi titreşimi zeminden etkilenmektedir. Deprem hareketinin zemin tarafından değiştirilmesi, yapıya gelen titreşimleri de doğrudan etkilemektedir.

3.1. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN LS-DYNA YAZILIMI İLE MODELLENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN ÇÖZÜM TEKNİKLERİ

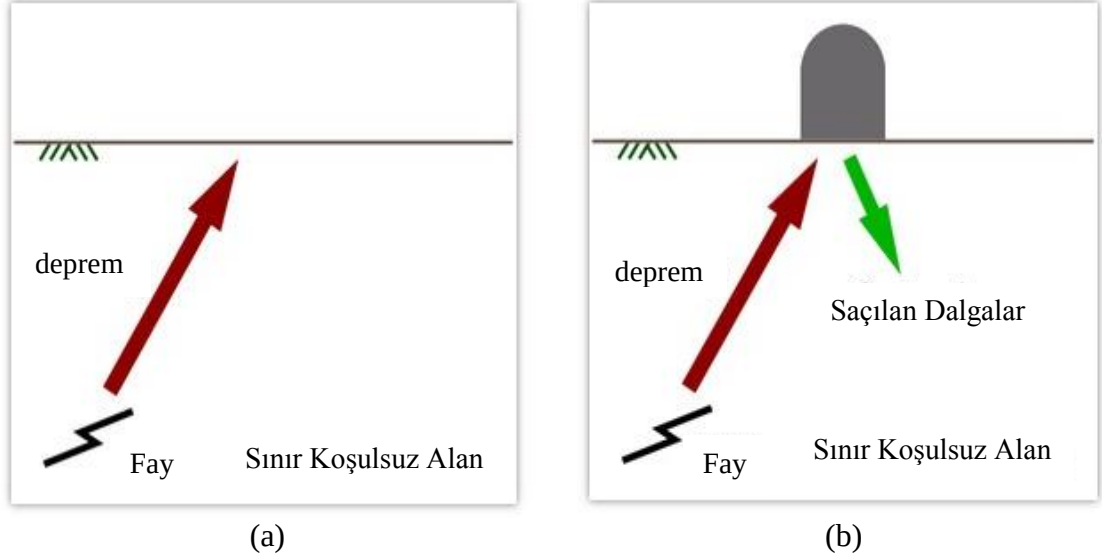
Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi, deprem yer hareketini karakterize etmek için gerekli bölgesel jeolojik özelliklere ve yapının yer hareketi altında analizi için güvenilir yazılımlara ihtiyaç duyulmaktadır. LS-DYNA yazılımı yapı-zemin etkileşiminde yer hareketinin modellenmesi için “etkili sismik giriş yöntemi” ‘ni (effective seismic input method) (Bielak ve diğ.,1994) geliştirmiştir. Etkili sismik giriş yöntemi yapı-zemin arayüzü (soil-structure interface) kullanarak, yapı-zemin modelinde deprem kuvvetlerini birleştirmektedir. Deprem dalgalarının dışa yayılmasını engellemek için ise sınırsız alanlar tanımlanarak dalgaların sönümlenmesini sağlanmaktadır. Sınırsız alanların modellenmesi için “kusursuz uyumlu katmanlar” (perfectly matched layers-PML) geliştirmiştir.

3.1.1. Saçılma Analizinin Ana Yapısı

Etkili sismik giriş yönteminin bir parçası olarak Bielak ve ekibi tarafından 1994 yılında geliştirilen saçılma analizi, yapı-zemin etkileşimi analizi için yeni bir yaklaşım olarak LS-DYNA’da benimsenmiştir. Bu yaklaşım, yapı-zemin etkileşimi yapının varlığı ile yer hareketinin saçılmasına neden olduğunu, uygun deprem kuvvetlerini emici sınır (absorbing boundary) tabakalarını kullanarak dikkate alır.

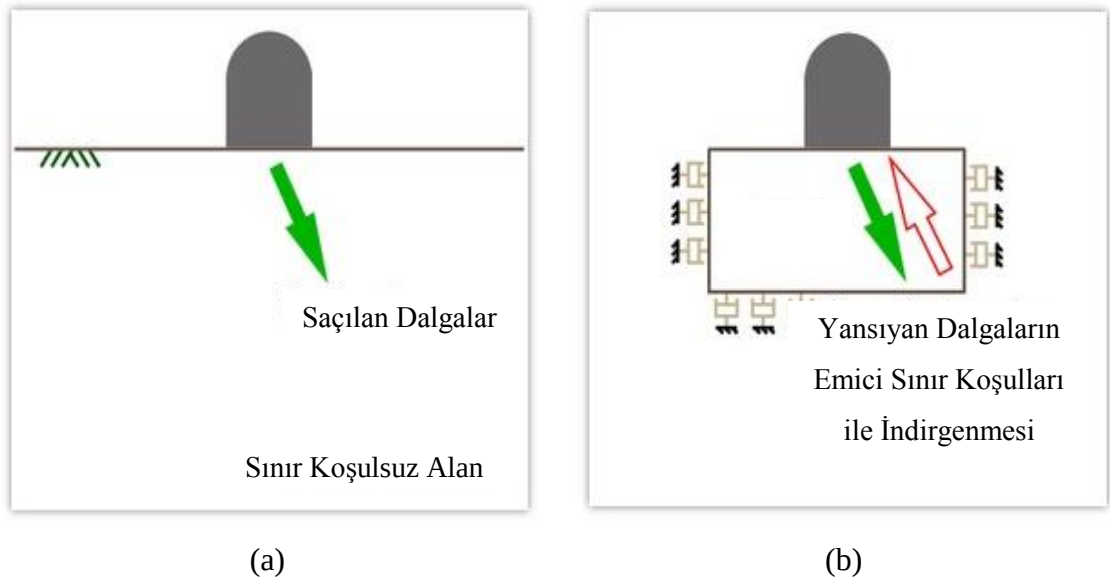
Yapının gerçek davranışını gözönüne alındığında Şekil 3.1’de gösterilen durumlardan ikisi aynı anda gözlenebilir. Zemin içerisinde hareket eden deprem dalgaları yapıya ulaştıktan sonra bir kısmı sönümlenerek, geriye sadece yapıdan saçılan dalgalar kalır

(Şekil 3.2 a). Saçılan dalgalar sadece yapının varlığı sebebiyle, yapıdan uzaklaşacak şekilde yayılmaktadır.



Şekil 3.1: Zeminin yapı olmadığı durumda (a) ve yapı olduğu durumda (b) deprem hareketine maruz kalması (LS-DYNA,2013).

Sınırsız alanlar, kesilmiş sınırlı etki alanı ile yeniden tanımlanabilir. Bu sayede tanımlanan dış sınırlar yapıya ulaşan sahte dalgaları yansıtır (Şekil 3.2 b). Bu yansıyan dalgaları azaltmak ve uygun olan sınırsız etki alanını modellemek için emici özelliği bulunan bir sınır tabakası kullanılmalıdır.

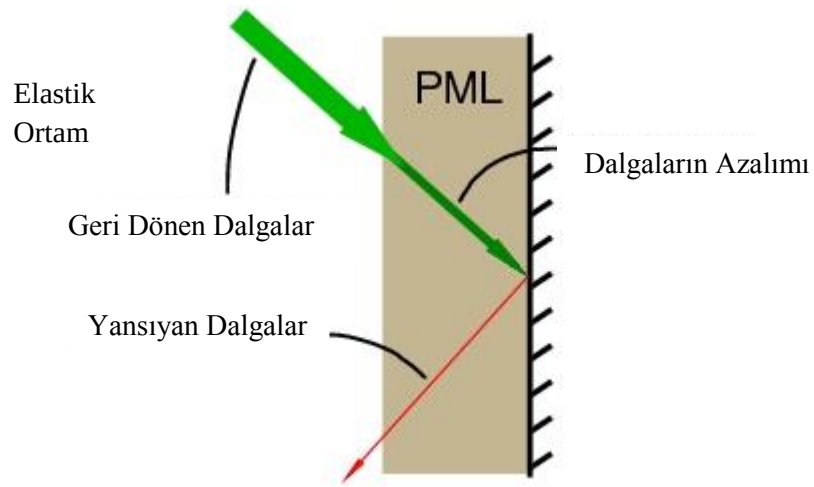


Şekil 3.2: Zeminin yapı olmadığı durumda (a) ve yapı olduğu durumda (b) deprem hareketine maruz kalması (LS-DYNA,2013).

LS-DYNA yazılımında “PML modeli” emici sınır olarak kullanılmaktadır. “Etkili sismik girişi yöntemi” ise saçılmış dalgaları, deprem eşdeğer kuvvetleri sağlayacak şekilde dalga formülasyonu kullanarak modellemektedir.

3.1.2. Emici Tabakaların (PML) Tanımlanması

Kusursuz uyumlu tabaka modeli olan PML, elastik sınırlı etki alanına konulduğunda, emici tabaka görevini üstlenmektedir. Sınırlı alan ve PML arasındaki arayüzü herhangi bir yansıma olmadan PML dışı doğru hareket eden tüm dalgaları emer. (Şekil 3.3)



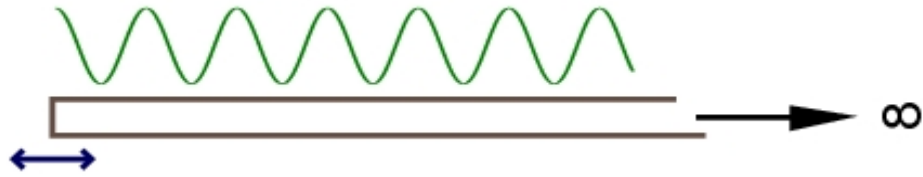
Şekil 3.3: PML Model (LS-DYNA,2013).

PML başlangıçta elektromanyetik dalgalar için Bérenger ve Chew (1994) tarafından geliştirildi ve çok sayıda araştırmacı tarafından elektromanyetik PML modeli için kapsamlı incelemeler gerçekleştirildi. Bunu yanı sıra araştırmalar devam ederek, elastik dalgaların sismik uygulamaları incelendi.

Sismik dalga formülasyonların ve uygulamalarının sonlu farklar yöntemleri (finite difference method) ile PML modelinin uygulanmasının iki farklı dezavantajı bulunmaktadır. Birincisi sonlu farklar yöntemi ile modellenen PML modeli ile sonlu elemanlar yöntemi (finite element method) ile modellenen yapıların birlikte çalışması zorluk teşkil etmektedir. İkincisi ise sonlu farklar yöntemi sıklıkla kararsızlığa (instability) yol açmaktadır.

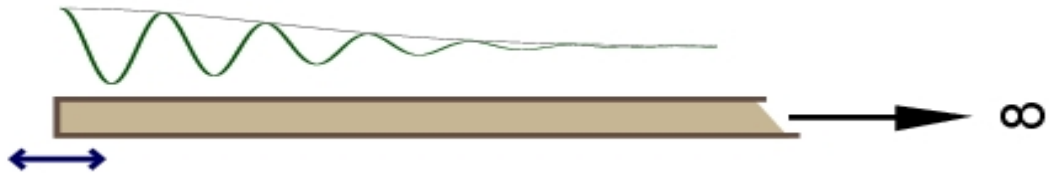
Bu eksiklikler, Basu ve Chopra (2003, 2004, 2009) tarafından geliştirilen explicit analize izin verilen bir deplasman bazlı sonlu eleman uygulanması ile giderilmiştir. Böylece üç boyutlu zemin-yapı sistemlerinin gerçekçi bir analizi LS-DYNA ile gerçekleştirilebilir.

Yarı sonsuz çubuk modelini sınırsız yarı-uzay ortamı içerisinde sadece çubuk lokal eksenî doğrultusunda dalgaların yayıldığını kabul edilsin (Şekil 3.4).



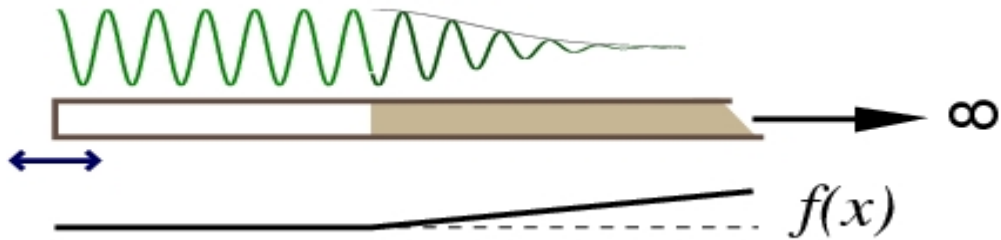
Şekil 3.4: PML için yarı sonsuz çubuk modeli (LS-DYNA,2013).

Bu çubuğun elastik ortam için oluşturulan dalga denklemlerini, matematiksel olarak sınırsız doğrultuda artacak şekilde bir $f(x)$ fonksiyonu tanımlayarak, denklemleri kusursuz uyumlu ortam (PMM: perfectly matched medium) için sönümlenmiş olarak yeniden türetilir (Şekil 3.5).



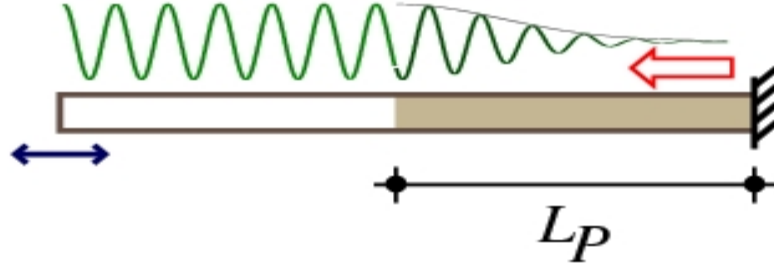
Şekil 3.5: PML içerisindeki kusursuz uyumlu ortam (PMM) (LS-DYNA,2013).

PMM yanında bir sınırlanmış elastik çubuk yerleştirilmiştir. PML tabakası sınırlı ortamdan dışarıya hareket eden tüm dalgaları emer (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: PML ortamında saçılan dalgaların sönümlenmesi (LS-DYNA,2013).

Saçılan dalgalar yeterince sönümlenmezse, yeterince kusursuz şekilde uyumlu bir tabaka sağlamak üzere, yeterli bir şekilde yeniden sönümlenir.



Şekil 3.7: PML ortamında saçılan dalgaların sönümlenmesinin yetersiz kalması (LS-DYNA, 2013).

PML modelinin son ucunda bazı yansımalar meydana gelebilir. Yansıyan dalgaların genliğini 3.1 denklemi ile ifade edilir.

$$|R| = \exp[-2F(L_p)], \quad F = \int f dx \quad 3.1$$

Bu denklemde f ve L_p arzu edildiği kadar küçük seçilebilir.

Dalgaların azalım ilişkisi tipik olarak 3.2 denklemi ile elde edilmiştir.

$$f(x) = f_0 \left(\frac{x}{L_p} \right)^m \quad 3.2$$

Tipik olarak, m için 2 değeri sonlu elemanlar analizi için iyi çalışır ve f_0 basitleştirilmiş ayrık analizinden (simplified discrete analysis) seçilebilir. LS-DYNA otomatik olarak f_0 tabakanın derinliğine bağlı olarak optimum bir değer seçer.

Tabaka derinliği L_p elastik bir ortam derinliğindeki 5-8 eleman boyunda seçilebilir.

3.1.3. Etkili Sismik Giriş Yöntemi

Yapı-zemin modelinde deprem hareketlerini etkileşim arayüzünde birleştirmek için sadece eşdeğer kuvvetler uygulayarak deprem davranışının modellenmesi yeterli değildir. Aynı zamanda, yapının doğrusal olmayan davranışını göz önüne almak için,

geçici deprem analizinin (transient earthquake analysis) başlangıç adımı yapının statik analizinden sonra başlatılmalıdır.

Modele uygulanacak saçılma analizinden elde edilen etkin kuvvetler, yapının bulunduğu ve bulunmadığı durum göz önüne alınarak saçılan deprem dalgaların sönümlenmesi PML sınırı tabakaları ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.2 b).

3.1.3.1. Deprem Giriş Hareketi

Yapı-zemin etkileşim modelinden zemin alanının deprem etkisi altında yapının bulunduğu ve bulunmadığı durum olmak üzere iki farklı durum kabul edilmiştir (Şekil 3.2). Aşağıda verilecek matrislerdeki, kütle (m), rijitlik (k) ve kuvvet (P) sembollerinde; s indisi yapıyı, b indisi katı-zemin etkileşim serbest bölgesini, f indisi zemin ortamını ve e deprem bileşenini temsil etmektedir.

İlk olarak deprem hareketinin yapı içerisindeki davranışın ele alırsak, dinamik denge denklemini 3.3 matris eşitliği ile yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} m_{ss} & m_{sb} \\ m_{bs} & m_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{ss} & k_{sb} \\ k_{bs} & k_{bb} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s^t \\ P_b^t \end{Bmatrix} \quad 3.3$$

Burada u^t sistemin toplam hareketi ve P_b^t yapı-zemin etkileşimi içerisinde zeminden yapıya ulaşan reaksiyon kuvvetleridir. Dinamik denge denklemleri zemin ortamı için 3.4 denklemi kullanılır.

$$\begin{pmatrix} m_{ff} & m_{fe} \\ m_{ef} & m_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_f^t \\ \ddot{u}_e^t \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{ff} & k_{fe} \\ k_{ef} & k_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_f^t \\ u_e^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f^t \\ P_e^0 \end{Bmatrix} \quad 3.4$$

Burada $P_f^t = -P_b^t$ ve P_e^0 deprem kuvvetidir. Zemin alanında dinamik denge denklemleri yapının olmadığı denge denklemleri 3.5 ile yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} m_{ff} & m_{fe} \\ m_{ef} & m_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_f^0 \\ \ddot{u}_e^0 \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{ff} & k_{fe} \\ k_{ef} & k_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_f^0 \\ u_e^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_e^0 \end{Bmatrix} \quad 3.5$$

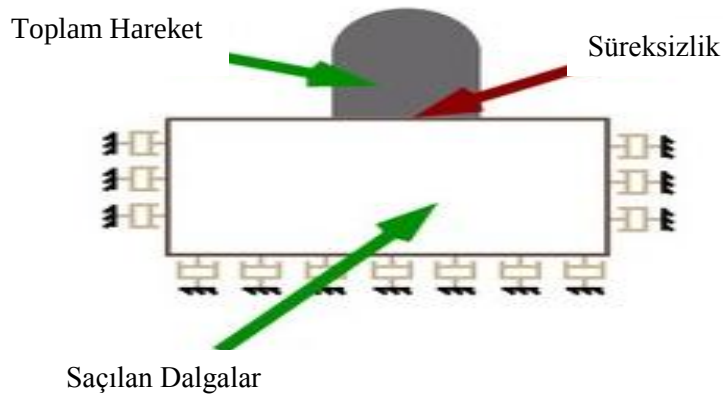
Burada u^0 serbest alan yer hareketidir (free field ground motion). Zemin alanında saçılma hareketini yapının bulunduğu durumda oluşan hareketinden (u^t) yapının bulunmadığı durumda oluşan hareketi (u^0) arasındaki farktan denklem 3.6 ile elde edilir.

$$u_e = u_e^t - u_e^0 \quad 3.6$$

Yukarıda yazılan dinamik denge denklemlerini tek bir alanda birleştirilmesi ile 3.7 eşitliği elde edilir.

$$\begin{pmatrix} m_{ss} & m_{sb} & \\ m_{bs} & m_{bb} + m_{ff} & m_{fe} \\ & m_{ef} & m_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \\ \ddot{u}_e^t \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} k_{ss} & k_{sb} & \\ k_{bs} & k_{bb} + k_{ff} & k_{fe} \\ & k_{ef} & k_{ee} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \\ u_e^t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ m_{ff} \\ m_{ef} \end{Bmatrix} \ddot{u}_f^0 + \begin{Bmatrix} 0 \\ k_{ff} \\ k_{ef} \end{Bmatrix} u_f^0 \quad 3.7$$

Burada eşitliğin sağ tarafı yapı-zemin etkileşimi arayüzünde oluşan serbest yer hareketini P_e^0 vermektedir. Çünkü kütle ve rijitlik matrislerinin aralıklı olması sebebiyle, yapı-zemin etkileşimindeki etrafındaki elemanların arayüzü bir tabaka ile sınırlı bulunmaktadır. Diğer bir deyişle, zemin alanı içinde saçılmış hareket kullanmak, toplam hareket / yapı ile arayüzeyinde bir süreksizlik oluşturur ve bu süreksizlik yüzeyinde etkili kuvvetler oluşturur. Süreksizlik arayüzünde tam olarak serbest alan yer hareketi olduğunu ve dolayısıyla etkili kuvvetler sadece serbest alan zemin hareketi bağlıdır.



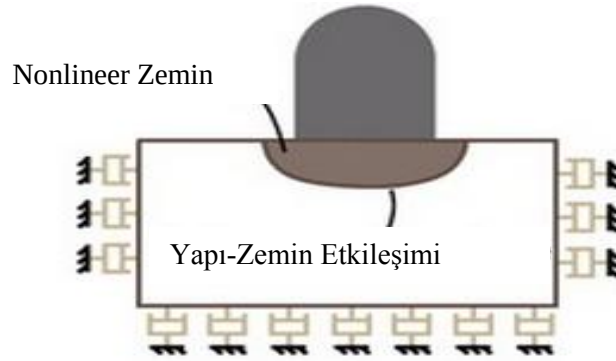
Şekil 3.8: Yapı-zemin etkileşimde süreksizlik yüzeyinin oluşumu (LS-DYNA,2013).

3.1.3.2. *Nonlinear Yapı-Zemin Etkileşimi*

Yapı-zemin etkileşimi analizinin ana hedefi olan yapının doğrusal olmayan davranışını tahmin etmek için, analize statik analiz ile başlamak gerekmektedir. Ayrıca, zemin ortamının davranışı doğrusal olmadığından bu durumun yapı-zemin etkileşimi analizinde hesaba katılması gerekmektedir.

Zemin modelinin tüm doğrusal olmayan özelliklerinin yapıya yakın bir bölge ile sınırlı olduğunu kabul edilebilir. Zemin alanının geri kalan kısmı doğrusal olarak alınabilir.

Yapı-zemin etkileşimi analizi için, ilk olarak statik analizi ile genel yapının tabanında statik reaksiyonlar hesaplanır. Yapı tabanında hesaplanan bu kuvvetler dinamik analiz sırasında, yapı ağırlığını ve doğrusal olmayan zemin göz önüne almak için gereklidir.



Şekil 3.9: Yapı-zemin etkileşimde nonlinear zemin modeli (LS-DYNA,2013).

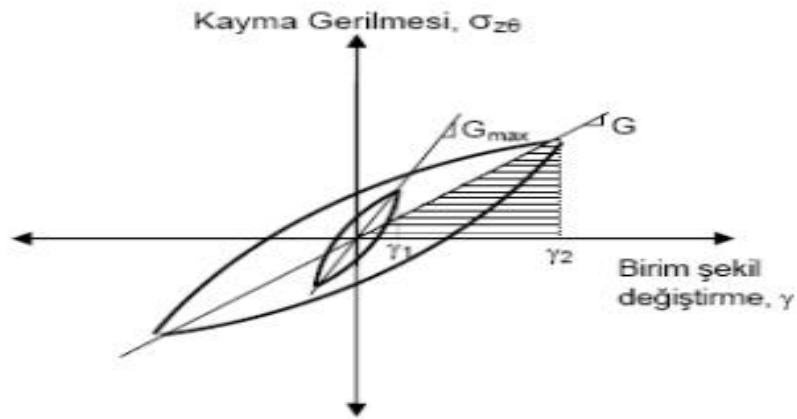
3.2. DİNAMİK ETKİLER ALTINDA ZEMİN DAVRANIŞI

Deprem etkisinde kalmış olan yapıların hasar durumları incelendiğinde, hasarlara neden olan en önemli etkenlerden birinin tekrarlı ve dinamik yük etkisinde kalan zemin etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır (Kramer,1996). Zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı gerilme-şekildeğiştirme ve mukavemet özellikleri açısından incelenmektedir. Zeminlerde gerilme-şekildeğiştirme özelliklerinden genellikle dinamik kayma modülü, sönüm oranı değerleri ve bunların birim şekildeğiştirmeye bağlı olarak değişimleri elde edilmektedir. Mukavemet özelliklerinden ise göçmeye veya büyük şekildeğiştirmeye neden olan kayma gerilmesi genliği ve çevrim sayıları elde edilmektedir. Zemin ortamı içerisinde rijitlik, Poisson oranı, yoğunluk gibi parametreler dalga yayılmasını etkileyen parametrelerdir. Bunlar arasında rijitlik ve sönüm gibi parametreler diğerlerine göre

daha büyük öneme sahiptir. Bir malzemenin sönümünün büyük olması, bu malzemenin dinamik yükleme ya da titreşimler sırasında daha çok enerji yutması demektir. Zeminlerde sönüm, zemin elemanında bir çevrim sonucu yutulan enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerin sönüm özelliklerini bilmek zeminlerde dalga yayılımı, deprem yükleri karşısında zemin davranışı gibi dinamik problemlerin çözümü açısından önem taşımaktadır. Elastisite modülü düşük zeminlerin küçük şekildeğiştirmelere maruz kaldığı durum ile büyük şekildeğiştirmelere maruz kaldığı durumlar arasında önemli farklılıklar olduğu ve zeminin davranışının doğrusal kabul edilmesinin hatalara yol açacaktır (Borja ve diğ., 1999; Chao, 1996).

Zemin tabakaları kuvvetli yer hareketine maruz kaldıklarında doğrusal olmayan davranış gösterirler. Doğrusal olmayan davranışın etkisi yer hareketi şiddeti arttıkça büyütme (amplifikasyon) miktarının azalması şeklindedir. Bu durum şekil değiştirmelerdeki birikimle beraber zeminin histeretik sönümündeki artış ve zeminde mukavemet azalması dolayısıyla yumuşama olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük birim şekil değiştirme seviyelerinde, gerilme birim şekil değiştirme ilişkisinin elastik olduğu kabul edilebilir.

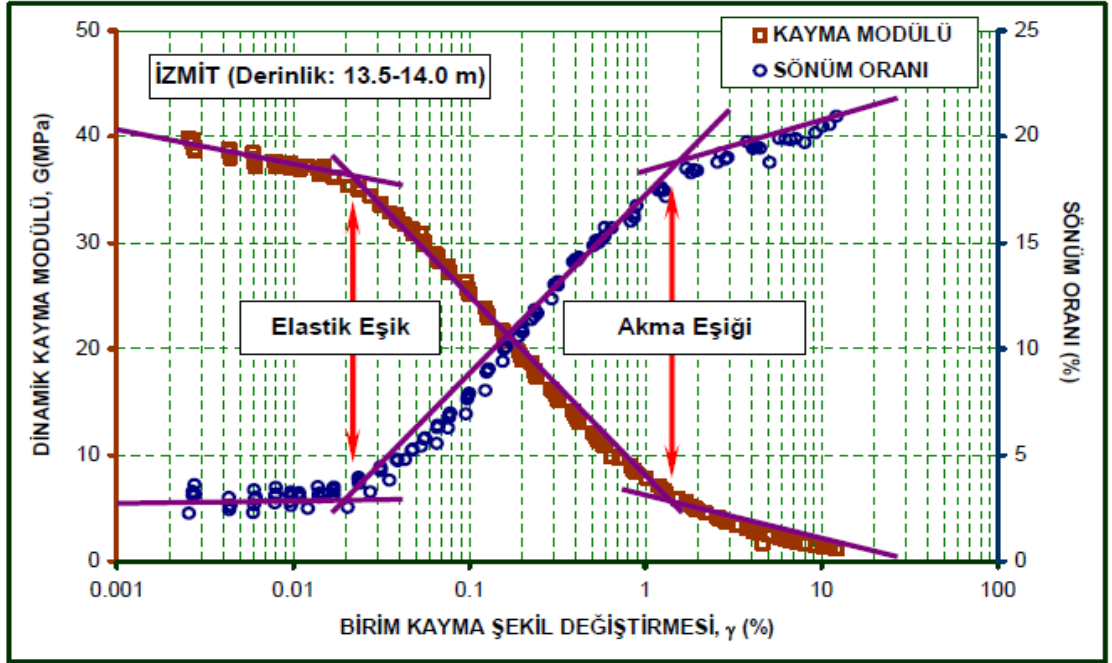
Geoteknik mühendisliği alanında, laboratuvar ve arazi deneyleriyle, zeminlerin gerilme –birim şekil değiştirme ilişkilerinin, özellikle yüksek birim şekil değiştirme seviyelerinde, birim şekil değiştirmeye bağımlı olduğu, doğrusal olmadığı ve histeretik olduğu saptanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: Tekrarlı yük etkisindeki zeminlerde kayma gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkisi (Özener, 2010).

Gözlemler, zemin tabakalarının özelliklerinin deprem yer hareketlerinin neden olduğu çevrimsel gerilmeler yüzünden değişebileceğini göstermektedir. Bozulmamış numuneler üzerinde yapılan dinamik deneyler ve ayrıca arazi deneyleri, birim şekil değiştirme birikimi sonucunda zemin rijitliği ve kayma mukavemeti özelliklerinde azalma olduğunu göstermiştir. Çevrimsel gerilmeler altında zemin davranışını değerlendirirken bir alternatif de gerilme – birim şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin birbirinden bağımsız düşünülmesidir. Dinamik kayma modülü, sönüm oranı ve bunların birim şekil değiştirmeye göre değişimi zeminin dinamik gerilme – birim şekil değiştirme özellikleri olarak düşünülebilir. Çevrimsel gerilme genlikleri ve göçme anındaki çevrim sayısı veya aşırı şekil değiştirme de dinamik kayma mukavemeti özellikleri olarak tanımlanabilir. Farklı kayma gerilme genlikleri ve yükleme modellerine maruz bırakılan örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan dinamik laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar elastik, elasto-plastik ve plastik davranışlara ait eşik çevrimsel kayma gerilmelerinin varlığını göstermiştir (Tönük ve Ansal,2007).

Dinamik zemin davranışı gözlemlerinin önemli bir yorumu: ilki doğrusal olmayan davranışın başlangıç noktası, ikincisi ise elastik olmayan davranışın başlangıç noktası olan iki kayma birim şekil değiştirme eşik seviyesi önerilmesidir (Vucetic, 1994). Başka bir gözlem sonucu ise, plastisite indisi cinsinden ifade edilen zemin plastisitesinin, dinamik kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirmeye bağlı değişimi üzerindeki etkisidir (Vucetic ve Dobry, 1991). 1999 Kocaeli Depremi sonrası İzmit civarından alınan normal konsolide, örselenmemiş kil numuneleri üzerinde bir seri gerilme kontrollü çok basamaklı dinamik üç eksenli deneyi yapılmıştır (Okur ve Ansal, 2004). Bu deneylerde, çevrimsel kayma gerilmesinin eşik değerlerinin değerlendirilmesi için her numunede en büyük kayma gerilmesi, dinamik kayma modülü azalması ve sönüm oranının artışı bulunmuştur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Bir zemin numunesi için kayma modülü ve sönüm oranının birim şekil değiştirmeye göre değişimi ve dinamik zemin davranışındaki birim şekil değiştirme eşikleri (Tönük ve Ansal,2007).

Zeminlerin çevrimsel gerilme – birim şekil değiştirme davranışlarının, birbirini takip eden üç aşamada ele alınması uygun gözükmektedir. İlk aşamada, zemin numunesi, gerilme – birim şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinde önemli bir azalma olmadan elastik olarak davranacaktır. Etki eden çevrimsel gerilmeler düşük olduğundan oluşan birim şekil değiştirme genlikleri de önemsizdir. Eğer etki eden çevrimsel gerilme seviyeleri elastik eşik değerinden daha düşük ise, dinamik kayma mukavemetindeki azalma ve çevrim sonrası kayma mukavemetindeki fark ihmal edilebilir seviyededir. Elastik eşik bir kere aşıldığında, zemin numunesi elasto-plastik davranacaktır. Bu dinamik zemin davranışında ikinci aşama olarak düşünülebilir. Bu aşama esnasında oluşan birim şekil değiştirmeler birim şekil değiştirme yumuşamasına, dane yapısında bozulmaya ve gerilme – birim şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinde akma eşiğine kadar ani düşüşe sebep olacak boşluk suyu basıncında birikmeye yol açabilir. Zemin rijitliğindeki azalma (dinamik kayma modülünün azalması) ve boşluk suyu basıncındaki artış kayma mukavemetinde önemli azalmalara yol açabilir ve bu durum 1999 Kocaeli Depreminde çok yerde gözlemlendiği gibi taşıma gücü kayıplarına, heyelanlara ve ilave oturmalara neden olabilir. Eğer akma eşiği de aşılsa, zemin

numunesinde dinamik kayma modülündeki önemli azalma nedeniyle büyük birim şekil değiştirme genlikleri görülecektir. Bu üçüncü aşama zeminlerin dinamik davranışında kararlı (steady state) duruma geçiş olarak düşünülebilir (Tönük ve Ansal,2007).

3.3. NONLINEER ZEMİN MODELLERİ

Tank-sıvı-zemin etkileşimi nümerik analiz modellerinde zemin ortamını modellemek için tercih edilen LS-DYNA yazılımı içerisinde yer alan malzeme modellerinden en uygun olanının belirlenmesi gereklidir. Zeminin nonlinear davranışı, nümerik stabilite ve zaman gibi faktörler çerçevesinde optimum malzeme modelinin belirlenmesi bu bölümde incelenecektir. Malzeme modelinin belirlenmesinin ardından farklı zemin tipleri için yapılan çalışmalar incelenerek model için gerekli parametreler belirlenecektir.

3.3.1. Malzeme Modelleri

Nümerik analiz platformu olarak seçilen LS-DYNA yazılımının diğer avantajlarının biri de birçok malzeme modeli içeren geniş bir kütüphaneye sahip olmasıdır. LS-DYNA yazılımında nonlinear zemin davranışı için yaygın olarak kullanılan modeller;

- MAT_SOIL_AND_FOAM
- MAT_SOIL_BRICK
- MAT_DRUCKER_PRAGER
- MAT_HYSTERETIC_SOIL

olarak sıralanabilir. Tez kapsamında yukarıda verilen malzeme modellerinden, zemin ortamının nonlinear özelliklerini yansıtabilecek olan *MAT_SOIL_AND_FOAM isimli malzeme modeli, gerek nümerik stabilite gerekse de zaman faktörü açısından tercih edilmiştir.

*MAT_SOIL_AND_FOAM isimli malzeme modeli, Kreig tarafından geliştirilen uygulamalarda sıklıkla kullanılan nonlinear zemin modellerinden bir tanesidir. Davranışı su eleman modelinin davranışına benzemektedir. Zemin elemanın çevresinin herhangi bir yapı ile sınırlı (confined) olduğu veya sınır koşulları ile mesnetlendiği durumlarda kullanılmalıdır. Bu malzeme modelinde, kullanıcı tarafından tanımlanması gereken parametreler Tablo 3.1’de açıklanmıştır.

Tablo 3.1: LS-DYNA zemin modeli için gerekli parametrelerin açıklanması.

PARAMETRE	ELDE EDİLME YÖNTEMİ	AÇIKLAMA
MID	-	Malzeme Numarası
RO	Nükleer Yoğunluk Testi	Birim Hacim Ağırlığı
G	Tek Eksenli Basınç Testi	Elastik Kayma Modülü
BULK	Hidrostatik Basınç Testi	Hacimsel Genleşme Modülü
A0	Üç Eksenli Basınç Testi	Kuadratik yuvarlatma Katsayısı
A1	Üç Eksenli Basınç Testi	Kuadratik yuvarlatma Katsayısı
A2	Üç Eksenli Basınç Testi	Kuadratik yuvarlatma Katsayısı
EPS	Tek Eksenli Basınç Testi	Volumetrik Birim Şekildeğiştirmeler
P	Tek Eksenli Basınç Testi	Basınç

*MAT_SOIL_AND_FOAM isimli malzeme modeli için gerekli katsayıları daha iyi ifade edilirse; p basınç a_0 , a_1 ve a_2 sabit katsayılar olmak üzere plastik akma fonksiyonu 3.8' denklemleri ile yazılır (LS-DYNA R7.0, 2013).

$$\phi = J_2 - [a_0 - a_1 p + a_2 p^2] \quad 3.8$$

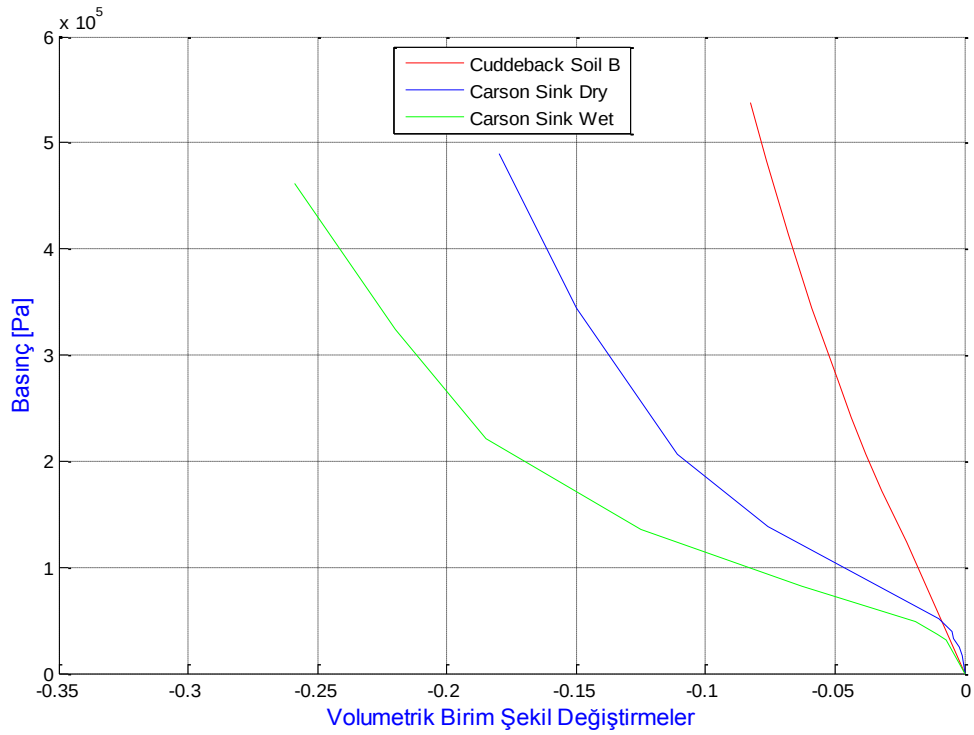
Akma yüzeyinde σ_y tek eksenli akma gerilmesi olmak üzere $J_2 = \frac{1}{3} \sigma_y^2$ eşitliğini denklem 3.8'da yerine koyup, tek eksenli akma gerilmesini çekersek 3.9'daki gibi denklem elde edilir (LS-DYNA R7.0, 2013).

$$\sigma_y = J_2 - [3(a_0 - a_1 p + a_2 p^2)]^{\frac{1}{2}} \quad 3.9$$

Elde edilen 3.9 denkleminde pekleşme (strain hardening) göz önüne alınmamıştır.

3.3.2. Analizlerde Kullanılacak Zemin Tipleri

Michael A. Thomas ve diğ. (2008) NASA tarafından desteklenen proje ile Amerika Birleşik Devletleri Nevada eyaletindeki zemin tiplerini, arazi ve laboratuvar deneyleri yardımıyla araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda 3 farklı zemin tipinin nonlineer özelliklerini belirlenerek, LS-DYNA'daki mevcut *MAT_SOIL_AND_FOAM modeli için gerekli olan parametreler elde edilmiştir. Oluşturan zemin modellerinin isimleri sırasıyla Cuddeback Soil-B, Carson Sink Dry ve Carson Sink Wet olarak tanımlanmıştır. Zemin tipleri arasında basınç-birim şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12: Tüm zemin tipleri için basınç-birim şekil değiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması (Michael A. Thomas ve diğ.,2008).

3.3.2.1. Cuddeback Soil B

Cuddeback Gölü etrafında farklı bölgelerinden alınan zemin numuneleri (Şekil 3.13) sadece kuru hava koşullarına (dry season) uygun ortamlar için kullanılması zorunludur. Islak zemin özelliklerini taşıyan zemin modellerinde kullanılmaz.

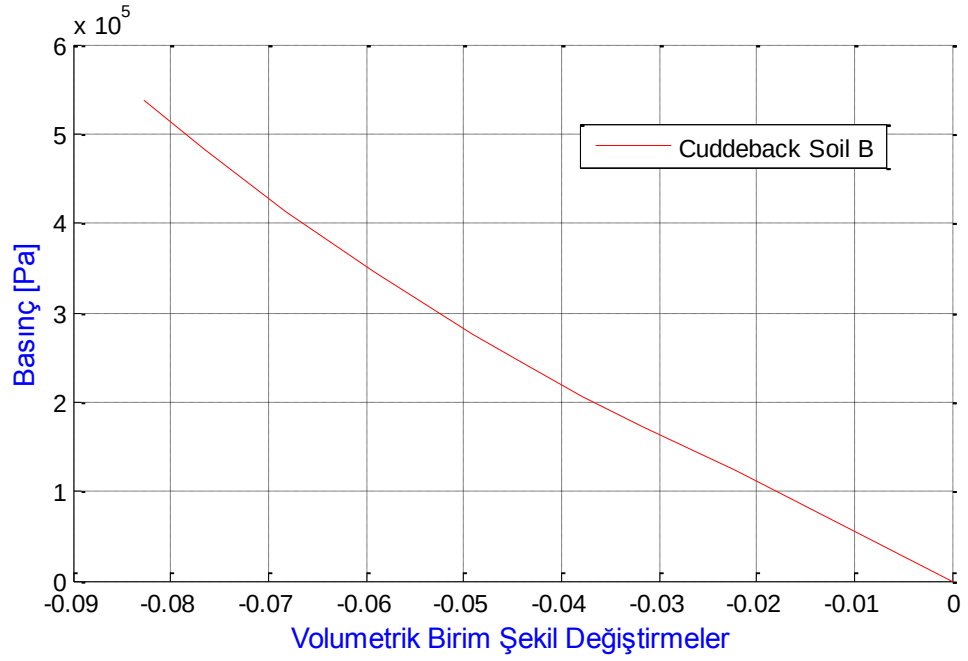


Şekil 3.13: Cuddeback Soil-B zemin tipi için farklı bölgelerden alınan zemin numuneleri.

Cuddeback Soil-B zemin tipinin LS-DYNA ortamında *MAT_SOIL_AND_FOAM malzeme modeli ile oluşturulabilmesi için gerekli zemin mekanik özellikleri ve katsayıları arazi ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilerek Tablo 3.2 ve basınç-volumetrik birim şekildeğiştirme grafiği için Şekil 3.14 hazırlanmıştır.

Tablo 3.2: Cuddeback Soil-B zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.

PARAMETRE	DEĞER	BİRİM
RO	1.29E+03	kg/m ³
G	3.17E+06	Pa
K _{hacim}	1.68E+08	Pa
A0	6.18E+06	Pa ²
A1	5.14E+03	Pa
A2	1.07E+00	-



Şekil 3.14: Cuddeback Soil-B zemin tipi için basınç-birim şekil değiştirme ilişkisi.

3.3.2.2. Carson Sink Dry

Carson Sink bölgesinde farklı bölgelerinden alınan zemin numuneleri (Şekil 3.13) kuru hava koşullarına (dry season) uygun ortamlar için Cuddeback Soil-A ile Soil-B arasında orta güçlükteki bir zemin modelidir.

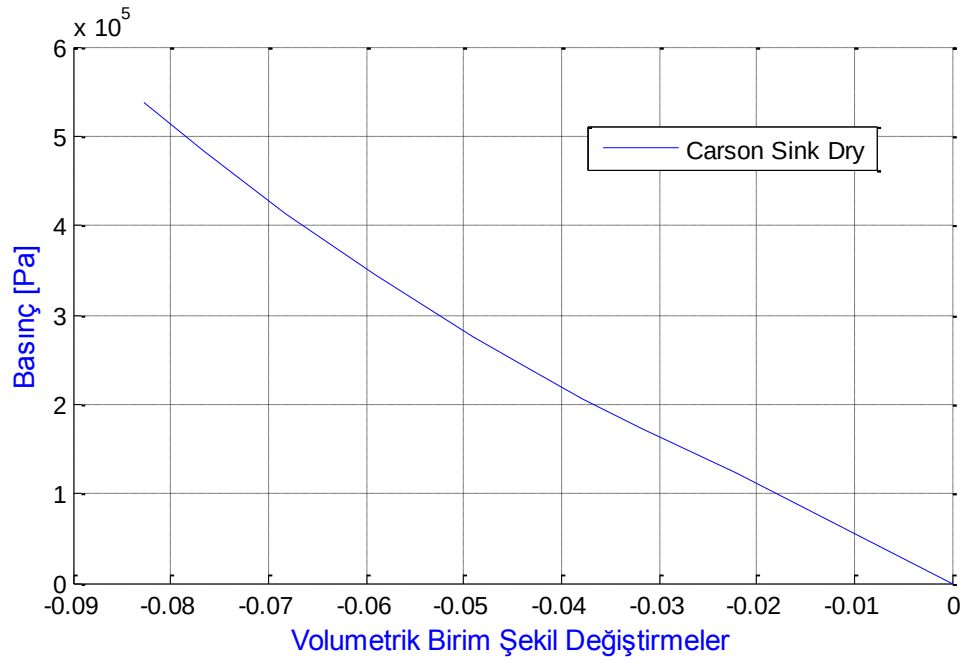


Şekil 3.15: Carson Sink Dry zemin tipi için farklı bölgelerden alınan zemin numuneleri.

Carson Sink Dry zemin tipinin LS-DYNA ortamında *MAT_SOIL_AND_FOAM malzeme modeli ile oluşturulabilmesi için gerekli zemin mekanik özellikleri ve katsayıları arazi ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilerek Tablo 3.3 ve basınç-volumetrik birim şekil değiştirme grafiği için Şekil 3.16 hazırlanmıştır.

Tablo 3.3: Carson Sink Dry zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.

PARAMETRE	DEĞER	BİRİM
RO	1.38E+03	kg/m ³
G	1.10E+07	Pa
K _{hacim}	1.34E+08	Pa
A0	1.34E+07	Pa ²
A1	6.63E+03	Pa
A2	8.22E-01	-



Şekil 3.16: Carson Sink Dry zemin tipi için basınç-birim şekildeğişirme ilişkisi.

3.3.2.3. Carson Sink Wet

Carson Sink bölgesinde farklı bölgelerinden alınan zemin numunesi (Şekil 3.17) ıslak hava koşullarına (wet season) uygun ortamlar için kullanılan zemin modelidir.

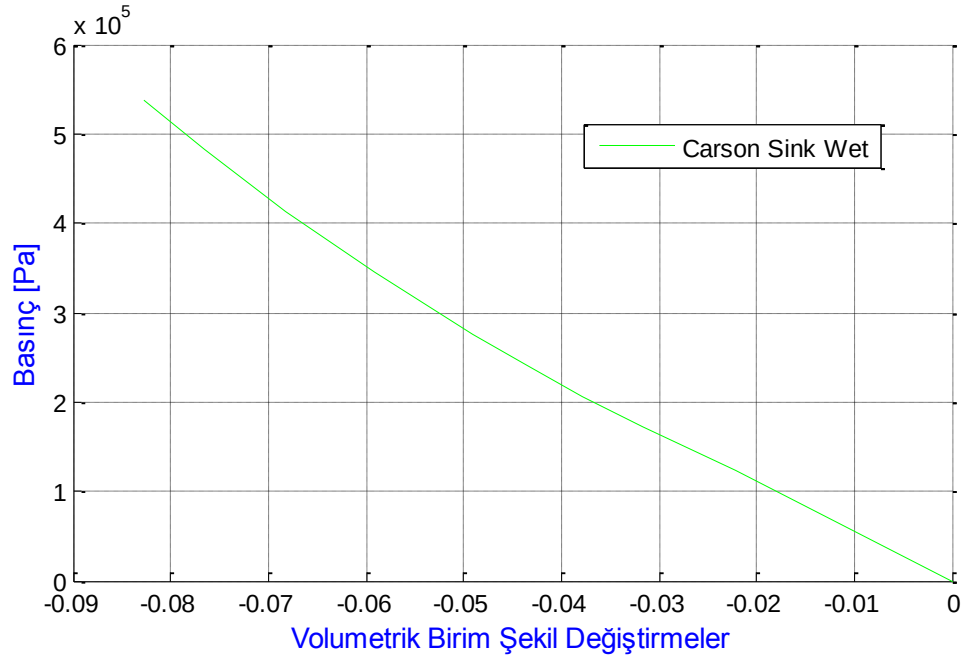


Şekil 3.17: Carson Sink Wet zemin tipi için zemin numunesinin alındığı bölge.

Carson Sink Wet zemin tipinin LS-DYNA ortamında *MAT_SOIL_AND_FOAM malzeme modeli ile oluşturulabilmesi için gerekli zemin mekanik özellikleri ve katsayıları arazi ve deneysel çalışmalar sonucu elde edilerek Tablo 3.4 ve basınç-volumetrik birim şekildeğiştirme grafiği için Şekil 3.18 hazırlanmıştır.

Tablo 3.4: Carson Sink Wet zemin tipi için malzeme modeli parametreleri.

PARAMETRE	DEĞER	BİRİM
RO	1.44E+03	kg/m ³
G	3.45E+06	Pa
K _{hacim}	8.69E+07	Pa
A0	9.36E+07	Pa ²
A1	1.28E+04	Pa
A2	4.39E-01	-



Şekil 3.18: Carson Sink Wet zemin tipi için basınç-birim şekildeğiştirme ilişkisi.

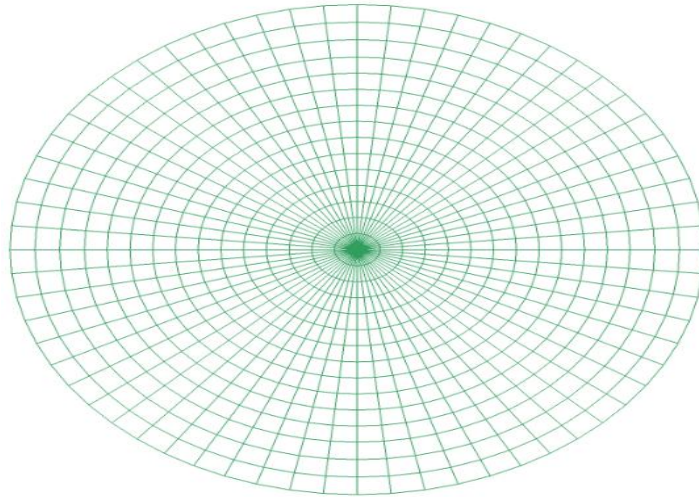
3.4. NÜMERİK TANK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI İÇİN MATLAB YAZILIMI İLE GELİŞTİRİLEN PROGRAMIN ÇALIŞMA MEKANİZMALARI

Silindirik tankların deprem performanslarının değerlendirilebilmesi için tank-sıvı ve tank-zemin etkileşimlerinin tüm nonlinear özellikleri içerecek şekilde güvenilir yazımlar ile modellenmesi gereklidir. Bu gereksinimi karşılamak için ticari yazılımların aksine bilimsel yoğunluğu yüksek olan LS-DYNA yazılımı tercih edilmiştir. LS-DYNA yazılımında kullanılan yöntem ve nonlinear algoritmalarının karmaşık olmasına karşın sistemlerin modellenmesi için gerekli olan program arayüzü yeterli kapasitede değildir. Nümerik modelleme, sistem geometrilerinin karmaşık olması, malzeme modellerinin çok olması, nonlinear özelliklerin tanımlanması, sistemin fiziksel davranışının doğru bir şekilde elde edilebilmesi için gerekli tanımların yapılması gibi işlemlerin çokluğundan ötürü çok fazla zaman almaktadır. Bu zaman kaybını önlemek ve tank modellerini hızlı bir şekilde oluşturulabilmek için MATLAB yazılımı ile yukarıda bahsedilen tüm etkileri gözönüne alan bir program geliştirilmiştir. MATLAB yazılımının tercih edilmesinin en önemli sebepleri arasında, nümerik işlemle kapasitesinin yüksek olması, analiz süresinin hızlı olması, dosya okuma yazma işlemlerinin kolaylığı, grafik işlemlerinin kuvvetli

olması gibi birçok faktör gösterilebilir. Bu yazılımın temel amacı kullanıcıdan tank sisteminin; geometri, malzeme, yükleme durumu gibi temel bilgileri alınarak, LS-DYNA yazılımı tarafından analizinin gerçekleştirilmesi için uygun formattaki *.dyn uzantılı dosyayı oluşturulmasıdır. Bu program ile tank-sıvı etkileşimi ve tank-zemin etkileşimi hızlı bir şekilde oluşturulmaktadır ve programda tank sisteminin sonlu elemanlar ile oluşturulması için çeşitli sonlu elemanlar ağı oluşturma teknikleri kullanılmıştır.

3.4.1. Tank-Sıvı Etkileşimin Modellenmesi

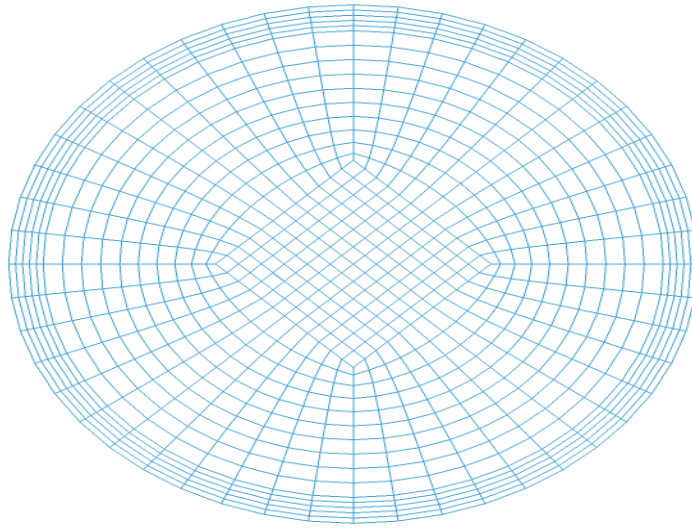
Tank-sıvı etkileşiminin ALE yaklaşımı ile nümerik modellenin hazırlanması için programda kullanılan prensiplerden bahsedilecektir. Tank-sıvı etkileşiminin nonlineer algoritmalarının yoğunluğu nedeniyle analizler oldukça uzun sürebilir (100-120 saat). Bu durumun çözülmesi yüksek kapasiteli bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak her zaman mevcut bilgisayarlarımızın kapasitesi yüksek olamayacağından dolayı sonlu elemanlar ağı (mesh) sisteminin çok iyi oluşturulması gerekir. Şekil 3.19’te tank-sıvı etkileşimi için sıklıkla kullanılan sonlu elemanlar ağ sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.19: Tank-sıvı etkileşimi hatalı ağ örgüsü.

Şekil 3.19’teki sonlu eleman ağı tank merkezine doğru gidildikçe eleman boyutları diğer eleman boyutlarına oldukça küçük kalmaktadır. Bu durum analiz süresini artırmakta ve sistemin stabilitesini bozmaktadır. Ayrıca tank merkezinde çok sayıda eleman birleştiğinden dolayı bu noktada basınç yığılması meydana gelmektedir. Bu ve benzeri eksiklikleri gidermek amacı ile Şekil 3.20’te gösterilen sonlu elemanlar ağına

sahip tank modeli önerilmektedir. Tank merkezindeki yığılmaları önlemek için orta bölgelerin sonlu elemanlar ağı dikdörtgen şeklindeki elemanlar kullanılmıştır. Tank-sıvı etkileşiminde çalkalanma hakim modlarının şekinden dolayı tank çeperlerinde maksimum kuvvet ve gerilmeler oluşmaktadır. Bu etkileri görebilmek ve en önemlisi tank-sıvı etkileşiminde kullanılan ALE yaklaşımın efektif olarak çalışabilmesi için kenar bölgelerin sonlu elemanlar ağında sıklaştırma işlemi uygulanmıştır. Kısaca tank merkezinde kaba sonlu elemanlar ağı (course mesh) kullanılırken tank çeperlerine doğru sıkı sonlu elemanlar ağı (finer mesh) kullanılmıştır.



Şekil 3.20: Tank-sıvı etkileşimi ideal ağ örgüsü.

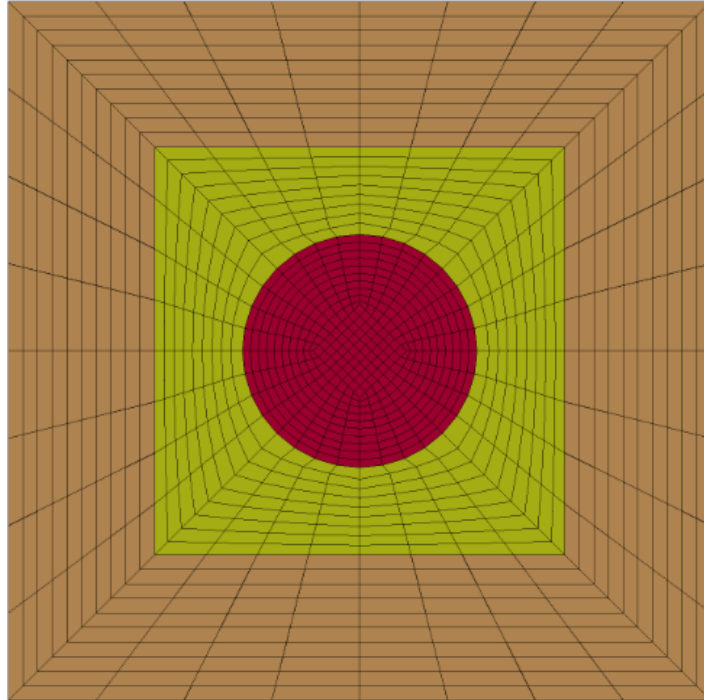
MATLAB yazılımı ile geliştirilen program, Şekil 3.20’te gösterilen sonlu elemanlar ağına sahip tank sistemlerinin istenilen geometride oluşturmaya olanak sağlamaktadır. Program, sonlu elemanlar ağı sistemindeki; tank merkezindeki karenin boyutu ve eleman sayısı, tank merkezinden tank çeperinde doğru giden bölgedeki eleman sayısı, tank çeperindeki sıklaştırma yapılacak bölgenin uzunluğu ve eleman sayısı, radyel doğrultudaki eleman sayısı gibi parametrelerin kullanıcı tarafından istenilen şekilde değiştirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.4.2. Tank-Zemin Etkileşimin Modellenmesi

Tank-zemin etkileşimi nümerik modelinin oluşturması için, tank-sıvı etkileşiminde olduğu gibi MATLAB yazılımı ile program yazılması tercih edilmiştir. Bunun sebepleri arasında; tank-zemin etkileşimi nümerik modelinin tank-sıvı etkileşim

modelinden daha kompleks olması ve LS-DYNA yazılımı içerisindeki mevcut araçlar ile tank-zemin modelinin oluşturulmasının oldukça zaman alması gibi etkiler gösterilebilir.

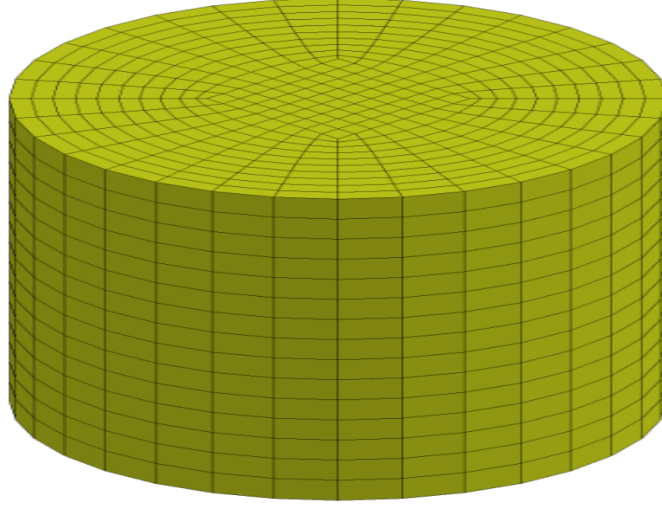
LS-DYNA ve diğer yazılımlar yapı-zemin etkileşimi için zemin tabakası ve emici tabakaların (PML) dikdörtgen bir sınır koşulları içerisinde tanımlanmasını istemektedir. Çünkü yapı-zemin etkileşimi algoritmalarının kompleks olması sebebiyle diğer geometriler sahip sınır koşullarının tanımlanmasında güçlükler yaşanmaktadır. Tank-zemin etkileşimi nümerik modelinin oluşturulmasında karşılaşılan zorluklardan en önemlisi tank geometrisinin silindirik olmasıdır. Silindirik sınırlardan dikdörtgen sınırlara geçişi sağlamak için yeni bir sonlu elemanlar ağının oluşturulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Tank-zemin etkileşimi için örnek nümerik modelin plandan görünümü Şekil 3.21 'de gösterilmiştir. Burada tank modeli kırmızı renk, zemin modeli sarı renk ve PML emici tabakaların modeli ise kahverengi ile gösterilmiştir.



Şekil 3.21: Tank-zemin etkileşimi nümerik modeli.

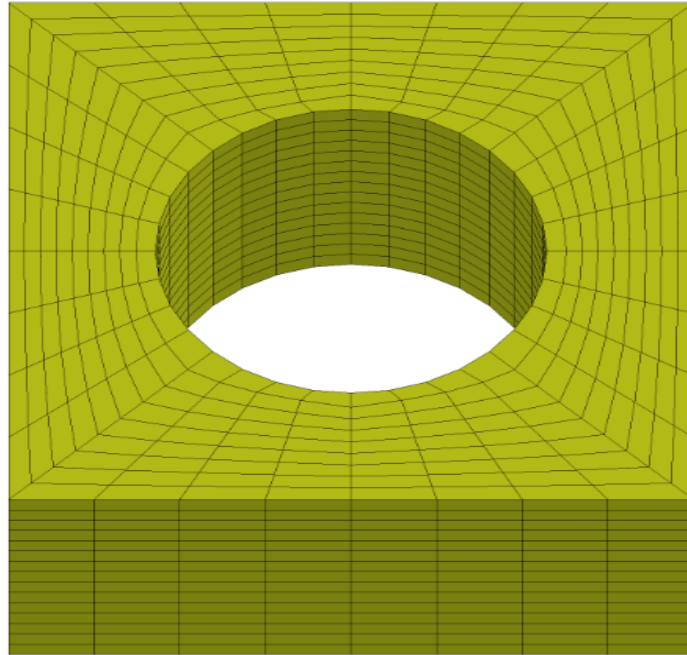
Şekil 3.21 'den görüleceği üzere silindirik tank sistemin dikdörtgen sınır hatlarına sahip zemin modeline geçebilmek için yeni bir sonlu elemanlar ağına tekniğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için zemin modelinin sonlu elemanlar ağı iki bölüme ayrılmıştır.

Birinci bölümde sistemin sonlu elemanlar ağ bütünlüğünün bozulmaması için, silindirik tank modeline benzer şekilde sonlu elemanlar ağı oluşturularak zemin derinliği boyunca devam ettirilmektedir (Şekil 3.22).



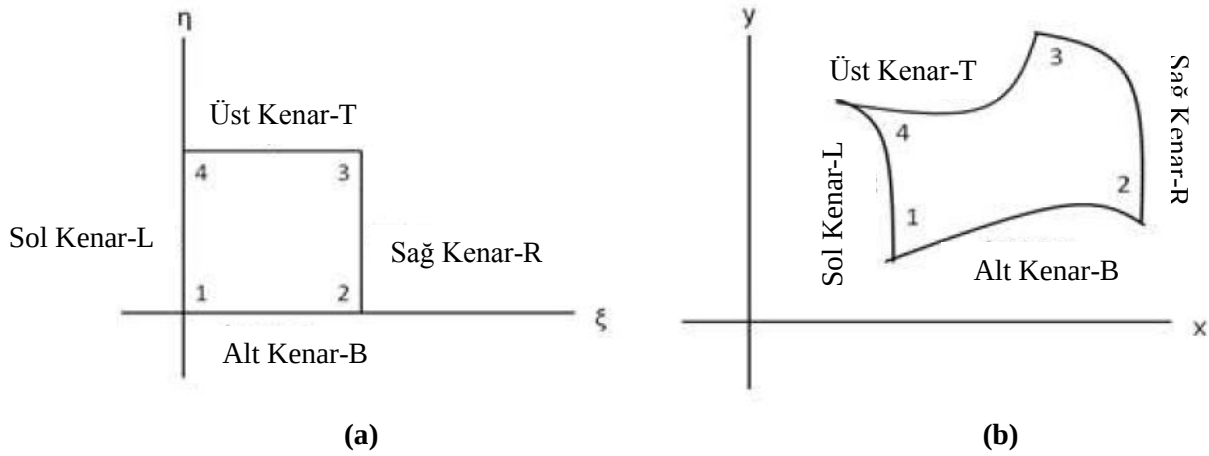
Şekil 3.22: Zemin modeli ağının birinci bölümü.

İkinci bölümde ise ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistemin sonlu elemanlar ağı oluşturulmaktadır (Şekil 3.23). Son aşamada ise iki parçaya bölünmüş sonlu eleman ağları birleştirilerek zemin modelinin oluşturulması tamamlanmaktadır.



Şekil 3.23: Zemin modeli ağının ikinci bölümü.

Ortası dairesel delik olan dikdörtgen sistemin sonlu elemanlar ağıнын kartezyen (x-y) koordinat sisteminde oluşturulması program hacmini artmasına ve algoritmaların kompleksleşmesine sebep olmaktadır. Bunun yerine gerekli olan sonlu elemanlar ağıнын doğal koordinat (ξ - η) sisteminde oluşturulup, koordinat dönüşümü ile sistem kartezyen koordinat sistemine geçme işleme oldukça pratik, etkili ve hızlı bir yöntemdir (Kolukula, 2010). Bu yöntem, sonlu elemanlar ötesi interpolasyon yöntemi (Transfinite Interpolation-TFI) olarak adlandırılmaktadır. TFI yönteminde kullanılan bir birimlik kare elemanı içerisinde oluşturulan doğal koordinat sistemi ile herhangi dört noktaya sahip eleman içerisindeki kartezyen koordinat sistemi Şekil 3.24’da gösterilmiştir.



Şekil 3.24: TFI yönteminde sınırların;(a) doğal ve (b) kartezyen koordinat sistemlerinde tanımlanması.

İki boyutlu düzlemde, doğal koordinat sistemi içerisinde eleman kenarları için sınır koşullarını (eleman düğüm noktaları koordinat sınırları) 3.10 eşitliği ile yazılır.

$$\begin{aligned} X_b(\xi), X_t(\xi) &\rightarrow 0 \leq \xi \leq 1 \\ X_l(\eta), X_r(\eta) &\rightarrow 0 \leq \eta \leq 1 \end{aligned} \quad 3.10$$

İki boyutlu düzlemdeki dört noktaya sahip eleman içerisindeki herhangi bir noktadaki kartezyen koordinatlarını, doğal koordinat sistemindeki elemanın kenar noktalarının koordinatları cinsinden birinci dereceden Lagrangian polinomlarını kullanarak 3.11 denklemi ile yazılabilir.

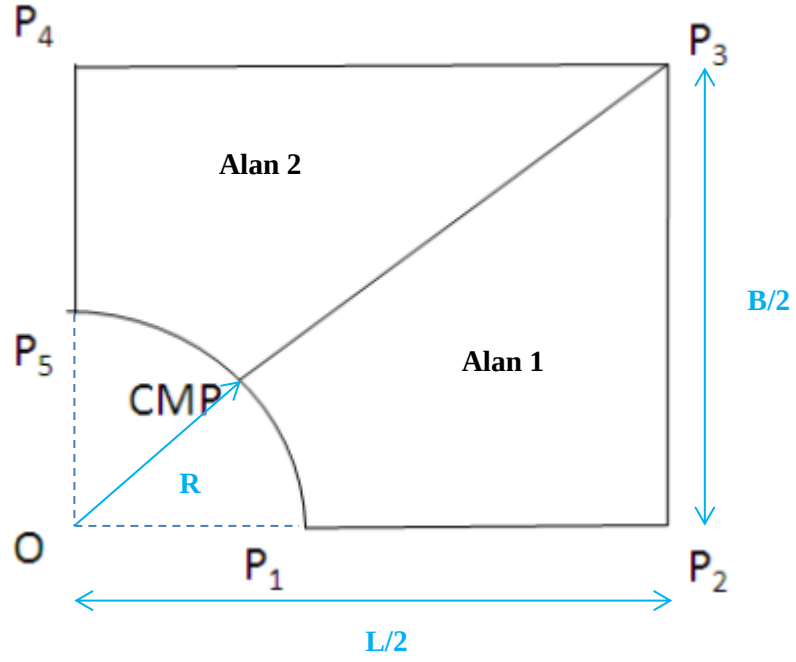
$$X(x, y) = (1-\eta)X_b(\xi) + \eta X_t(\xi) + (1-\xi)X_l(n) + \xi X_r(n) - \{\xi\eta X_t(1) + \xi(1-\eta)X_b(1) + \eta(1-\xi)X_t(0) + (1-\xi)(1-\eta)X_b(0)\} \quad 3.11$$

TFI yöntemi ile iki boyutlu düzlemde ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistem üzerinde uygulamak simetri özelliğinden yararlanarak mevcut sistemin $\frac{1}{4}$ parçasını iki bölgeye parçalayarak ele alalım (Şekil 3.25). Burada O noktası dikdörtgen merkezi ve P₁, P₂, P₃, P₄, P₅ ve CMP alanların oluşturduğu noktaları temsil etmektedir. Bu parametrelerin Şekil 3.25'deki iki alandan oluşan $\frac{1}{4}$ 'lük sistem için değerleri Tablo 3.5' da verilmiştir.

Tablo 3.5: Ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistemin $\frac{1}{4}$ lük parçasının düğüm nokta koordinatlarının belirlenmesi.

<i>PARAMETRE</i>	<i>X Koordinatı</i>	<i>Y Koordinatı</i>
O	0	0
P1	R	0
P2	L/2	0
P3	L/2	B/2
P4	0	B/2
P5	0	R

Burada R delik yarıçapının, L dikdörtgen uzunluğunu ve B dikdörtgen derinliğini temsil etmektedir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25: Ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistemin $\frac{1}{4}$ lük parçası.

İki alan içerisinde alt kenar koordinatlarını 3.12, üst kenar koordinatlarını 3.13, sol kenar koordinatlarını 3.14 ve sağ kenar koordinatlarını 3.15, denklemleri ile dikdörtgen sistemindeki delik yarıçapına (R), kenar uzunluğuna (L) ve derinliğine (B) bağlı olarak doğal koordinat sisteminde yazabiliriz.

$$x_{b1}(s) = R \cos\left(\frac{\pi}{4}s\right); y_{b1}(s) = R \sin\left(\frac{\pi}{4}s\right) \quad 3.12$$

$$x_{b2}(s) = R \cos\left(\frac{\pi}{4}s\right); y_{b2}(s) = R \sin\left(\frac{\pi}{4}s\right)$$

$$x_{t1} = \frac{L}{2}; y_{t1}(s) = \frac{B}{2}s \quad 3.13$$

$$x_{t2}(s) = (1-s)\frac{L}{2}; y_{t2} = \frac{B}{2}$$

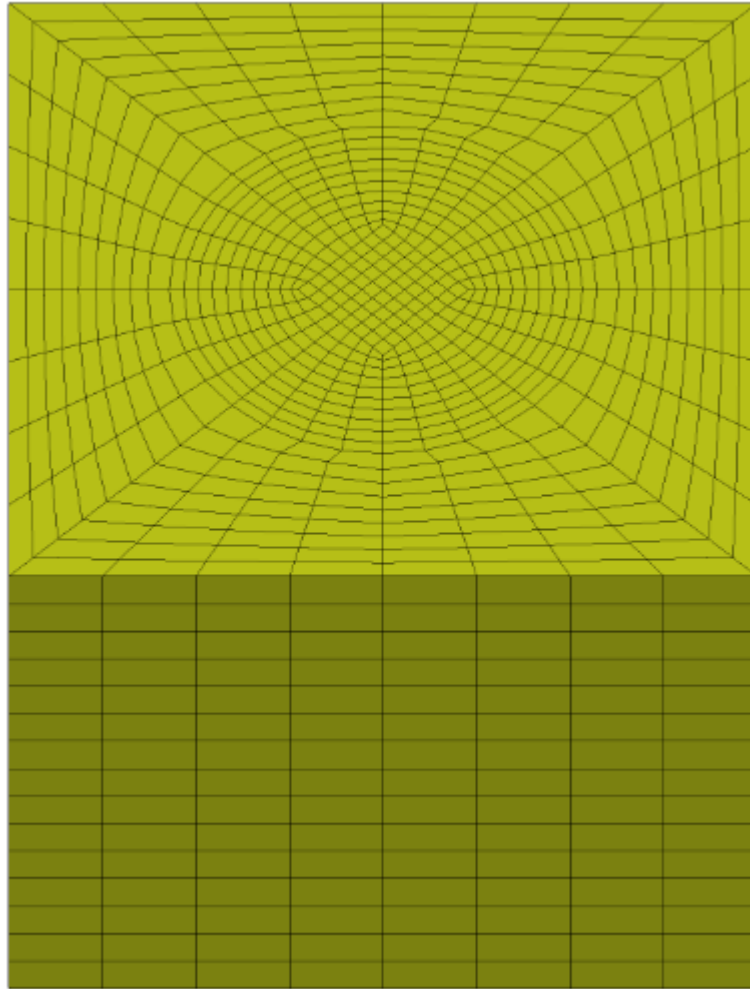
$$x_{l1}(s) = R + \left(\frac{L}{2} - R\right)s; y_{l1} = 0 \quad 3.14$$

$$x_{l2}(s) = 0; y_{l2} = R + \left(\frac{B}{2} - R\right)s$$

$$\begin{aligned}
x_{r1}(s) &= R \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \left(\frac{L}{2} - R \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)s; y_{r1}(s) = R \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \left(\frac{L}{2} - R \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)s \\
x_{r2}(s) &= R \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + \left(\frac{B}{2} - R \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)s; y_{r2}(s) = R \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + \left(\frac{B}{2} - R \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right)s
\end{aligned} \tag{3.15}$$

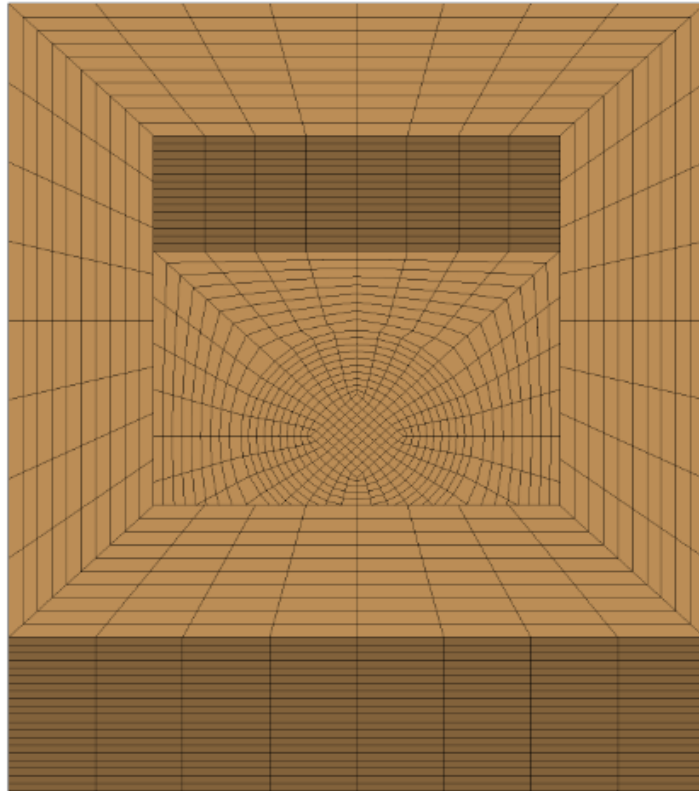
Böylece TFI yöntemi ile ortasında dairesel delik bulunan sistemi, doğal koordinat sisteminde sonlu elemanlar ağını oluşturduktan sonra kartezyen koordinat sistemindeki değerleri elde edilmiştir.

Tank-zemin etkileşiminde zemin ortamının nümerik modellenmesi için gerekli sonlu elemanlar ağının iki bölümü oluşturulmuştur. İki bölüme ayrılan sonlu elemanlar ağının birleştirilmiş durumu Şekil 3.26'de gösterilmiştir.



Şekil 3.26: Tank-zemin etkileşiminde zemin modeli.

Tank-zemin sisteminde zemin modelinin oluşturulmasının ardından PML tabakaların oluşturulması gerekir. Bunun için gerekli olan sonlu elemanlar ağı, ortasında dikdörtgen delik bulunan dikdörtgen sistemin oluşturulmasıdır. Modelin oluşturulmasında, ortasında dairesel delik bulunan dikdörtgen sistem için oluşturulan nümerik model ile benzer adımlar takip edilmiştir. Yine simetri özelliğinden yararlanılarak $\frac{1}{4}$ 'lük sistem iki farklı alan ayrılarak, doğal koordinat sistemi üzerinde alanların kenarları üzerinde değişim denklemleri yazarak kartezyen koordinat sistemindeki sonlu elemanlar ağına geri dönebiliriz. PML tabakaları için oluşturulan sonlu elemanlar ağı için örnek model gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi zemin ortamı PML tabakalar tarafından kuşatılmıştır.



Şekil 3.27: Tank-zemin etkileşiminde PML tabakalar.

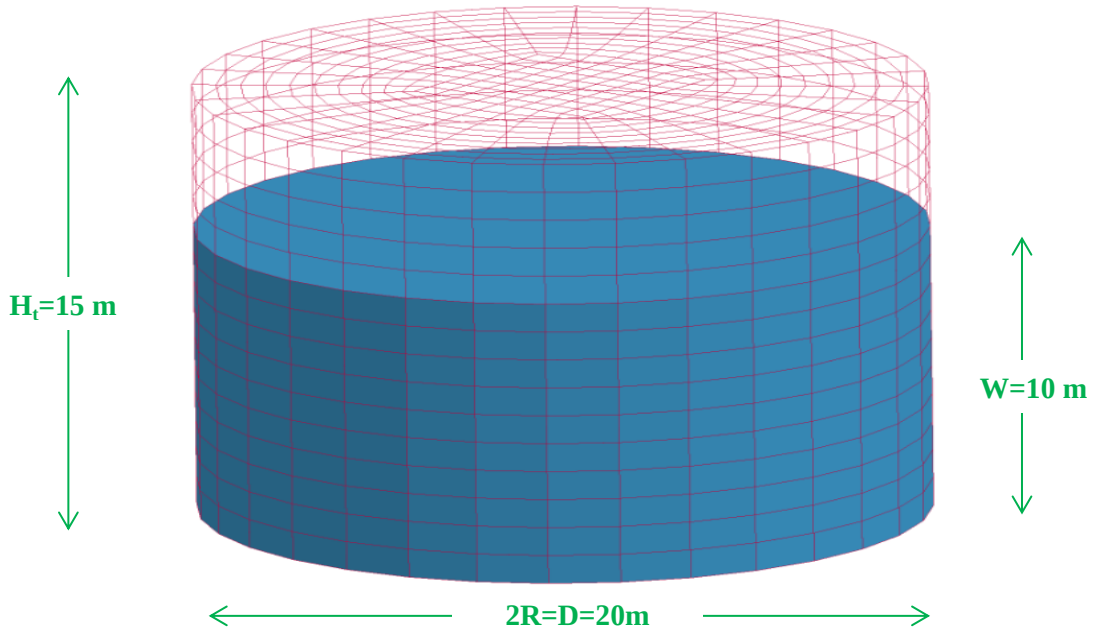
MATLAB yazılımı ile geliştirilen programda zemin ve PML tabakası derinliği, genişliği ve sonlu elemanlar sayısı kullanıcı tarafından istenilen boyutlarda değiştirilebilir.

3.5. 3BOYUTLU SİLİNDİRİK TANK-SIVI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ NÜMERİK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI

Bu bölümde üç boyutlu silindirik tankların tank-sıvı ve tank-zemin etkileşimlerinin dikkate alınarak deprem performanslarının değerlendirebilmesi için, nümerik stabilite, zaman gibi etkenler gözönüne alınarak optimum sonlu elemanlar ağına sahip nümerik modeller hazırlanacaktır.

3.5.1. Tank Geometrisinin Belirlenmesi

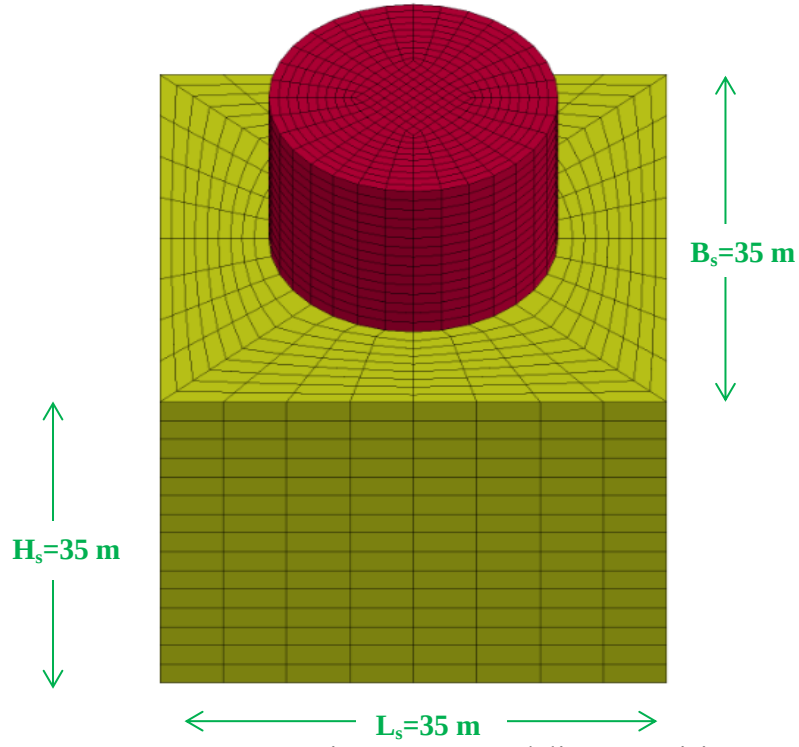
Türkiye’de sıvı ihtiva eden tankların üretimini gerçekleştiren firmalardan alınan bilgiler ışığında nümerik analizlerde kullanılan tank geometrisi belirlenmiştir (Şekil 3.28). Burada tank yüksekliği H_t , tank yarıçapı R , tank çapı D ve su yüksekliği W ile gösterilmiştir.



Şekil 3.28: Nümerik analizlerde kullanılan tank geometrisi ve sıvının görseli.

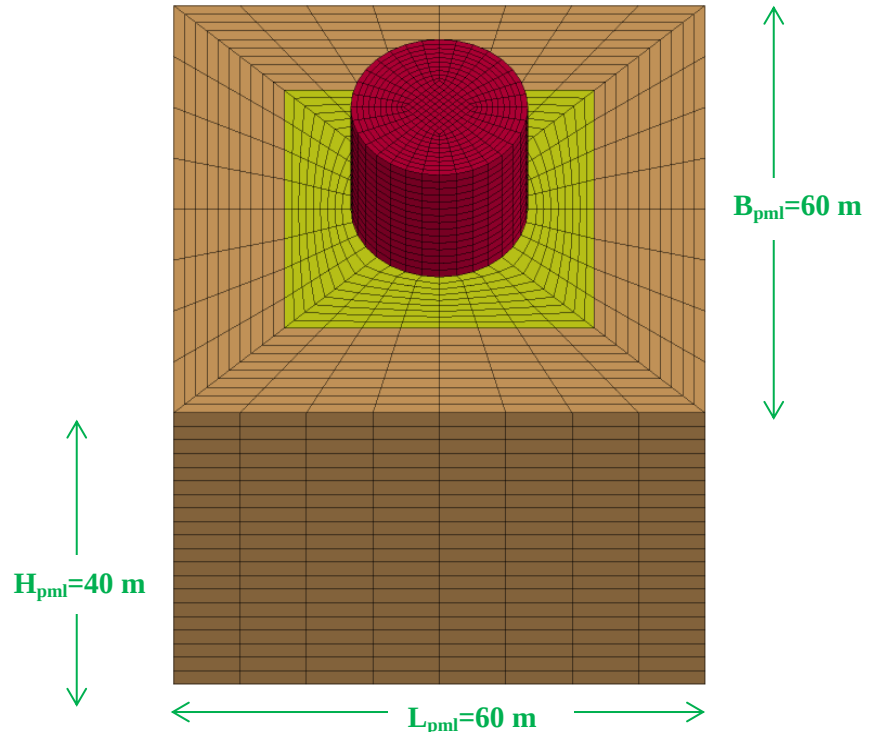
3.5.2. Zemin Geometrisi ve PML Tabakaların Geometrisi

Tank nümerik modelinin belirlenmesinin ardından yapı-zemin etkileşimi için zemin ve PML modellerinin oluşturulması gereklidir. Tank geometrisine bağlı olarak belirlenen dikdörtgen şeklindeki zemin modeli Şekil 3.29 gösterilmiştir. Burada zemin modeli genişliği L_s , zemin modeli derinliği B_s ve zemin modeli yüksekliği H_s olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.29: Zemin nümerik modeli geometrisi

PML tabakaların geometrisi ise zemin modelini kuşatacak şekilde belirlenmiştir (Şekil 3.30). Burada PML modeli genişliği L_{pml} , derinliği B_{pml} ve yüksekliği H_{pml} olarak gösterilmiştir.



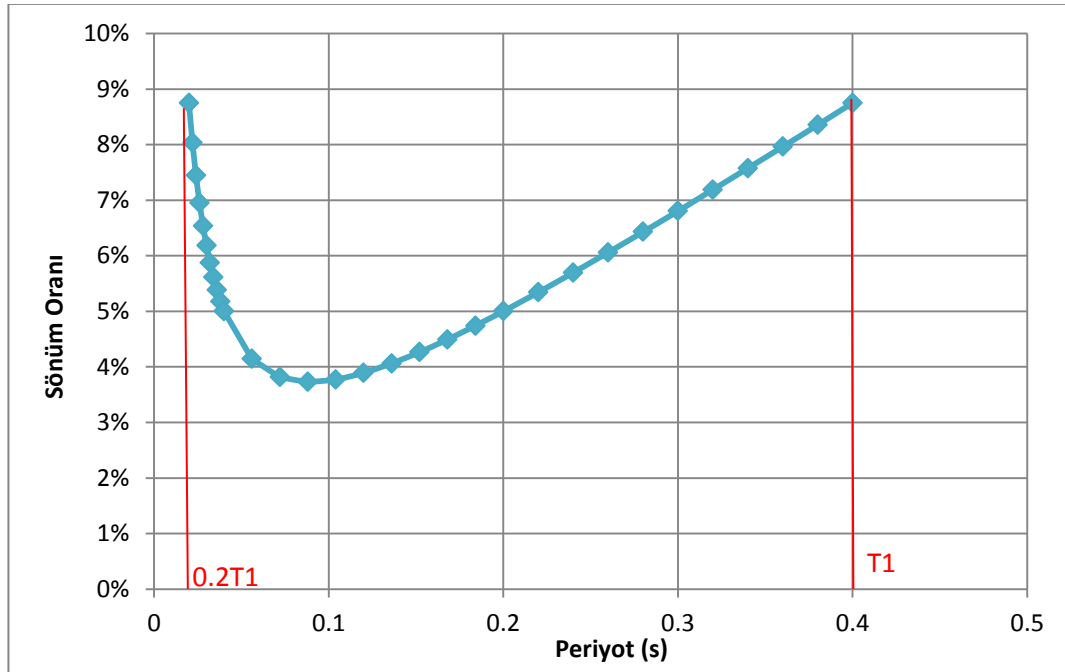
Şekil 3.30: PML nümerik modeli geometrisi.

3.5.3. Tank Sisteminde Sönüm Oranının Elde Edilmesi

Çok serbestlik dereceli sistemlerde sönüm oranının elde edilmesi için en çok kullanılan yöntemlerden biri Rayleigh Yöntemidir. Bu yöntemde M yapısal sistemin kütle matrisi ve K yapısal sistemin rijitlik matrisi olmak üzere C sönüm matrisini 3.16 denklemi ile yazılır.

$$[C] = \alpha[K] + \beta[M] \quad 3.16$$

Rayleigh Yöntemi 3.16 denkleminde görüldüğü üzere sönüm matrisi (C), kütle matrisi (M) ve rijitlik matrisi (K) ile orantılı olarak değişim göstermektedir. Sönüm matrisi (C) sistemde oluşabilecek tüm modlara ait sönüm oranlarını içerdiğinden, tüm modlar için aynı sönüm oranının tanımlanması önemlidir. Bu yüzden denklemdeki α ve β katsayılarının ilk ve son periyot değerlerine bağımlı olarak güvenilir bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu ilk ve son periyot değerleri için optimum değerler, sırasıyla 0.2T1 ve T1 olarak kullanıldığında genellikle istenilen sönüm oranı tüm sistem salınımlarında geçerli olmaktadır. (Şekil 3.31). Burada T1 yapısal sistemin birinci periyoduna (hakim periyot) karşılık gelmektedir.



Şekil 3.31: Rayleigh Yönteminde sönüm oranları için optimum sınırlar

Tank sisteminde Rayleigh Yöntemi ile sönüm oranlarını elde etmek için hakim periyoda gereksinim duyulmaktadır. Hakim periyot hesabı için SAP2000 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım tank-sıvı sistemi modellenerek serbest titreşim analizi yapılmıştır. Sistemin hakim periyodunun belirlenmesinin ardından Rayleigh yöntemi ile sönüm oranı %5 olacak şekilde hesaplanmıştır.

Zemin ortamının sönüm oranının hesaplanması için analitik yaklaşımla ve mühendislik verilerinden yararlanılarak %2 olarak kabul edilerek Rayleigh yöntemi ile sönüm eğrisi elde edilmiştir.

3.6. ANALİZLERDE KULLANILACAK DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ

Deprem şartnamelerinde sismik tehlike genellikle tepki spektrumu ile tanımlanır ve zaman tanım alanında yapılacak hesaplamalarda bu tepki spektrumları ile uyumlu olan kayıtların kullanılmasına izin verilir. Ancak mevcut tank-yapı-zemin etkileşimi için geliştirilen modellerin zaman tanım alanında analizi için gerekli deprem kayıtlarının tepki spektrumları ile uyumlu olmasına gerek yoktur. Çünkü kullanılan nümerik tank sistemi direkt yöntem ile tank-zemin sistemi bütün olarak modellenmektedir ve deprem dalgaları anakayadan tanımlandığından ötürü zemin ortamı içerisinde sürekli olarak değişikliğe maruz kalmaktadır. Bu yüzden deprem kayıtlarının tepki spektrumları ile uyumu gözardı edilerek ve deprem kayıtları altında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

Farklı zemin tiplerinin, 3 adet deprem etkisi altında zaman tanım alanında nonlineer analizleri gerçekleştirilerek tank-sıvı etkileşimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center-PEER) kuvvetli yer hareketi veri bankasından Türkiye’de meydana gelmiş iki adet ve Japonya’da meydana gelmiş bir adet deprem kaydı analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Üç boyutlu silindirik tankların analizi için seçilen üç adet deprem bileşeninin karakteristik özellikleri Tablo 3.6’da verilmiştir. Tablodaki deprem kaydının x doğrultusundaki bileşeni H1, y doğrultusundaki bileşeni H2, z doğrultusundaki bileşeni V olarak tanımlanmaktadır.

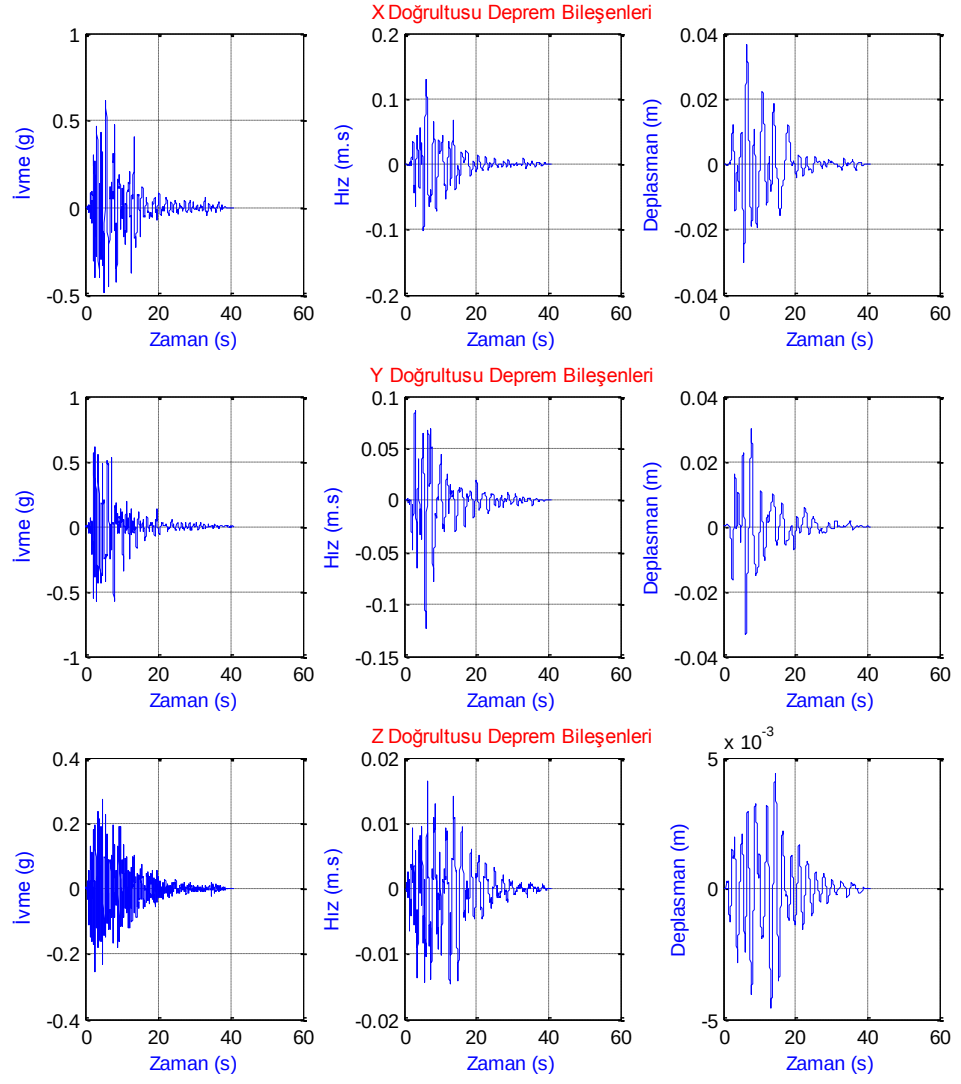
Seçilen deprem hareketi altında tank-sıvı-zemin sisteminde oluşabilecek sistem tepkileri (çalkalanma yüksekliği, devrilme momenti, kesme kuvveti vb.) düşük mertebede elde edilebilir. Farklı zemin tiplerinin etkisi araştıracağından dolayı, bu durumun engellenmesi için seçilen deprem hareketlerinin uygun bir katsayı ile ölçeklenmiştir. Deprem kayıtlarının nümerik analizde kullanılan isimleri, ölçekleme katsayıları ve analiz süreleri için Tablo 3.7 hazırlanmıştır.

Tablo 3.6: Seçilen deprem yer hareketlerinin karakteristik özellikleri.

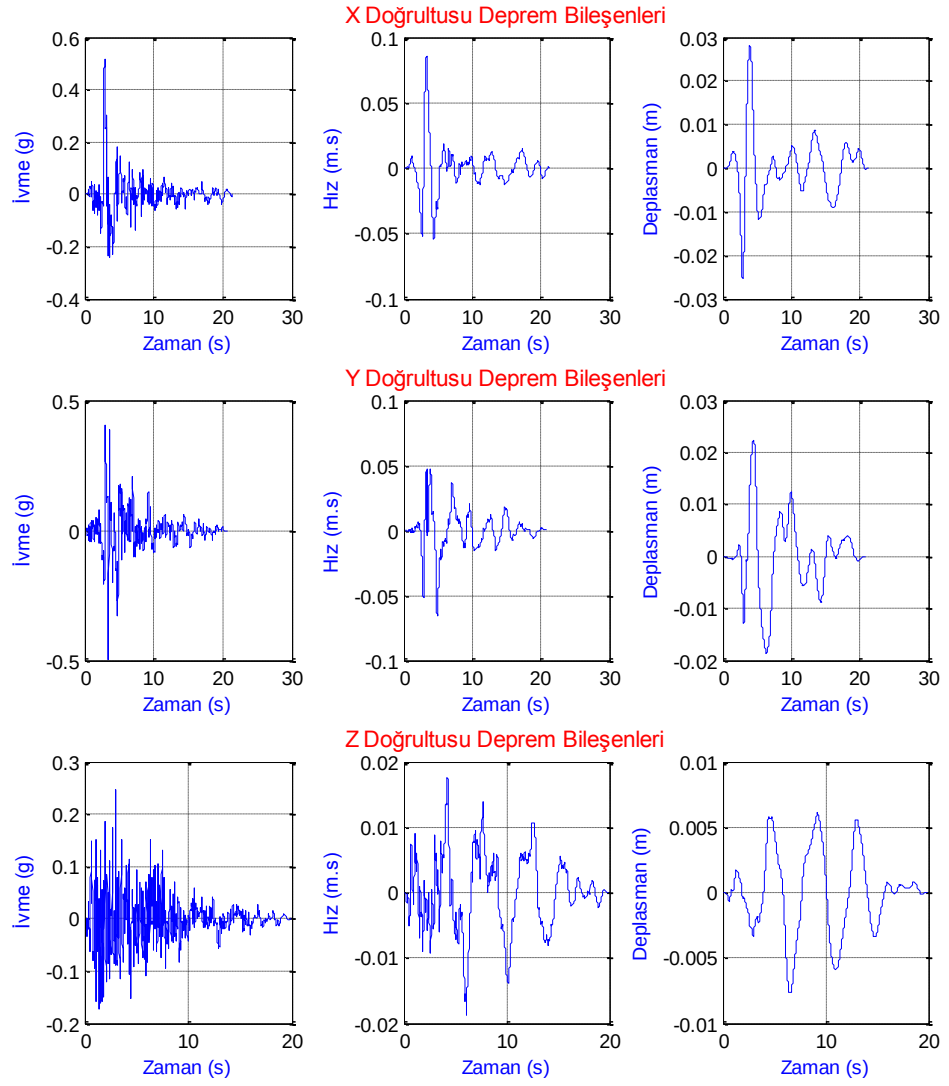
<i>No</i>	<i>Deprem</i>	<i>Moment Büyükluğu</i>	<i>İstasyon</i>	<i>Bileşen (H1)</i>	<i>Bileşen (H2)</i>	<i>Bileşen (V)</i>	<i>PGA_{max} (g)</i>
1	Kobe 01.16.1995	6.9	Takatori	TAK00.AT2	TAK90.AT2	TAKUP.AT2	0.616
2	Erzincan 13.03.1992	6.9	Erzincan	ERZNS.AT2	ERZEW.AT2	ERZUP.AT2	0.515
3	Düzce 12.11.1999	7.1	Lamont	DZCE.AT2	DZCN.AT2	DZCV.AT2	0.257

Tablo 3.7: Seçilen deprem yer hareketleri için ölçekleme katsayıları.

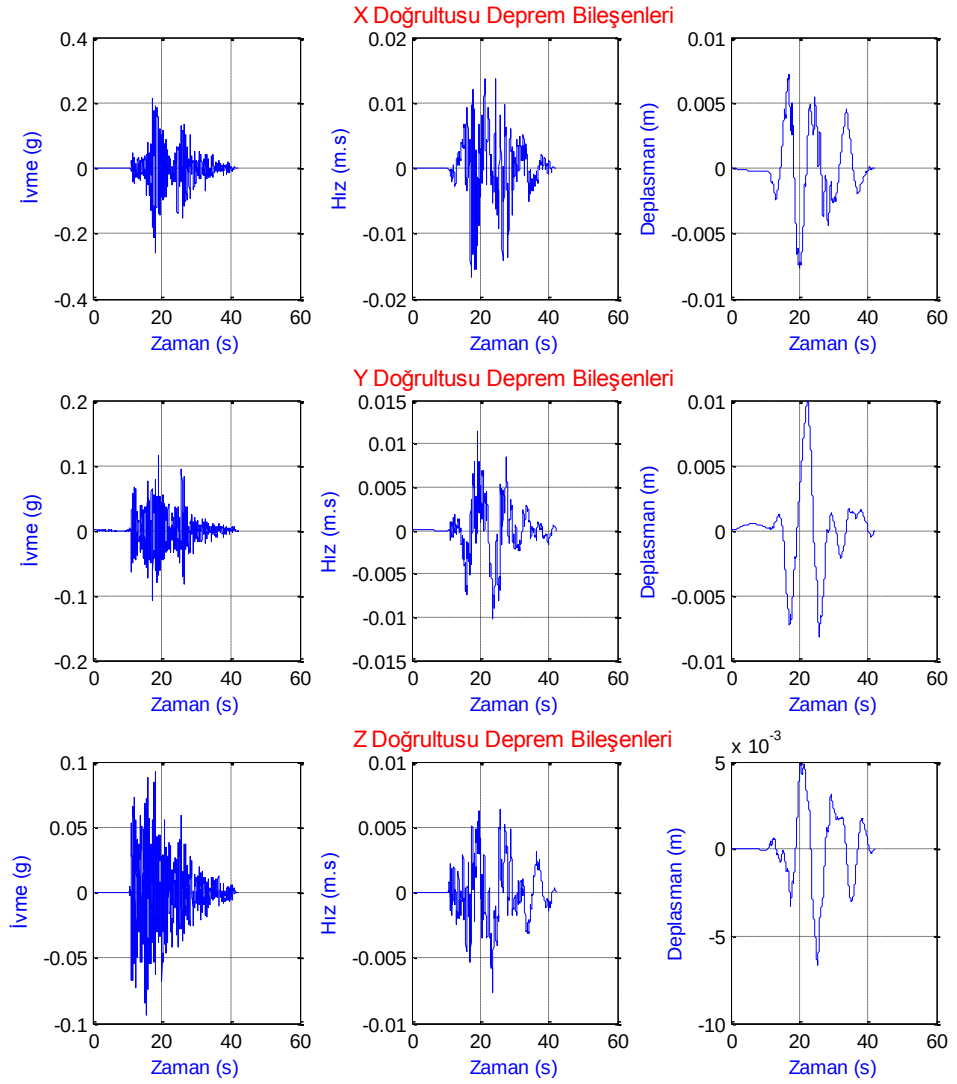
<i>Analiz Adı</i>	<i>Deprem</i>	<i>Ölçekleme Katsayısı</i>	<i>Analiz Süresi (s)</i>
Deprem-1	Kobe 01.16.1995	10.6	25.0
Deprem-2	Erzincan 13.03.1992	12.5	20.0
Deprem-3	Düzce 12.11.1999	50.0	40.0



Şekil 3.32: X,Y ve Z doğrultularında Kobe deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.



Şekil 3.33: X,Y ve Z doğrultularında Erzincan deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.



Şekil 3.34: X,Y ve Z doğrultularında Düzce deprem yer hareketine ait ivme, hız ve yer değiştirme bileşenleri.

4. BULGULAR

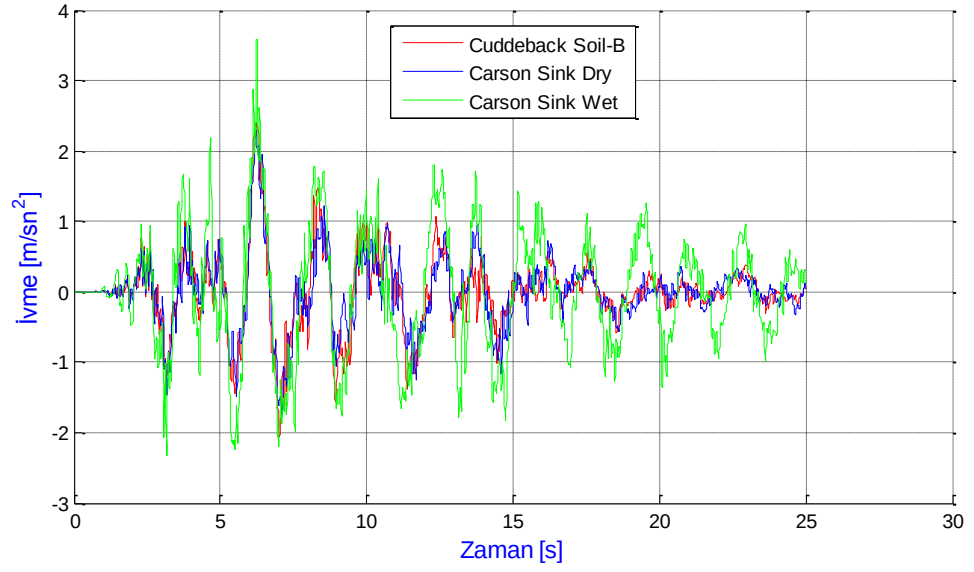
Silindirik tankların deprem performanslarının belirlenmesi için, seçilen nümerik modelin (Şekil 3.28), seçilen yer hareketleri (Tablo 3.6) altında analizi LS-DYNA yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Zemin ortamının, tank-sıvı sisteminde oluşan tepkiler (serbest sıvı yüzeyinde oluşan ivme, çalkalanma yüksekliği, tank yatay deformasyonu, taban kesme kuvveti, devrilme momenti) üzerindeki etkisi; tank sisteminde oluşan bu tepkilerin zemin tarafından ne kadar artırıldığı (amplifikasyon) ve ya azaltıldığı (de-amplifikasyon) incelenecektir.

Kullanılan nümerik modellerin deprem yer hareketinin yatay (x-y) ve düşey (z) bileşenleri olmak üzere üç doğrultudaki zaman tanım alanında analizi (time history analysis) gerçekleştirilmiştir.

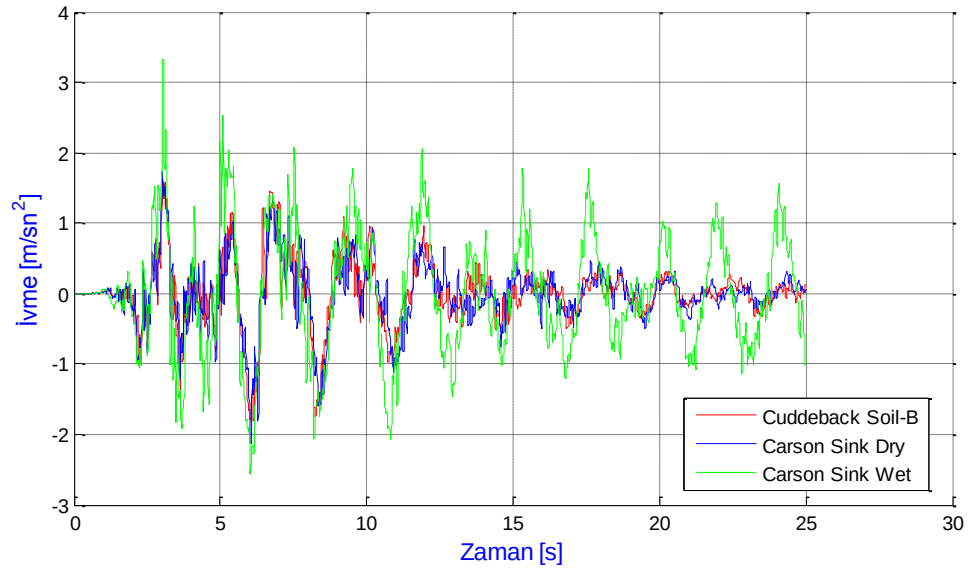
4.1. SERBEST SIVI YÜZEYİNDE OLUŞAN İVMELER

Tank-sıvı-zemin sisteminde, serbest sıvı yüksekliğinde zaman tanım alanında oluşan ivmelerin, farklı deprem yer hareketleri etkisi altında ve farklı zemin ortamları için değişimi değerlendirilmelidir.

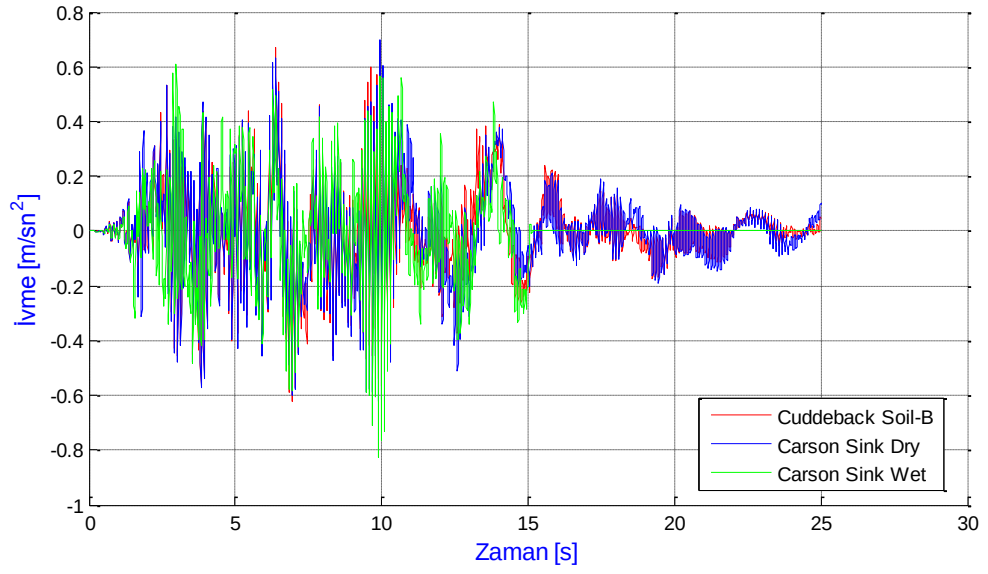
Serbest sıvı yüzeyinde Deprem-1 yer hareketi altında oluşan ivmeler x doğrultusunda Şekil 4.1’de, y doğrultusunda Şekil 4.2’de ve z doğrultusunda Şekil 4.3’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.1: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

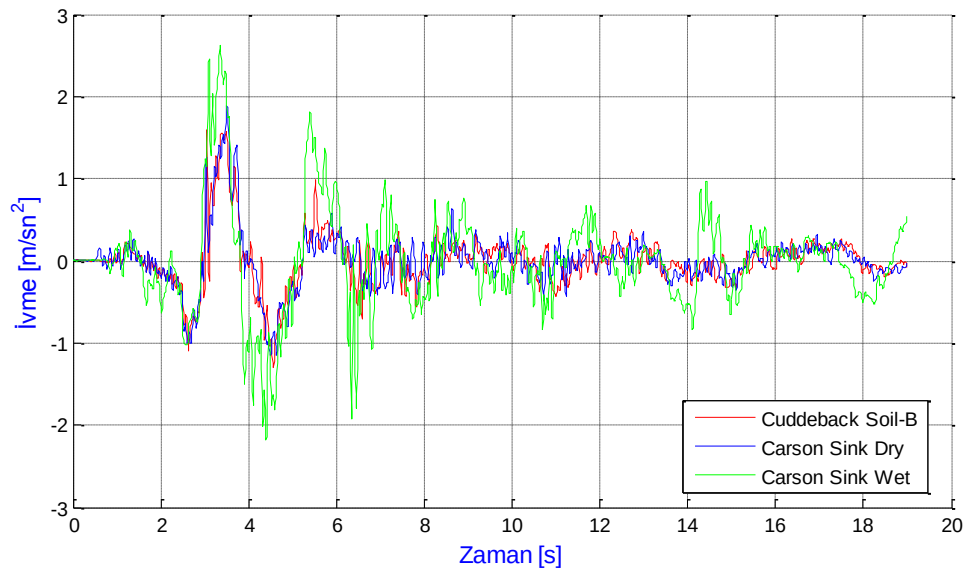


Şekil 4.2: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

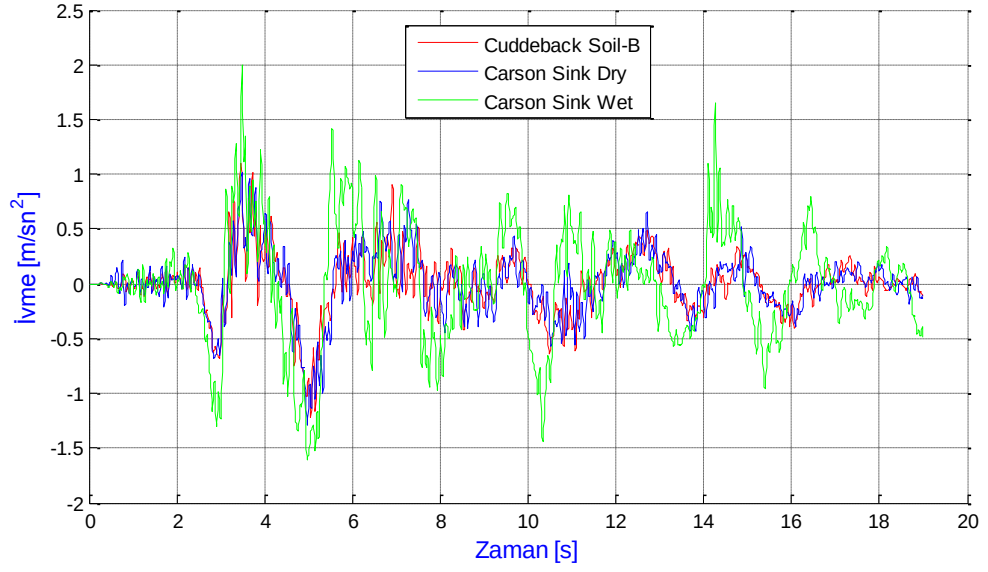


Şekil 4.3: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

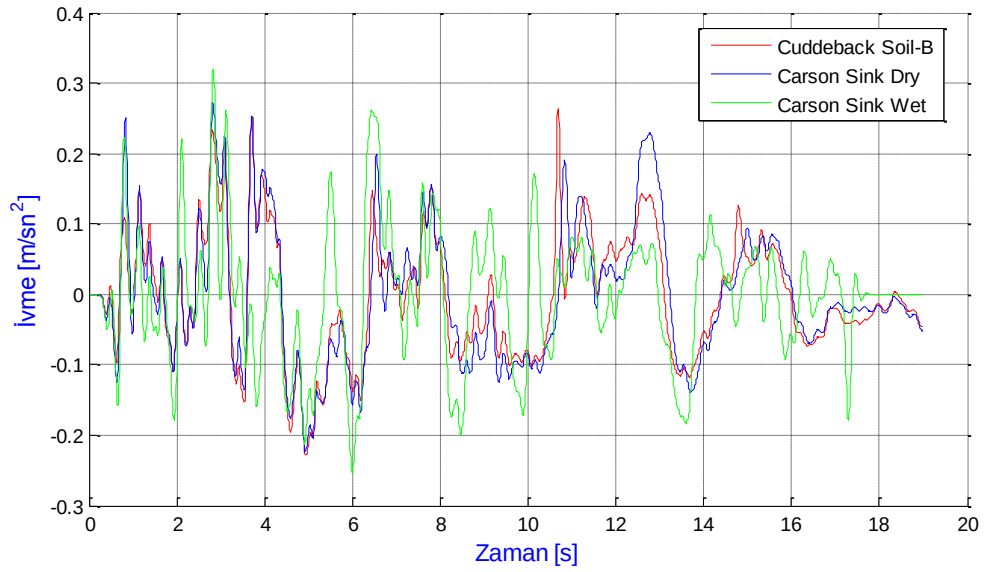
Serbest sıvı yüzeyinde Deprem-2 yer hareketi altında oluşan ivmeler x doğrultusunda Şekil 4.4’de, y doğrultusunda Şekil 4.5’de ve z doğrultusunda Şekil 4.6’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.4: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

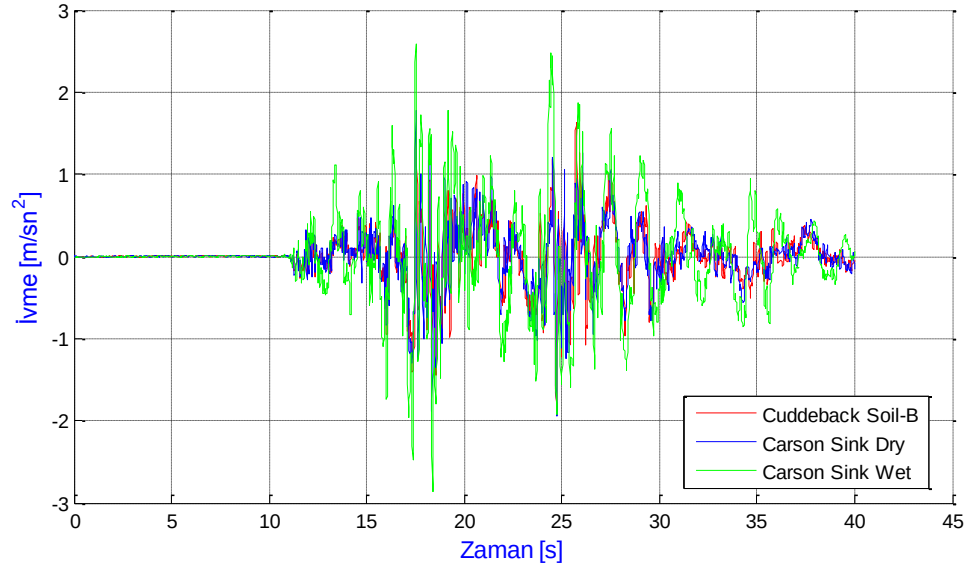


Şekil 4.5: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

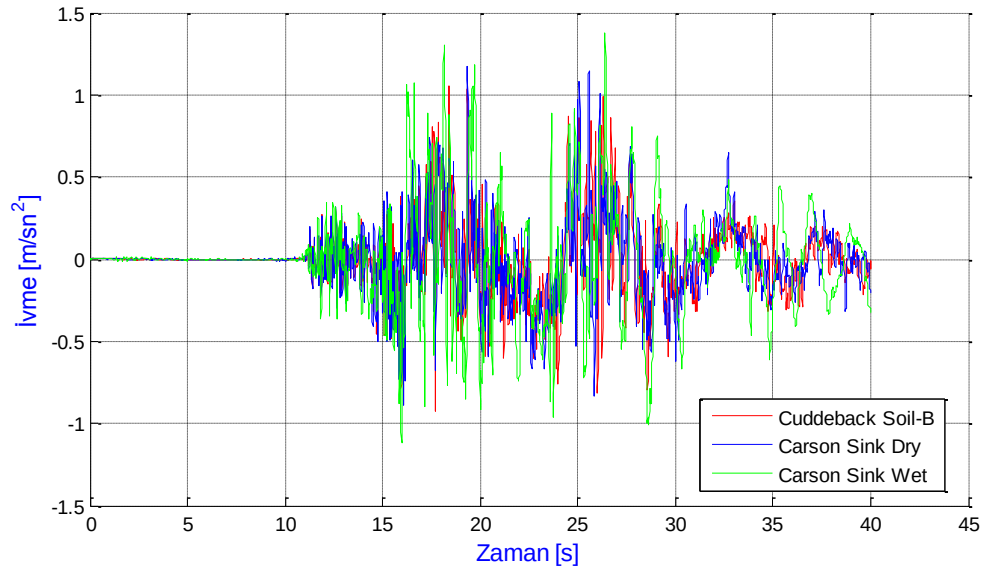


Şekil 4.6: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

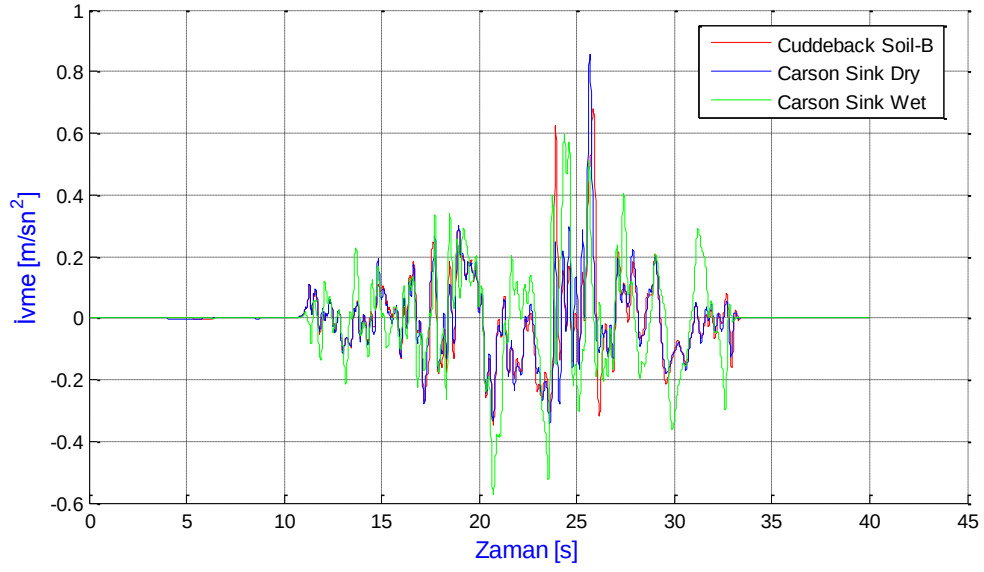
Serbest sıvı yüzeyinde Deprem-3 yer hareketi altında oluşan ivmeler x doğrultusunda Şekil 4.7’de, y doğrultusunda Şekil 4.8’de ve z doğrultusunda Şekil 4.9’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.7: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde x doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.8: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde y doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.9: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüksekliğinde z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimi.

Üç farklı deprem yer hareketi altında farklı zemin tipleri için serbest sıvı yüzeyinde x, y ve z doğrultusunda oluşan ivmelerin zamana bağlı değişimleri incelendi. Zemin tiplerinin ivme değerlerine olan etkisini daha iyi görebilmek için maksimum ivme değerleri karşılaştırılmalıdır. Sıvı serbest yüzeyi oluşan maksimum ivmeler x doğrultusu için Tablo 4.1’de, y doğrultusu için Tablo 4.2’de ve z doğrultusu için Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Sıvı serbest yüzeyi x doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn²).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	2.4031	2.2950	3.5874
Deprem-2	1.5848	1.8948	2.6204
Deprem-3	1.8895	1.9345	2.8597

Tablo 4.2: Sıvı serbest yüzeyi y doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn^2).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	1.8024	2.1297	3.3288
Deprem-2	1.2237	1.2834	2.0004
Deprem-3	1.0563	1.1746	1.3783

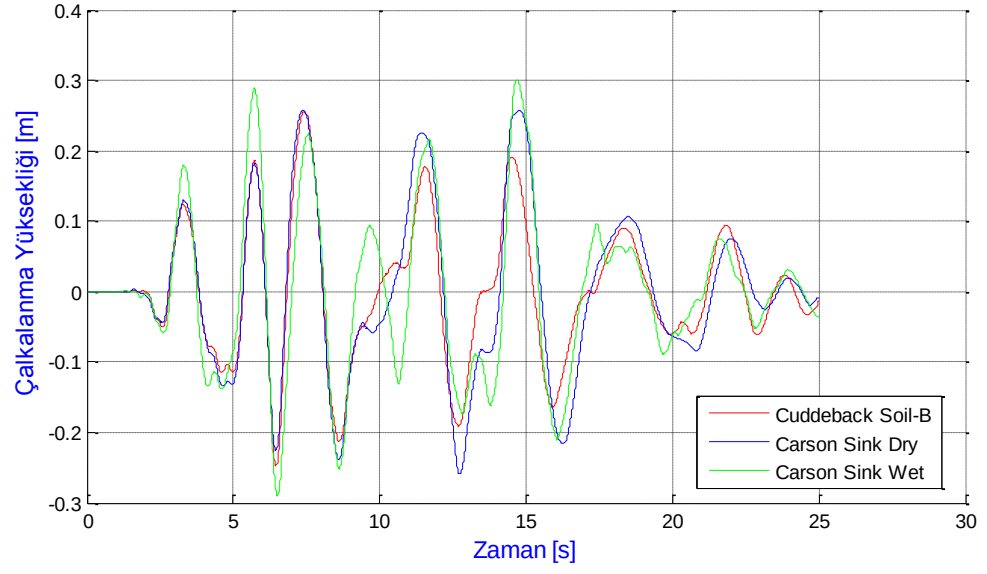
Tablo 4.3: Sıvı serbest yüzeyi z doğrultusunda oluşan maksimum ivmeler (m/sn^2).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	0.6845	0.6954	0.8273
Deprem-2	0.2647	0.2717	0.3188
Deprem-3	0.6809	0.8572	0.5956

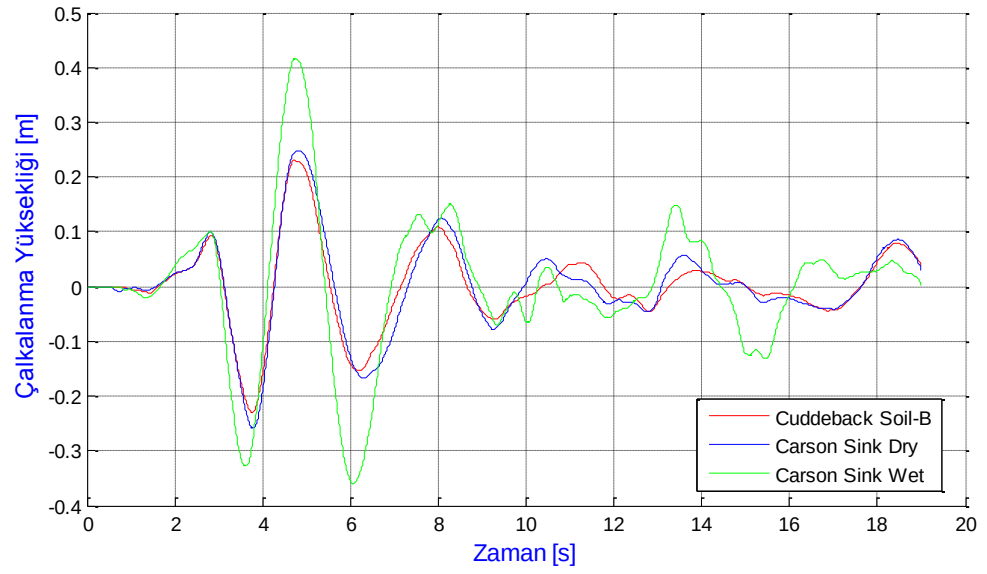
4.2. SERBEST SIVI YÜZEYİ ÇALKALANMA YÜKSEKLİĞİ DEĞİŞİMİ

Üç boyutlu silindirik tank tasarımı için en önemli etkenlerden biri sıvının çalkalanmasıdır. Deprem sırasında tanklarda oluşan yüksek genlikli çalkalanma davranışı hasarlara sebep olmaktadır. Bu bölümde serbest sıvı yüzeyinde çalkalanma yüksekliği değişimine zemin ortamının etkisi incelenecektir.

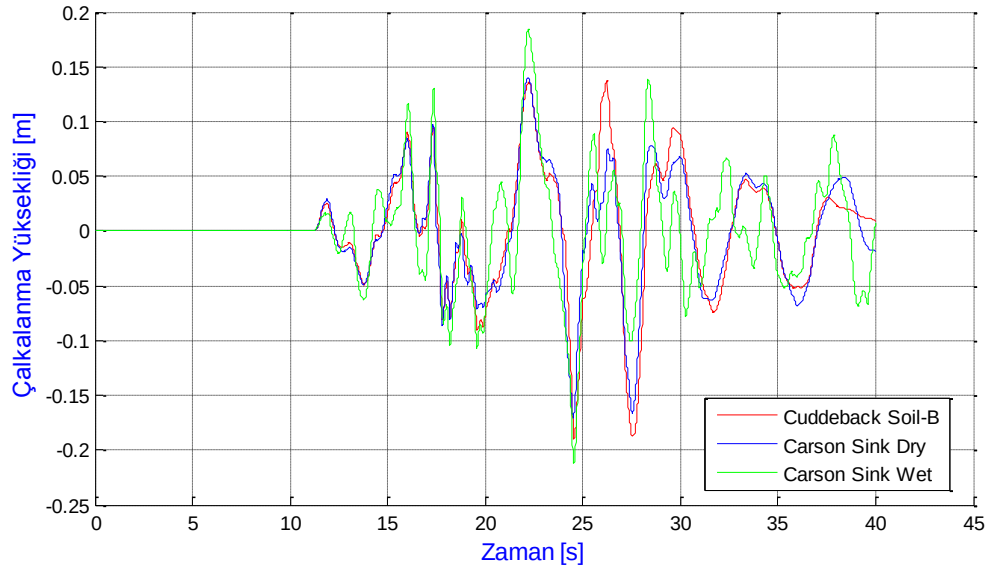
Silindirik tankta serbest sıvı yüzeyindeki çalkalanma yüksekliği değişimi Deprem-1 yer hareketi altında Şekil 4.10'da, Deprem-2 yer hareketi altında Şekil 4.11'de ve Deprem-3 yer hareketi altında Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.10: Deprem-1 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.11: Deprem-2 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.12: Deprem-3 yer hareketi altında serbest sıvı yüzeyi çalkalanma yüksekliğinin zamana bağlı değişimi.

Silindirik tank içerisinde 3 farklı deprem yer hareketi altında farklı zemin tipleri için serbest sıvı yüzeyinde oluşan maksimum çalkalanma yükseklikleri için Tablo 4.4 hazırlanmıştır.

Tablo 4.4: Serbest sıvı yüzeyi maksimum çalkalanma yüksekliği (m).

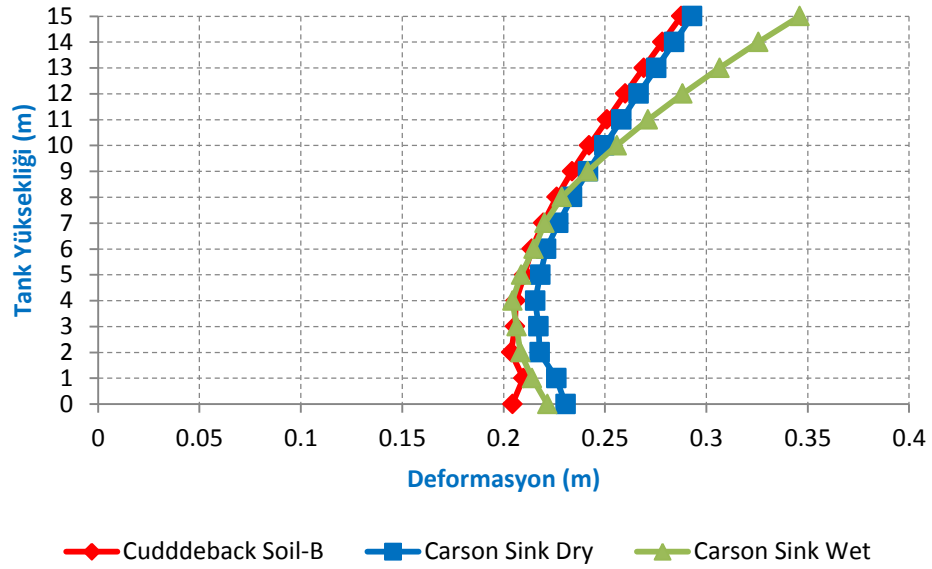
<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	0.25597	0.25927	0.3015
Deprem-2	0.23064	0.25798	0.41635
Deprem-3	0.18948	0.17109	0.2129

4.3. TANK ÇEPERİNDE OLUŞAN YATAY DEFORMASYONLAR

Tank sisteminde oluşan maksimum deformasyonların, farklı deprem yer hareketleri etkisi altında ve farklı zemin ortamlarındaki tank yüksekliği boyunca değişimi farklılık göstermektedir.

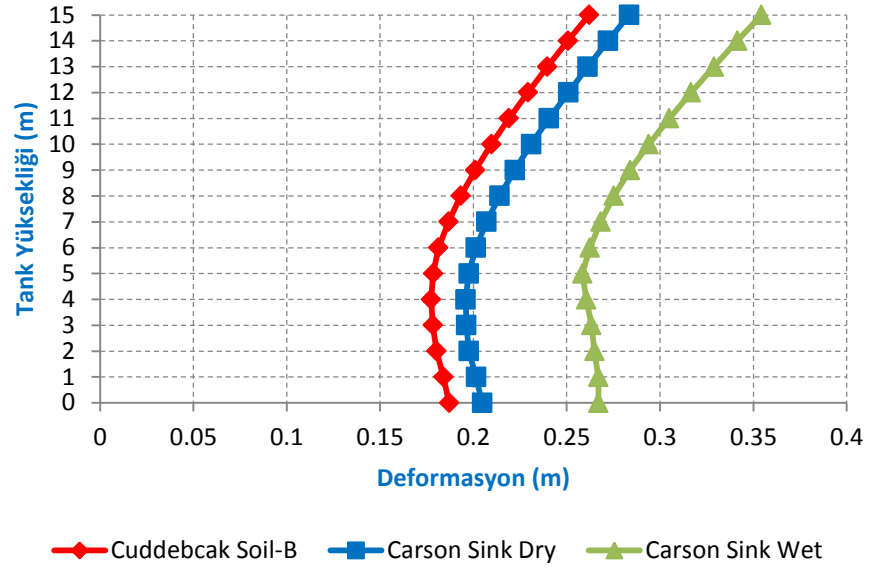
Deprem yer hareketinin x doğrultusundaki bileşeni diğer bileşenlerin maksimum ivme değerinden (PGA) büyük olduğundan tank çeperinde x doğrultusunda oluşan yatay deformasyonlar tasarım açısından daha fazla önem teşkil etmektedir.

Tank sisteminde Deprem-1 yer hareketi altında x doğrultusunda oluşan maksimum yatay deformasyonların tank yüksekliği boyunca değişimi farklı zemin tipleri için Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



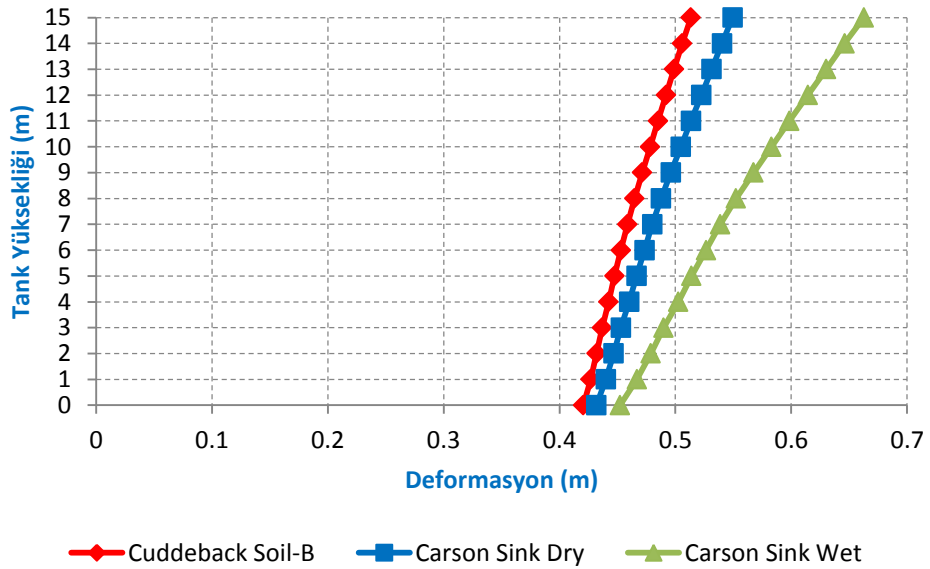
Şekil 4.13: Deprem1- yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.

Tank sisteminde Deprem-2 yer hareketi altında x doğrultusunda oluşan maksimum yatay deformasyonların tank yüksekliği boyunca değişimi farklı zemin tipleri için Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14: Deprem-2 yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.

Tank sisteminde Deprem-3 yer hareketi altında x doğrultusunda oluşan maksimum yatay deformasyonların tank yüksekliği boyunca değişimi farklı zemin tipleri için Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15: Deprem-3 yer hareketi altında tankta oluşan yatay deformasyonların yüksekliğe bağlı olarak değişimi.

Tank çeperinde x doğrultusunda tank yüksekliği boyunca oluşan maksimum deformasyon tank tavanında gözlenmektedir. Farklı zemin tiplerinin tank tavanında oluşan maksimum deformasyona olan etkisinin değerlendirilmesi için Tablo 4.5 hazırlanmıştır.

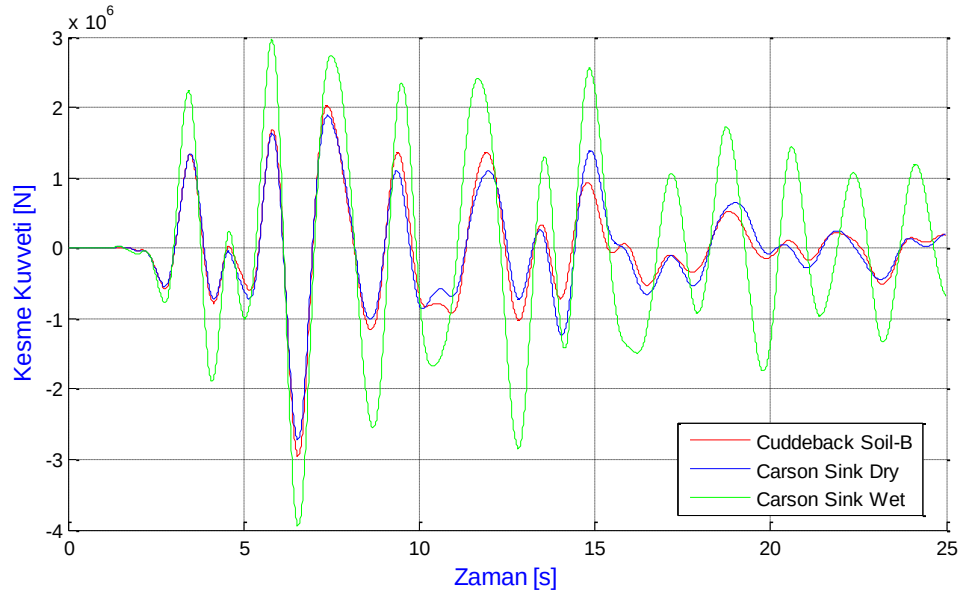
Tablo 4.5: Tank tavanında oluşan maksimum deformasyonlar (m).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	0.2876	0.2929	0.3460
Deprem-2	0.2619	0.2834	0.3543
Deprem-3	0.5133	0.5494	0.6627

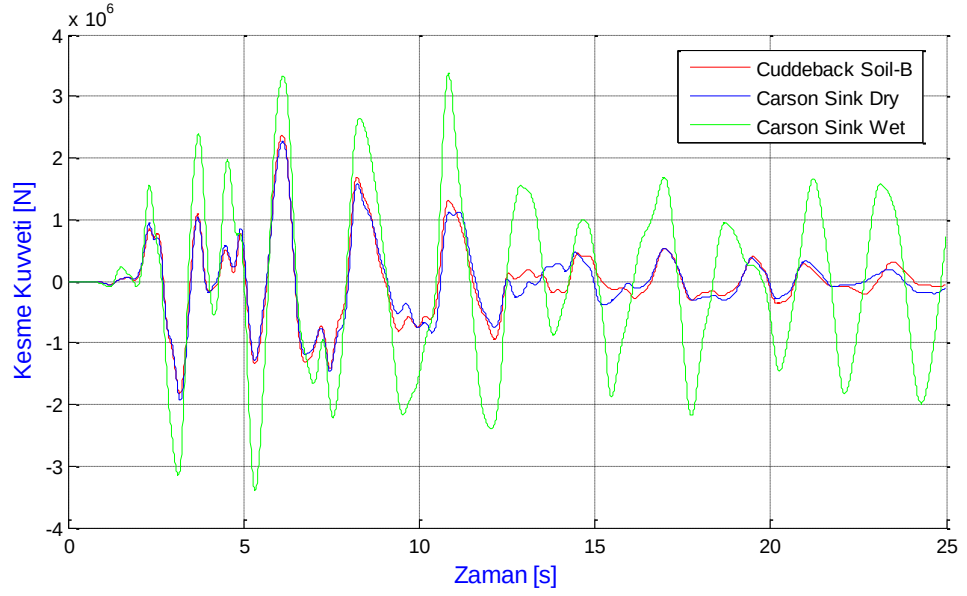
4.4. TANK TABANINDA OLUŞAN KESME KUVVETİ

Silindirik tank tasarımı gözönüne alınması gereken parametreler içerisinde kesme kuvveti önemli bir yer tutmaktadır. Tank sistemi tabanında oluşan kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanında değerlendirilmesi, farklı deprem yer hareketleri etkisi altında ve farklı zemin ortamları için gereklidir.

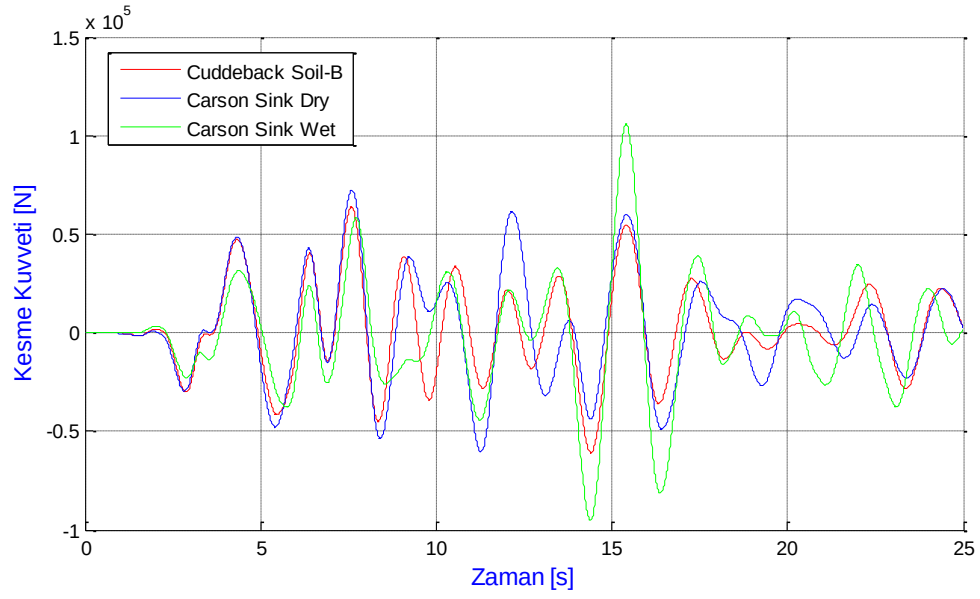
Tank tabanında Deprem-1 yer hareketi altında oluşan kesme kuvvetleri x doğrultusunda Şekil 4.16'de, y doğrultusunda Şekil 4.17'de ve z doğrultusunda Şekil 4.18'te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.16: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

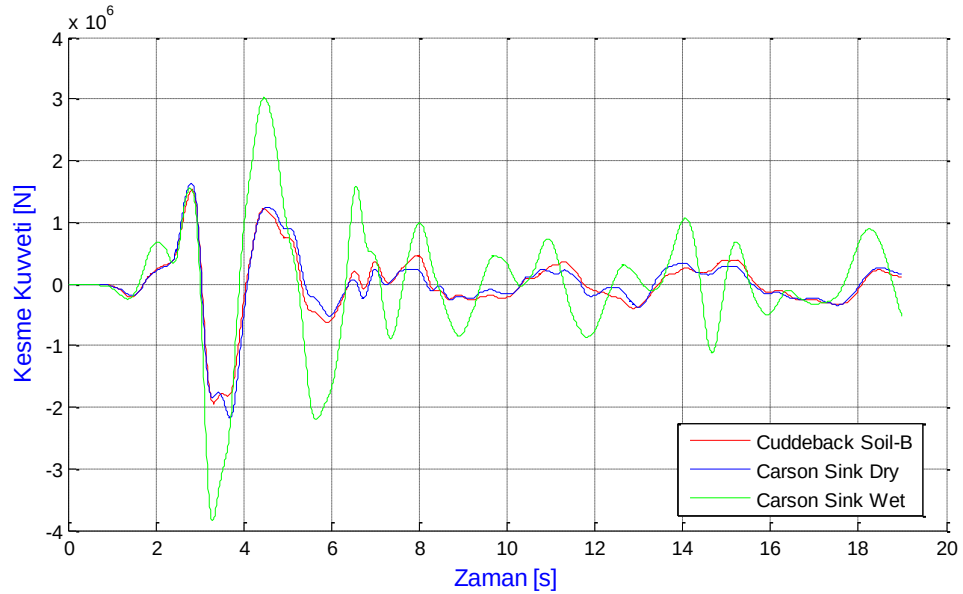


Şekil 4.17: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

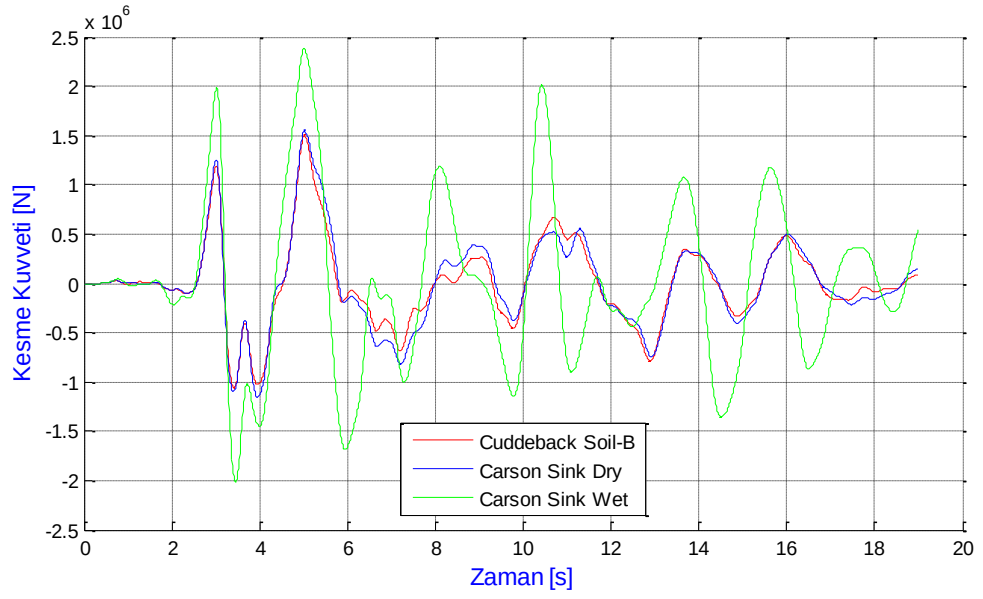


Şekil 4.18: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

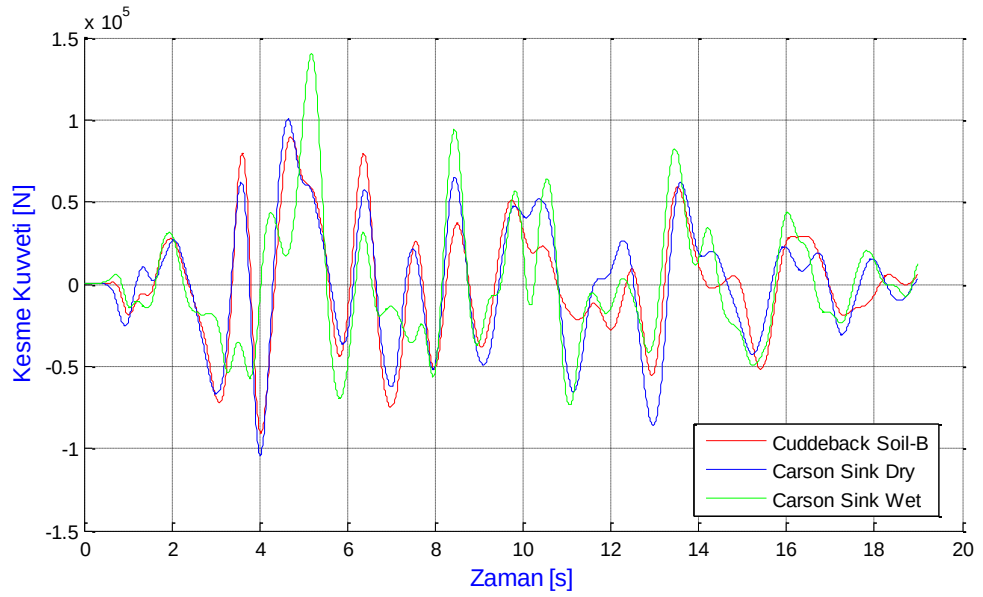
Tank tabanında Deprem-2 yer hareketi altında oluşan kesme kuvvetleri x doğrultusunda Şekil 4.19’de, y doğrultusunda Şekil 4.20’de ve z doğrultusunda Şekil 4.21’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.19: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

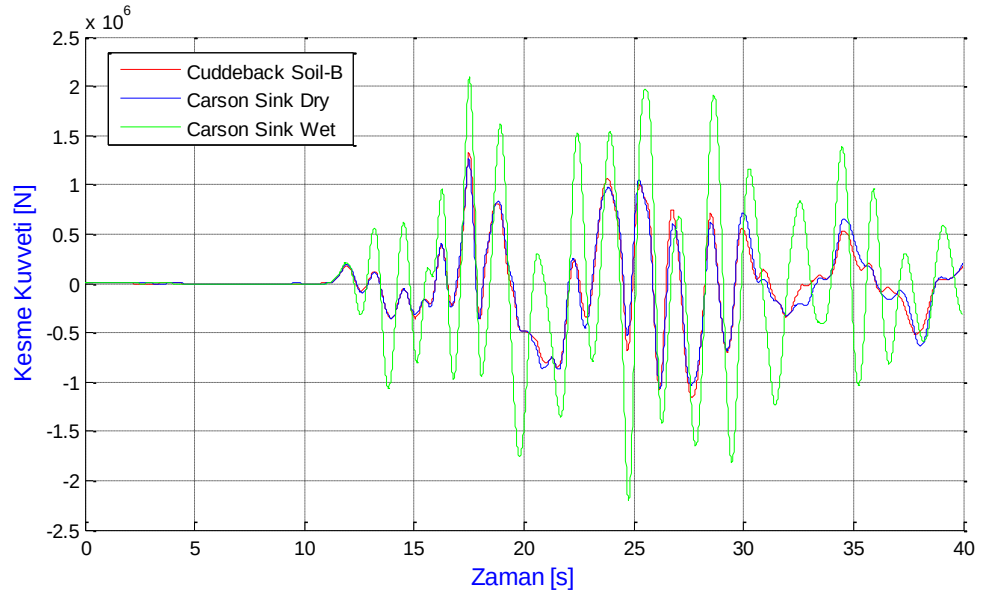


Şekil 4.20: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

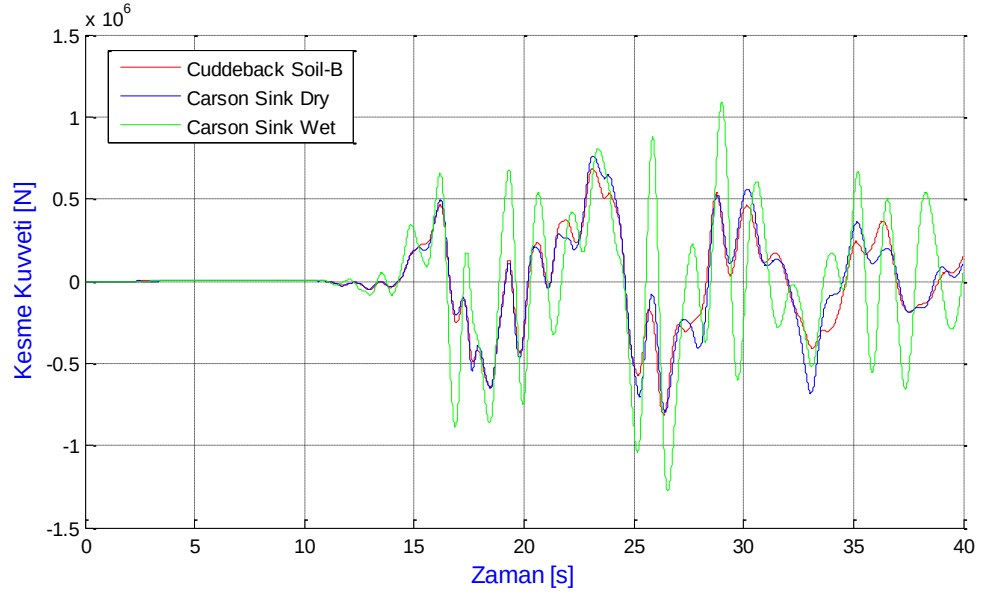


Şekil 4.21: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

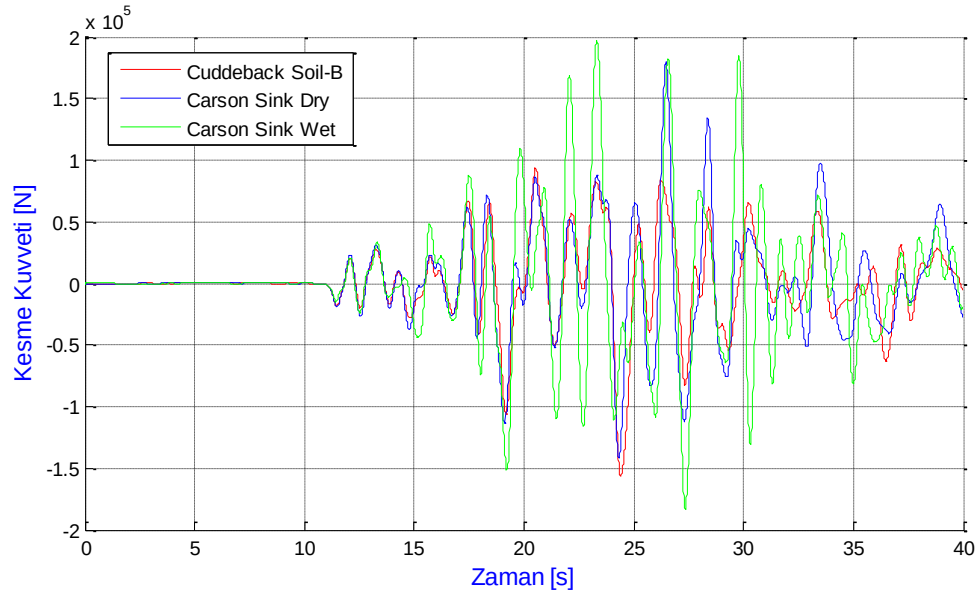
Tank tabanında Deprem-3 yer hareketi altında oluşan kesme kuvvetleri x doğrultusunda Şekil 4.22’de, y doğrultusunda Şekil 4.23’de ve z doğrultusunda Şekil 4.24’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.22: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.23: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.24: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetinin zamana bağlı değişimi.

Üç farklı deprem yer hareketi altında farklı zemin tipleri için tank tabanında x, y ve z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimleri incelendi. Zemin tiplerinin kesme kuvvetlerine olan etkisini daha iyi görebilmek için maksimum değerler karşılaştırılmalıdır. Silindirik tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvveti x doğrultusu için Tablo 4.6’de, y doğrultusu için Tablo 4.7’de ve z doğrultusu için Tablo 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.6: Tank tabanında x doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	2.9534e+06	2.7246e+06	3.9517e+06
Deprem-2	1.9397e+06	2.1699e+06	3.8461e+06
Deprem-3	1.3300e+06	1.2708e+06	2.2031e+06

Tablo 4.7: Tank tabanında y doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	2.3802e+06	2.2698e+06	3.3928e+06
Deprem-2	1.5065e+06	1.5511e+06	2.3832e+06
Deprem-3	8.1451e+05	7.9695e+05	1.2779e+06

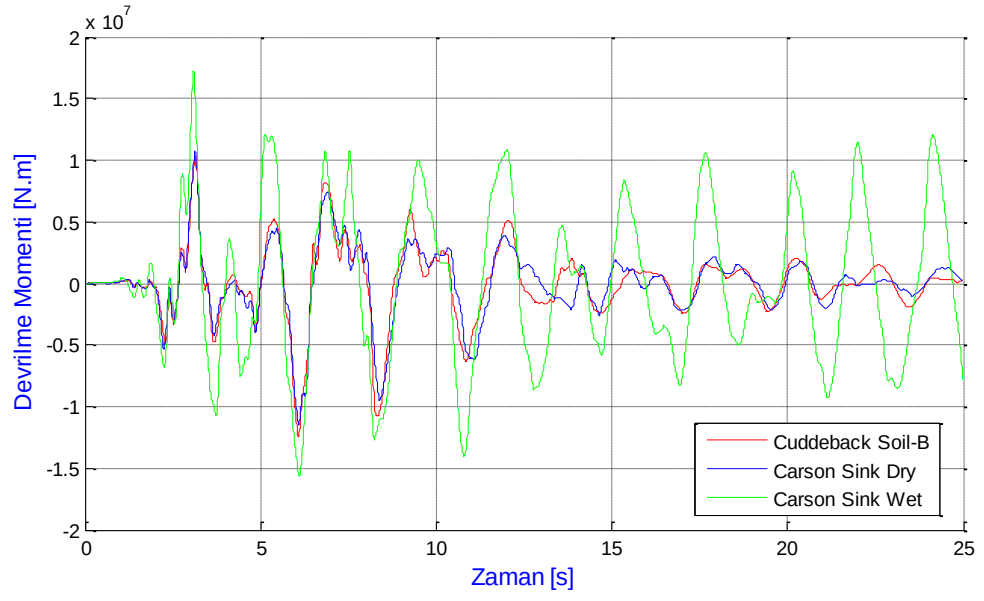
Tablo 4.8: Tank tabanında z doğrultusunda oluşan maksimum kesme kuvveti (N).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	6.3711e+04	7.2201e+04	1.0563e+05
Deprem-2	9.1058e+04	1.0417e+05	1.4005e+05
Deprem-3	1.5638e+05	1.7923e+05	1.9670e+05

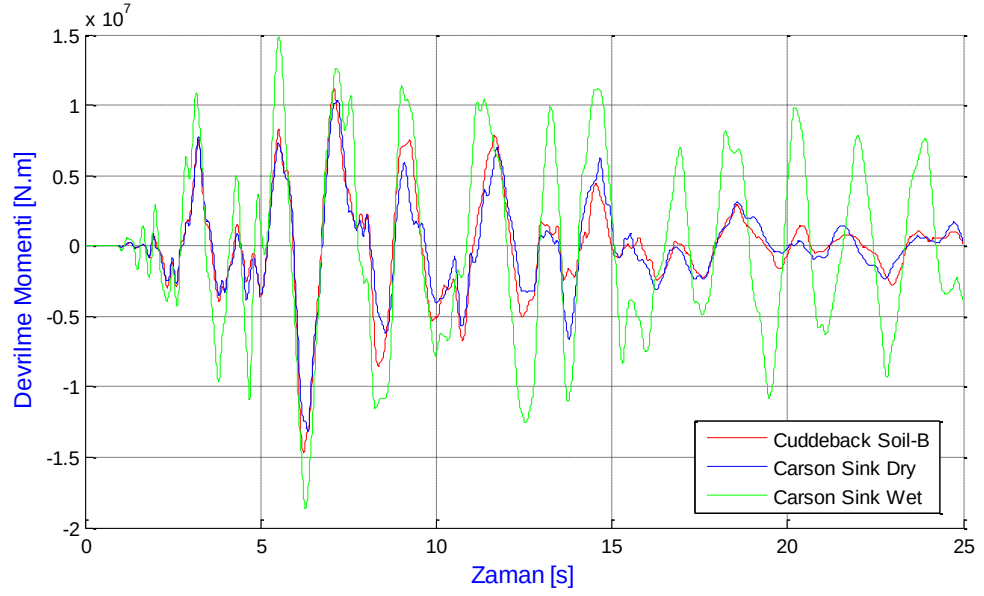
4.5. TANK TABANINDA OLUŞAN DEVRİLME MOMENTİ

Tank sistemi tabanında oluşan devrilme momentlerinin zaman tanım alanında değerlendirilmesi, farklı deprem yer hareketleri etkisi altında ve farklı zemin ortamları için gereklidir.

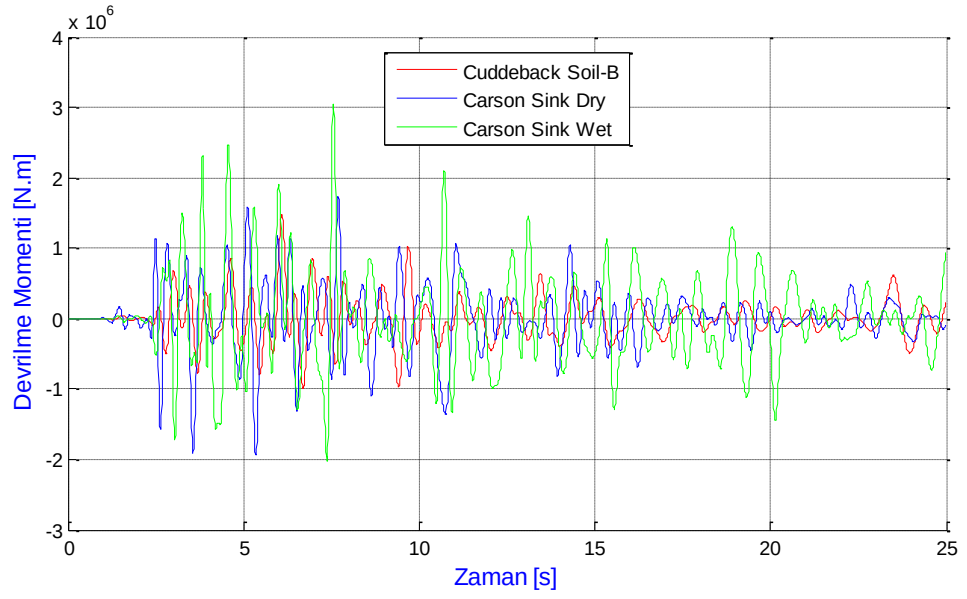
Tank tabanında Deprem-1 yer hareketi altında oluşan devrilme momentleri x ekseninde Şekil 4.25’de, y ekseninde Şekil 4.26’de ve z ekseninde Şekil 4.27’de farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.25: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında x ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

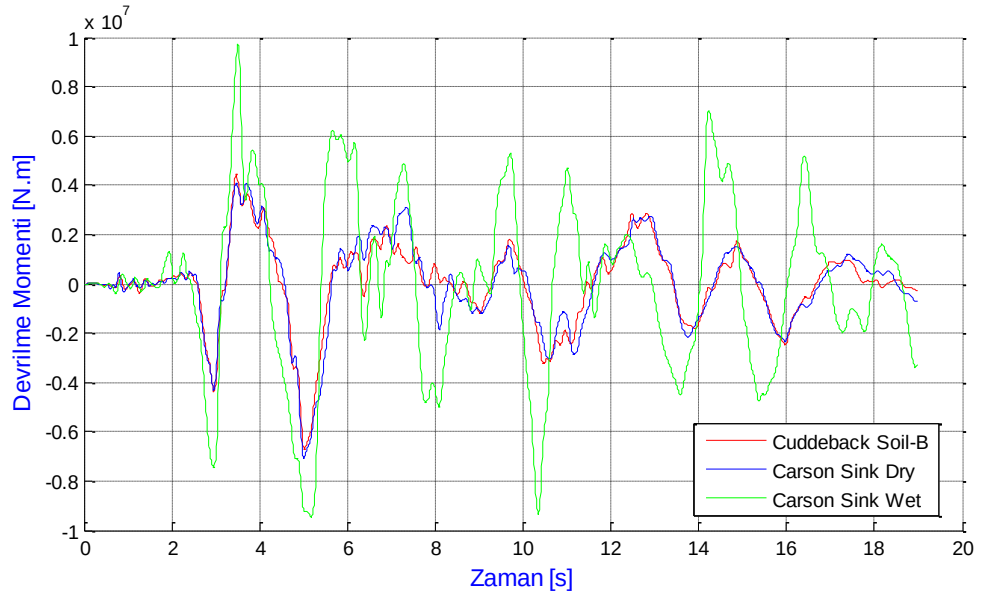


Şekil 4.26: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında y ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

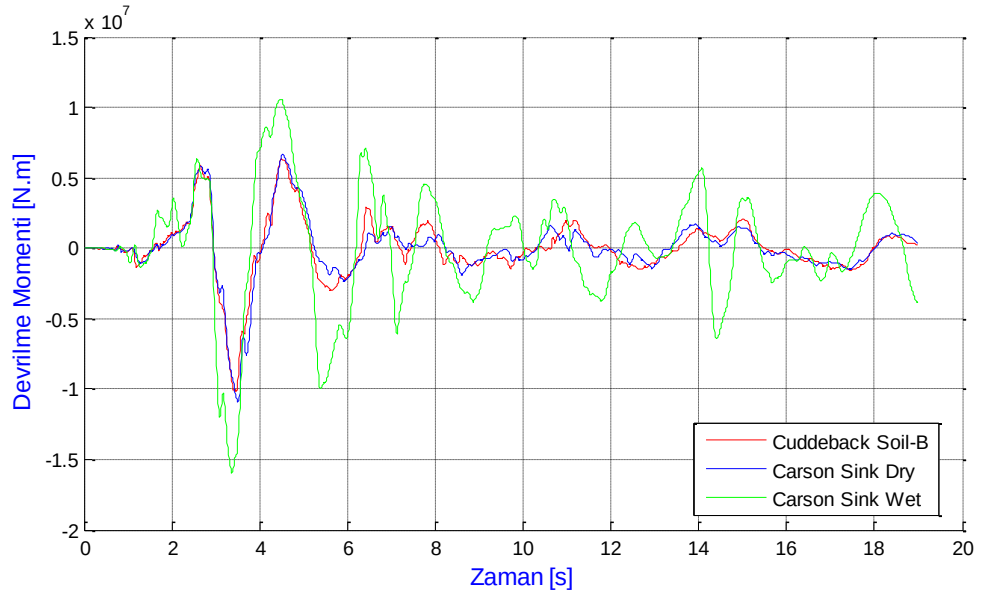


Şekil 4.27: Deprem-1 yer hareketi altında tank tabanında z eksenini etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

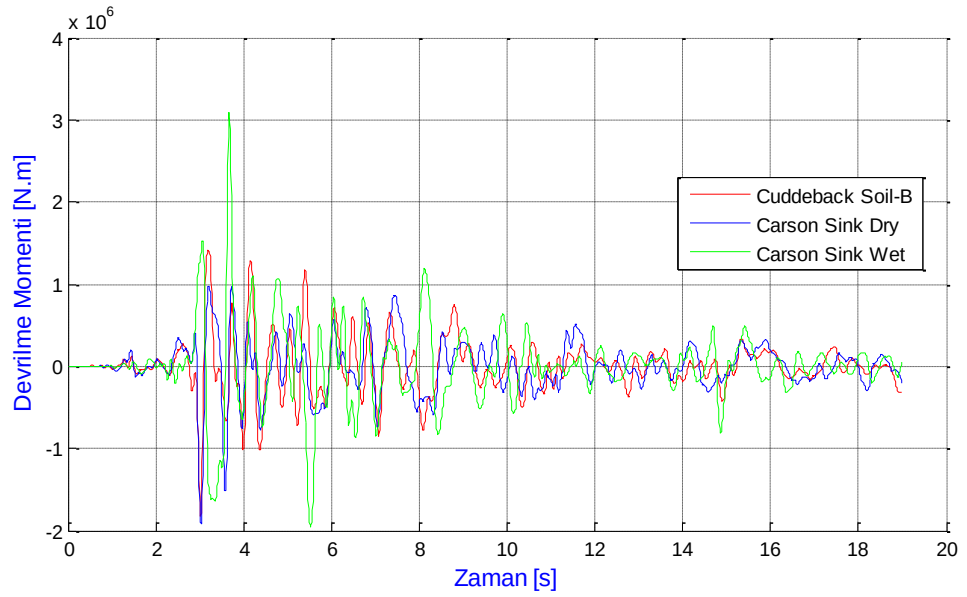
Tank tabanında Deprem-2 yer hareketi altında oluşan devrilme momentleri x eksenini etrafında Şekil 4.28’de, y eksenini etrafında Şekil 4.29’de ve z eksenini etrafında Şekil 4.30’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.28: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında x eksenini etrafında oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

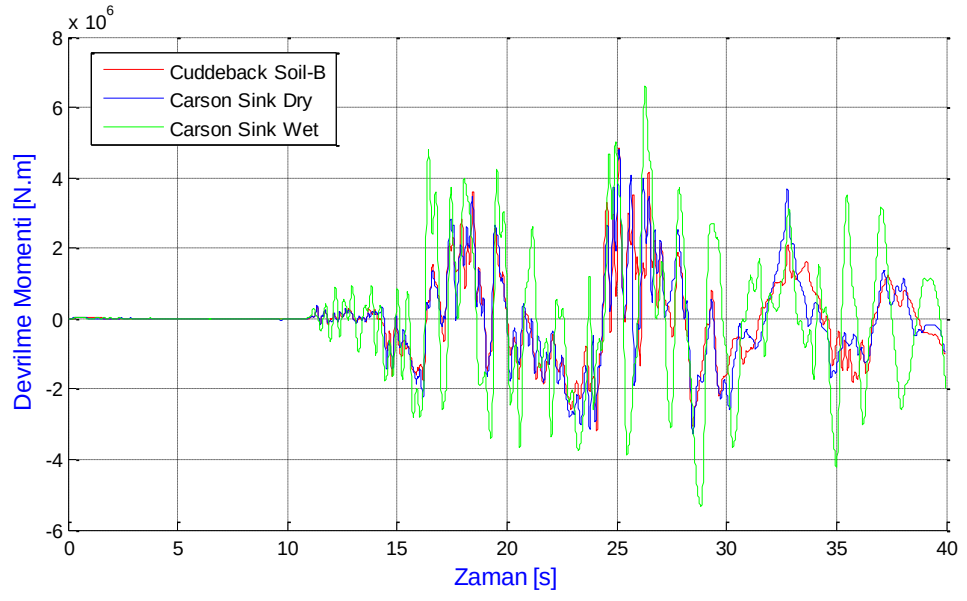


Şekil 4.29: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında y ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

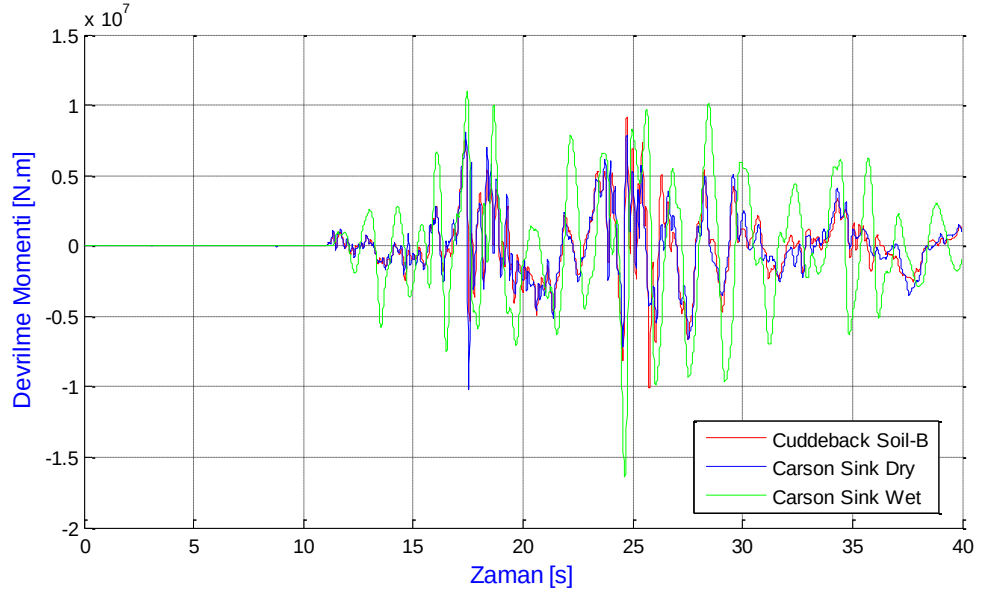


Şekil 4.30: Deprem-2 yer hareketi altında tank tabanında z ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

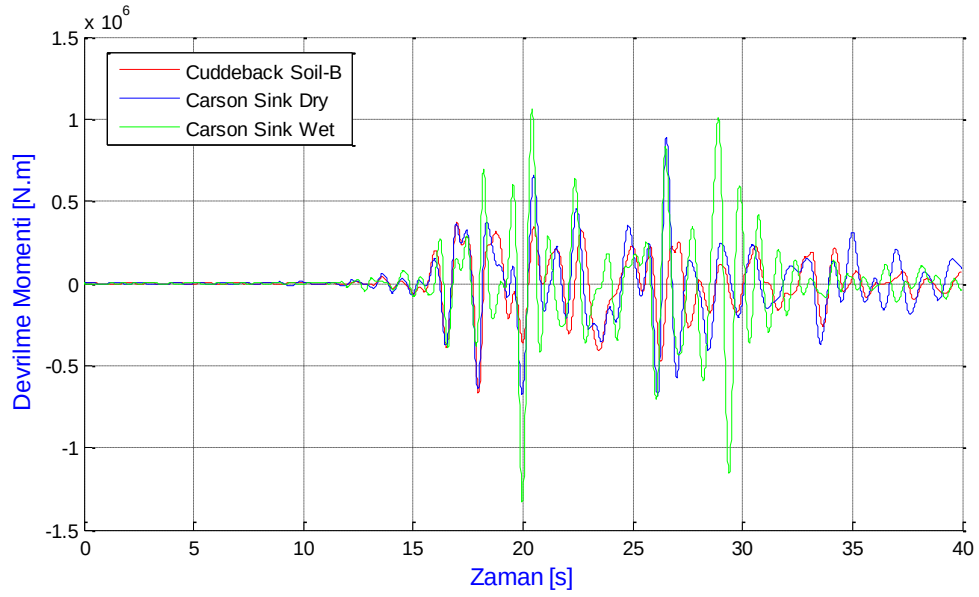
Tank tabanında Deprem-3 yer hareketi altında oluşan devrilme momentleri x ekseninde Şekil 4.31’de, y ekseninde Şekil 4.32’de ve z ekseninde Şekil 4.33’te farklı zemin tipleri için verilmiştir.



Şekil 4.31: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında x ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.32: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında y ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.33: Deprem-3 yer hareketi altında tank tabanında z ekseninde oluşan devrilme momentinin zamana bağlı değişimi.

Üç farklı deprem yer hareketi altında farklı zemin tipleri için tank tabanında x, y ve z eksenleri etrafında oluşan devrilme momentlerinin zamana bağlı değişimleri incelendi. Zemin tiplerinin devrilme momentlerine olan etkisini daha iyi görebilmek için maksimum değerler karşılaştırılmalıdır. Silindirik tank tabanında oluşan maksimum devrilme momenti x ekseninde Tablo 4.9’de, y ekseninde Tablo 4.10’de ve z ekseninde Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Tank tabanında x ekseninde etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	1.2513e+07	1.1485e+07	1.7265e+07
Deprem-2	6.7219e+06	7.0631e+06	9.7515e+06
Deprem-3	4.8232e+06	4.8027e+06	6.5967e+06

Tablo 4.10: Tank tabanında y eksenini etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	1.4694e+07	1.3186e+07	1.8705e+07
Deprem-2	1.0153e+07	1.0909e+07	1.5921e+07
Deprem-3	1.0071e+07	1.0198e+07	1.6412e+07

Tablo 4.11: Tank tabanında z eksenini etrafındaki maksimum devrilme momenti (N.m).

<i>Deprem/Zemin</i>	<i>Cuddeback Soil-B</i>	<i>Carson Sink Dry</i>	<i>Carson Sink Wet</i>
Deprem-1	1.4850e+06	1.9473e+06	3.0392e+06
Deprem-2	1.8180e+06	1.9251e+06	3.0877e+06
Deprem-3	6.7147e+05	8.9121e+05	1.3316e+06

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Sıvı ihtiva eden silindirik tanklar için oluşturulan üç boyutlu nümerik modellerin deprem yer hareketi altındaki zaman tanım alanında analiz sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Tercih edilen tank-sıvı-zemin etkileşimi nümerik yönteminin kontrolü ve zemin ortamı tarafından etkilenen deprem dalgalarının yapısal sistemde oluşturduğu tepkiler, farklı karakteristik özelliklere sahip zemin koşulları altında incelenmiştir. Son olarak genel bir değerlendirme yapılarak öneriler sunulmuştur.

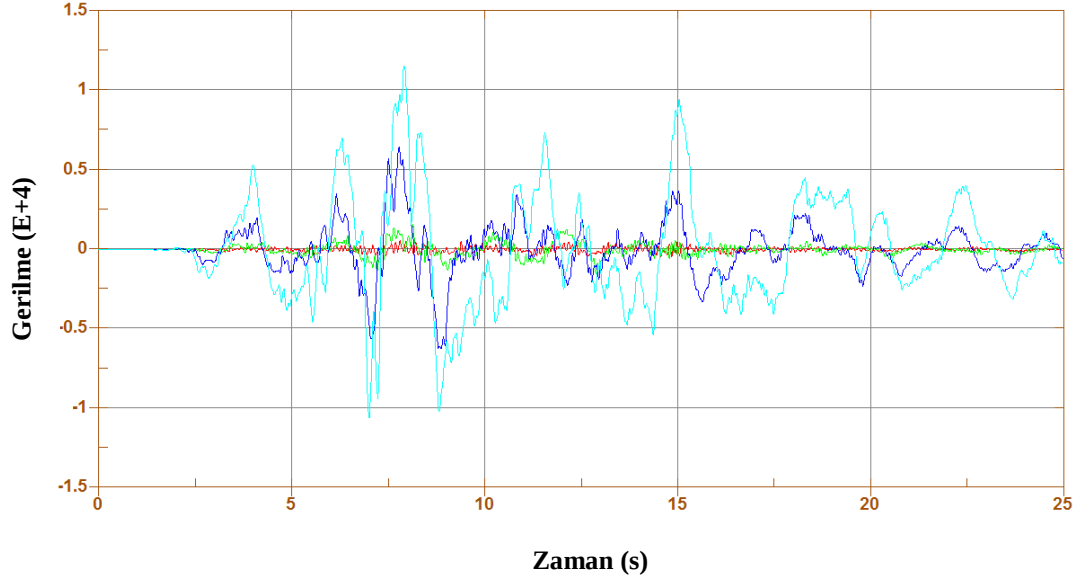
5.1. NÜMERİK YÖNTEMİN ÇALIŞMASI

Depreme dayanıklı yapılar tasarlamak ve mevcut yapıların deprem performansının değerlendirmek için ele alınan yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi için nümerik yaklaşımlar kullanmıştır.

Deprem hareketinin zemin tarafından değiştirilmesi, yapıya gelen titreşimleri de doğrudan etkilediğinden dolayı yer hareketinin nümerik analizde uygun bir şekilde modellenmelidir. Taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinden oluşan ve zemin ortamı tarafından değişikliğe uğratılarak yapıya ulaşırlar veya zemin ortamına geri dönebilirler. Yapı-zemin etkileşimi etkileşim çift taraflı olguyu yansıtırken zemin ortamında deprem dalgalarının dışa yayılmasını ve geri dönmesini engellenmesi için sınırsız alanlar (PML) tanımlanarak dalgaların sönümlenmesini sağlanmalıdır.

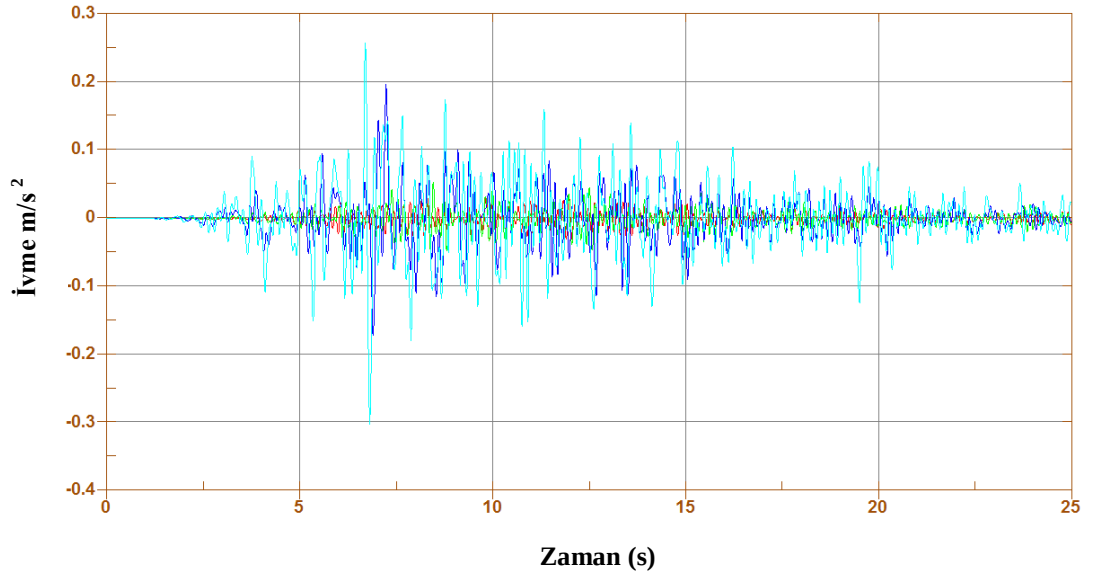
Taban kayasından tanımlanan deprem dalgalarının, yapı ve zemin ile sürekli olarak etkileşim halinde iken sınırsız alana ulaşan (saçılan) bu deprem dalgalarının sönümlenmesini, bu bölgedeki elemanlarda zaman tanım alanında oluşan gerilme ve ivme değişimleri ile kontrol edilebilir.

Örnek olarak seçilen silindirik tank-sıvı-zemin modelinde; Deprem-1 yer hareketi ve Cuddeback Soil-B zemin tipi kullanılmıştır. PML ortamına doğru yaklaştıkça zaman tanım alanında x doğrultusunda oluşan gerilmelerin sönümlenmesi (azalımı) Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Deprem-1 altında gerilmelerin PML tarafından sönümlenmesi.

Deprem-1 yer hareketinde maksimum yer ivmesi (PGA) x doğrultusundaki bileşeni diğerler bileşenlerinden görece olarak büyük olduğundan Şekil 5.2’de bu doğrultudaki ivmelerin PML ortamı tarafından sönümlenmesi gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Deprem-1 altında ivmelerin PML tarafından sönümlenmesi.

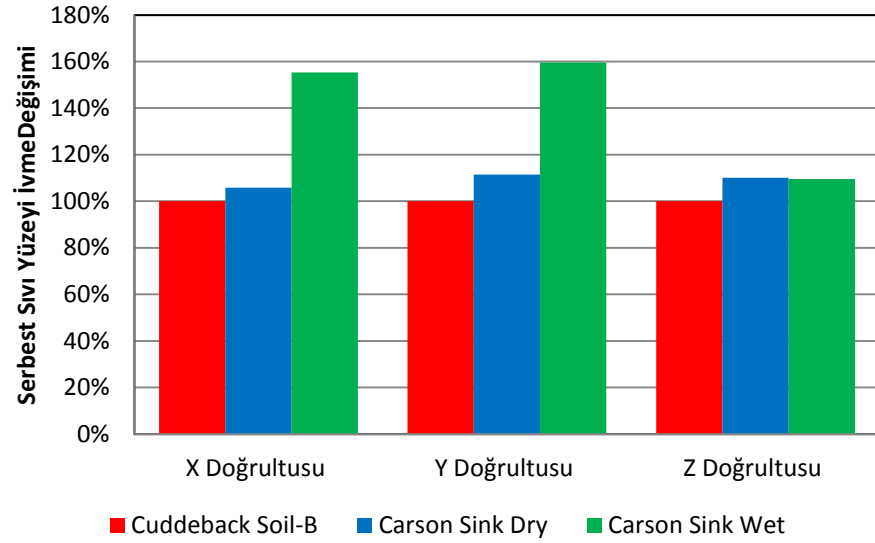
Nümerik analizlerde kullanılan diğer deprem yer hareketleri ve zemin modellerinde de benzer sonuçlara ulaşıldığından sonuçlara ulaşılmıştır.

Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde sıvı ihtiva eden tanklarda, yapı-zemin etkileşiminin modellenmesinin bu tez kapsamında kullanılan nümerik yöntemler ile deprem performanslarının değerlendirmesi yoktur. Bu bölümde elde edilen bilgiler ışığında yapı-zemin etkileşimi için LS-DYNA yazılımında kullanılan PML emici sınır koşullarının ve deprem yer hareketinin modellenmesi için geliştirilen etkili giriş yönteminin başarılı bir şekilde çalıştığı söylenebilir.

5.2. ZEMİN ETKİSİ

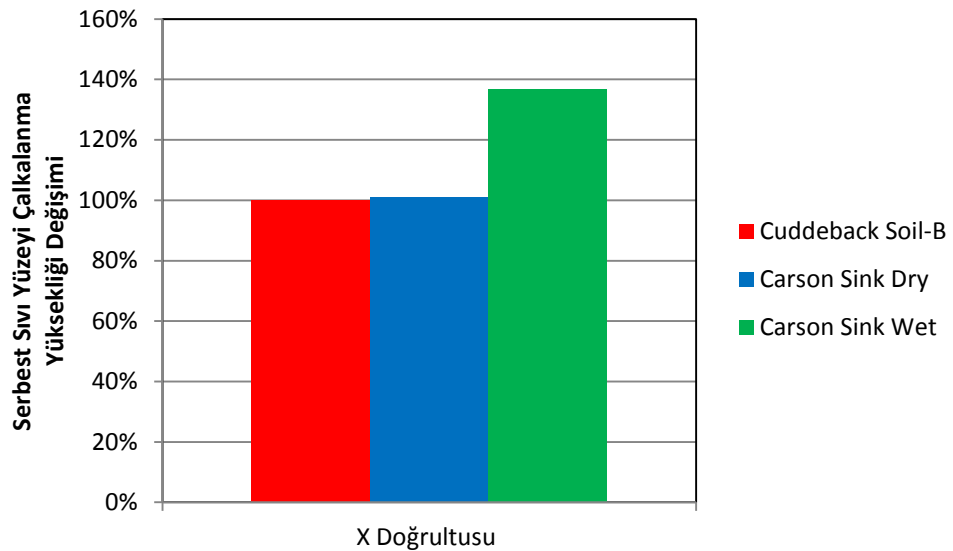
Zemin tank-sıvı sisteminde oluşan tepki (response) mekanizmalarına olan etkisinin zaman tanım analiz (time history) sonuçları ışığında bu bölümde incelenmiştir. Sıvı ihtiva eden üç boyutlu silindirik tank modelleri, yatay (x ve y) ve düşey (z) doğrultularında bileşenlere sahip deprem yer hareketleri altında (3 adet), Cuddeback Soil-B, Carson Sink Dry ve Carson Sink Wet zemin modelleri için analizleri gerçekleştirilmiştir. Cuddeback Soil-B zemin ortamının mekanik özelliklerine bakıldığında diğer zemin ortamlarına göre rijit davranış sergilediği kabul edilebilir. Tank sisteminde tepki mekanizmalarında oluşabilecek büyütme (amplifikasyon) veya azaltmalar (de-amplifikasyon) Cuddeback Soil-B rijit zemin modeline göre karşılaştırılabilir. Bu karşılaştırma ile diğer zemin modellerinin etkisinin rijit zemin modeline göre ne kadar değişiklik gösterdiği yüzde olarak elde edilebilir. Bu işlemlerin her bir deprem yer hareketi için uygulanmasının ardından ulaşılan sonuçları ortalaması alınabilir. Böylece tank-sıvı sisteminde oluşan tepki mekanizmalarına zemin modelinin ne kadar etki ettiği (amplifikasyon veya de-amplifikasyon) belirlenmiş olur. Kullanılan deprem yer hareketi sayısı ne kadar fazla olursa sonuçların doğruluğu aynı oranda gerçekçi olacaktır. Burada tank-sıvı sisteminde oluşan mekanizmaları; serbest sıvı yüzeyinde oluşan maksimum ivmeler ve çalkalanma yüksekliği, tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvveti ve devrilme momenti, tank çeperinde oluşan yatay deformasyonlar olarak sayabiliriz.

Şekil 5.3’de zemin ortamının, serbest sıvı yüzeyinde x,y ve z doğrultusunda oluşan maksimum ivmelere etkisinin değerlendirilmesi verilmiştir. Yumuşak zemin özellikleri gösteren Carson Sink Wet zemin modelinin, x doğrultusunda oluşan ivmeleri %55, y doğrultusunda oluşan ivmeleri %60 oranında büyüttüğü (amplifikasyon) gözlemlenmiştir.



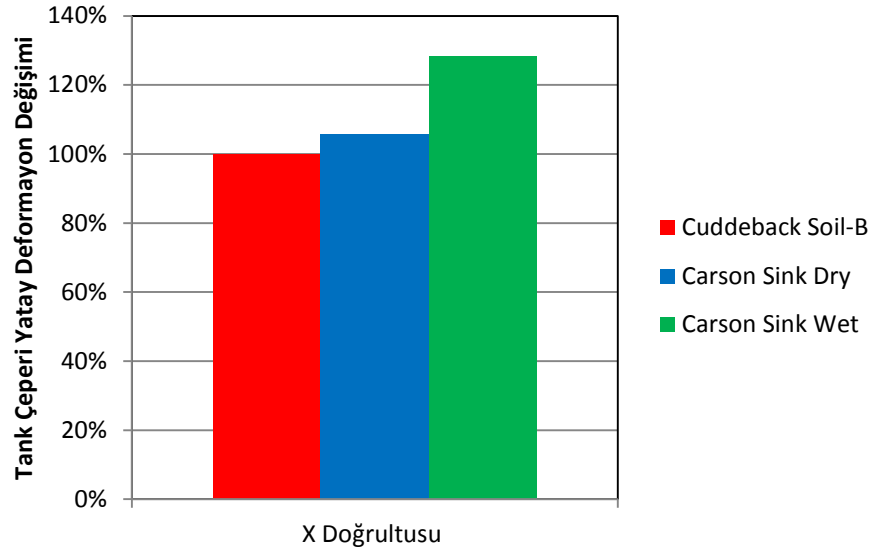
Şekil 5.3: Sıvı serbest yüzeyi oluşan maksimum ivmeleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.

Şekil 5.4’de zemin ortamının, serbest sıvı yüzeyinde oluşan maksimum çalkalanma yüksekliğine etkisinin değerlendirilmesi verilmiştir. Yumuşak zemin özellikleri gösteren Carson Sink Wet zemin modelinin çalkalanma yüksekliğini %40 oranının da büyüttüğü, Carson Sink Dry zemin modelinde etkinin olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4: Sıvı serbest yüzeyi oluşan maksimum çalkalanma yükseklikleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.

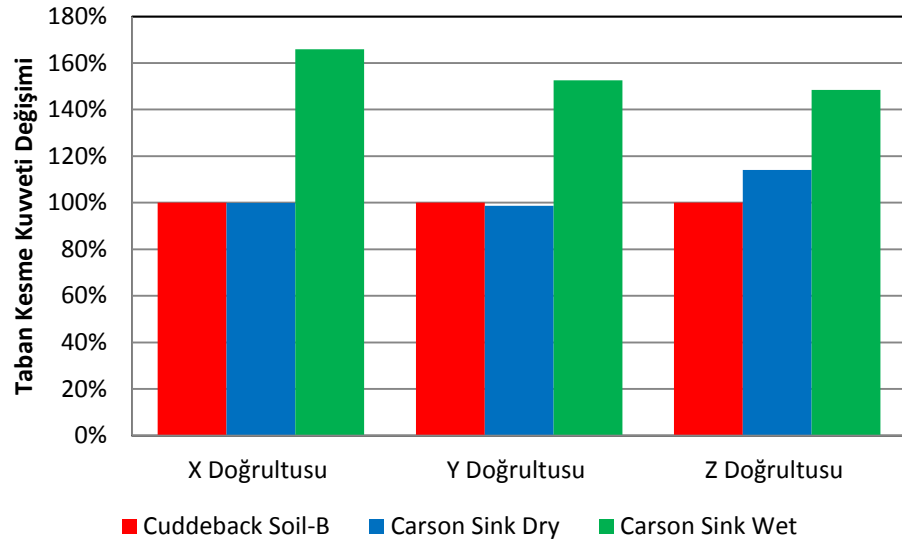
Şekil 5.5’de zemin ortamının tank çeperinde oluşan maksimum deformasyonlara etkisinin değerlendirilmesi verilmiştir. Yumuşak zemin özellikleri gösteren Carson Sink Wet zemin modelinin, x doğrultusunda oluşan maksimum deformasyonları %25 oranında büyüttüğü (amplifikasyon) gözlemlenmiştir.



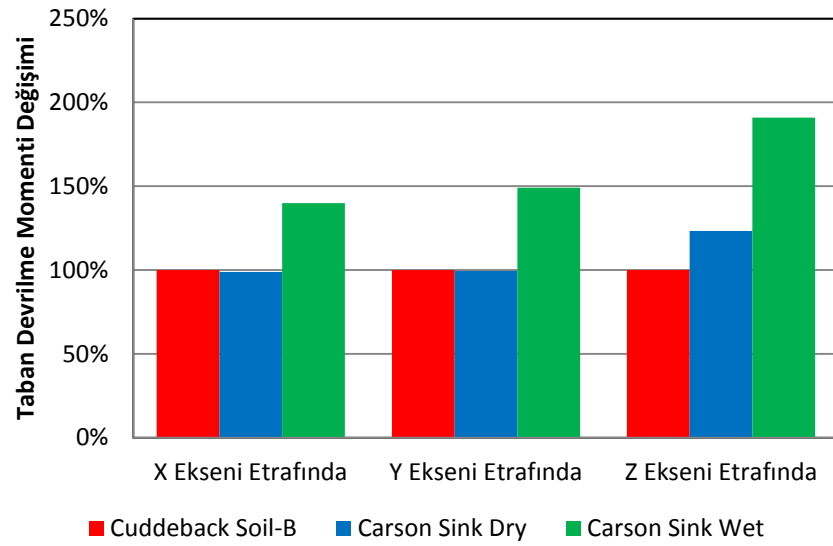
Şekil 5.5: Tank çeperinde oluşan maksimum deformasyonlar için zemin etkisinin değerlendirilmesi.

Şekil 5.6’da zemin ortamının, tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetine olan etkisinin değerlendirilmesi verilmiştir. Yumuşak zemin özellikleri gösteren Carson Sink Wet zemin modelinin, x doğrultusunda oluşan kesme kuvvetlerini %60, y doğrultusunda oluşan kesme kuvvetlerini %50 ve z doğrultusunda oluşan kesme kuvvetlerini %45 oranında büyüttüğü (amplifikasyon) gözlemlenmiştir. Carson Sink Dry zemin modeli için taban kesme kuvveti açısından etkisinin olduğu söylenemez.

Şekil 5.7’de zemin ortamının, tank tabanında oluşan maksimum devrilme momentine olan etkisinin değerlendirilmesi verilmiştir. Yumuşak zemin özellikleri gösteren Carson Sink Wet zemin modelinin, x doğrultusunda oluşan devrilme momentlerini %65, y doğrultusunda oluşan devrilme momentlerini %50 ve z doğrultusunda oluşan burulma momentlerini %45 oranında büyüttüğü (amplifikasyon) gözlemlenmiştir. Carson Sink Dry zemin modeli için sadece burulma momentlerinde %30 büyütme yapıldığı söylenebilir.



Şekil 5.6: Tank tabanında oluşan maksimum kesme kuvvetleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.



Şekil 5.7: Tank tabanında oluşan maksimum devrilme momentleri için zemin etkisinin değerlendirilmesi.

5.3. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında tank-sıvı-zemin sistemin bütün davranış mekanizmaları göz önüne alınarak deprem performansları değerlendirilmiştir. Katı-sıvı-zemin etkileşim problemlerinin çözümü için tüm nonlinear etkileri gözönüne sonlu elemanları yönteminin algoritmalarını kullanan LS-DYNA yazılımı tercih edilmiştir. Tank-sıvı-zemin etkileşimi çözüm yöntemleri hakkında araştırmalar yapılarak en uygun olan yaklaşımın nümerik yöntemler olduğu tespit edilmiştir.

Tank sisteminin deprem performanslarının belirlenmesi için global x, y ve z doğrultusunda bileşenlere sahip deprem yer hareketleri altında, farklı zemin ortamları için zaman tanım alanında nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Tank-sıvı-zemin etkileşiminde kullanılan nümerik yöntemin geçerliliği kontrol edilmiştir. Ardından farklı nümerik modellerde zemin ortamının tank-sıvı sistemi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu tez kapsamında yapı-zemin etkileşimi için, zemin ortamının, üstyapının bir arada gözönüne alındığı ortak bir model olarak tanımlanmıştır (Direkt Çözüm Yöntemi). Taban kayasında deprem yer hareketi tanımlanarak oluşan dalgaların, zemin ortamı tarafından değişikliğe uğratılarak yapıya ulaşması veya zemin ortamına geri dönmesi gözönüne alan yöntemler kullanılmıştır (PML teorisi). Bu çözüm yönteminde tank-sıvı-zemin nümerik modelinin oluşturulması ve zaman tanım alanında analizi oldukça uzun sürmektedir. Alternatif çözüm olarak ise Altsistem Çözüm Yöntemi kullanılabilir.

Tank-sıvı-yapı etkileşiminin deprem performanslarının incelendiği bu tez kapsamında tank-sıvı sistemine zemin tabakalarının etkisini araştırmak için kullanılan zemin örnekleri, ülkemizde bu konuda yeterli çalışmalar henüz yapılmadığından, güvenilirliği açısından yurt dışında yapılan çalışmalardan temin edilmiştir. Ülkemizde bulunan tank sistemlerinin deprem performanslarını zemin etkisini gözönüne alarak, tez kapsamında kullanılan yöntemler ile değerlendirebilmek için; tercih edilen yazılımdaki zemin modellerine uygun deneysel çalışmaların farklı bölge koşulları için yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

- API 650, 2005, Welded Steel Tanks for Oil Storage, *American Petroleum Institute Standard*, Washington D. C., Addendum 4, December.
- Aydinoğlu Nuray, 2012, *Zayıf Zeminlerde Yapılan Binalarda Deprem Etkisi Altında Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, 12 Nisan.
- Bauer, HF, 1964, Fluid Oscillations in The Containers of A Space Vehicle and Their Influence Upon Stability, *Report NASA*, TR R-187.
- U. Basu and A. K. Chopra, 2003, Perfectly Matched Layers for Time-Harmonic Elastodynamics of Unbounded Domains: Theory and Finite-Element Implementation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(11–12):1337–1375.
- U. Basu and A. K. Chopra, 2004, Perfectly Matched Layers for Transient Elastodynamics of Unbounded Domains, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 59(8):1039–1074, Erratum: Ibid. 61(1):156–157.
- U. Basu, 2009, Explicit Finite Element Perfectly Matched Layer for Transient Three-Dimensional Elastic Waves, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 77(2):151–176.
- Bielak J, 1994, Seismic Response of Two-Dimensional Sediment-Filled Valleys to Oblique Incident SV-Waves Calculated by The Finite Element Method, *Proceeding of the 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago, Illinois, July 10–14.
- Borja, I.R., Chao, Y.H., Monta, J.F, Lin, H.C., 1999, SSI Effects on ground motion at Lotung LSST Site, *Journey of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, 760-770.
- Chao, Y.H, 1996, *Nonlinear Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis and Application to Lotung Problem*, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Do, I., Day J., 2012, Overview of ALE Method in LS-DYNA, LS-DYNA ALE & Fluid-Structure Interaction Modelling Conference, June 3-5 2012.
- EUROCODE 8, Design of Structures for Earthquake Resistance, Part 4-Silos, Tanks and Pipelines, *European Committee for Standardization*, Brussels, BS EN 1998-4: 2006, (2006).

- Fahjan, Y., Özdemir Z., Souli M., Akgül K., 2014, Dalgakıran Plakalı Sıvı İhtiva Eden Ankrajlı ve Ankrajsız Çelik Tankların Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi, *TÜBİTAK Projesi*, Proje No:11M382.
- FEMA 368, 2001, The 2001 NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures Part 1: Provisions, NEHRP, Washington DC.
- HAROUN, M. A., Housner, G. W., 1981, Seismic Design of Liquid Storage Tanks, *Journal of the Technical Councils of ASCE*, Vol. 107, No. TC1, April 1981.
- Housner, G.W., 1954, Earthquake Pressures on Fluid Containers, *The Eighth Technical Report under Office of Naval Research*, California Institute of Technology Pasadena, California, August.
- HOUSNER, G. W., Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, 1, January, (1957), pp. 15-35.
- HOUSNER, G.W., The Dynamic Behaviour of Water Tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53, 2, February, (1963), pp. 381-387.
- Kramer, S.L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 653 s.
- Kolukula Sivra Srinivas., 2010, *Transfinite Interpolation- Mesh Plate with Hole*, <https://sites.google.com/site/kolukulasivasrinivas/>, [Ziyaret tarihi: 4 Kasım 2014].
- Livaoğlu, R., 2005, *Ayaklı Depoların Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşimleri Dikkate Alınarak Deprem Davranışlarının Değerlendirilmesi*, Doktora, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- LS-DYNA R7.0, 2013, Keyword User's Manual Volume I, *Livermore Software Technology Corporation*, Livermore, California.
- LS-DYNA R7.0, 2013, Keyword User's Manual Volume II (Material Models), *Livermore Software Technology Corporation*, Livermore, California.
- LS-DYNA, 2013, *Soil-Structure Interaction-Scattering Analysis Earthquake Input*, http://www.lstc.com/applications/soil_structure, [Ziyaret tarihi: 4 Kasım 2014].
- M. G. Cremonini, P. Christiano and J. Bielak ,May 1988, Implementation of effective seismic input for soil structure interaction systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 16(4):615–625.
- MALHOTRA, P. K., Wenk T., Weiland M., 2000, Simple Procedure of Seismic Analysis of Liquid Storage Tanks, *Structural Engineering International*, 197-201.

- NZSEE (New Zealand National Society for Earthquake Engineering), Seismic Design of Storage Tanks, 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, (1986).
- Okur V. and Ansal A., 2004, Stress-Strain Characteristics of Fine Grained Soils under Cyclic Loading, *International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, Germany.
- Ozdemir, Z., 2012, *Nonlinear Fluid-Structure Interaction for Multi-Dimensional Seismic Analyses Of Liquid Storage Tanks*, PhD Thesis , Bogazici University.
- Özener, P., 2010, *Dinamik Etkiler Altında Zemin Davranışı*, Zemin Mekaniği Ders Notları ,Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center,2006, PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- SOULI, M., Ouahsine, A., and Lewin, L., 2000, ALE Formulation for Fluid-Structure Interaction Problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190,pp. 659-675.
- SOULI, M., and Zolesio, J. P.,2001, Arbitrary Lagrangian-Eulerian and Free Surface Methods in Fluids Mechanics, *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191,pp. 451-466.
- Tönük G. ve Ansal A., 2007, Zeminin Doğrusal Olmayan Davranışına Vaka Analizleri ile Bakış ,*Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim, İstanbul.
- VELETOSOS A. S., 1984, Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks, in Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE, pp. 255-370 and pp. 443-460.
- Veletsos A.S., Prasad M.A., Tang Y. ,1988, Design Approaches for Soil Structure Interaction, *National Center for Earthquake Engineering Research*, Technical Report NCEER-88-00331.
- Vucetic M., 1994, Cyclic Threshold Shear Strains in Soils, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 120(GT12): 2208-2228
- Vucetic M. and Dobty R., 1991, Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 117(GT1): 89-107
- Yang J.Y, Veletsos A.S, 1977, Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics*, 1-24 May North Caroline, Proceedings of the Caroline

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Kayahan AKGÜL
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	26.04.1990 Eminönü, İSTANBUL
Telefon	0537 607 02 04
E-mail	kayahanakgul@gmail.com

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Lisans	İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü	2012
Lise	Kırımlı İsmail Rüştü Olcay Lisesi	2008