KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AYAKLI DEPOLARIN SIVI-YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMLERİ DİKKATE Alinarak deprem davranışlarının İncelenmesi

İnş. Yük. Müh. Ramazan LİVAOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce "Doktor" Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.02.2005Tezin Savunma Tarihi: 28.03.2005

Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Adem DOĞANGÜN
Jüri Üyesi	: Prof.Dr. Yusuf AYVAZ
Jüri Üyesi	: Doç.Dr. Hasan SOFUOĞLU
Jüri Üyesi	: Prof.Dr. Ahmet DURMUŞ
Jüri Üyesi	: Prof.Dr. Kadir GÜLER

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2005

ÖNSÖZ

"Ayaklı Depoların Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşimleri Dikkate Alınarak Deprem Davranışlarının İncelenmesi" adlı Doktora tez çalışmamın her aşamasında hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak, sıra dışı kişiliği ve akademisyenliği ile araştırmaya ışık tutan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Adem DOĞANGÜN'e, dört yıl önce gerçekleştirdiğim yüksek lisans çalışmasının sonunda olduğu gibi, bugün de aynı duygular içerisinde sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Başta tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Doç. Dr. Hasan SOFUOĞLU'na olmak üzere, değerli vakitlerini harcayıp tezimi inceleme nezaketini gösteren Sayın Prof.Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ ile Prof.Dr. Kadir GÜLER'e ve öğrenimim süresince bana emeği geçen tüm hocalarıma ve tüm çalışma arkadaşlarıma, ayrıca çalışmada gerçekleştirilen bazı modellerin çözümlemelerinde kullandığımız ANSYS programının koşturulmasındaki için sağladıkları imkanlardan ötürü Sayın Doç.Dr. Yusuf CELAYIR, ve University of Western Ontario'da bulunan Araş.Gör. Alper TURAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca fedakar, adilane tutumlarıyla bana teşvikkar, muafi ve anlayışlı bir şekilde desteklerini esirgemeyen dost ve tüm aile fertlerime minnettarlığımı belirtir, bu çalışmanın ülkemizin ve insanlığın yararına olmasını dilerim.

> Ramazan LİVAOĞLU Trabzon 2005

İÇİNDEKİLER

<u>Sayfa No</u>

İÇİNDEK	İLER	III
ÖZET		VI
SUMMAR	RY	VII
ŞEKİLLEI	R DİZİNİ	VIII
TABLOLA	AR DİZİNİ	XXI
SEMBOLI	LER DİZİNİ	XXIII
1.	GENEL BİLGİLER	1
1.1.	Sıvı Depoları	1
1.2.	Zeminlerin Özellik ve Davranışları	3
1.3.	Deprem Dalgaları	
1.4.	Literatür Araştırması	15
1.5.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR BULGULAR VE İRDELEME	
2.1.	Yapı-Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi	
2.1.1.	Yapı-Zemin Etkileşim Mekanizması	24
2.1.2.	Yapı-Zemin Etkileşimi Hesap Yöntemleri	
2.1.2.1.	Yapı-Temel-Zemin Sistemi Hareket Denklemlerinin Çözümlenmesi	40
2.1.2.2.	Değiştirme Yöntemleri	
2.1.2.2.1.	Veletsos Yaklaşımı	
2.1.2.2.2.	NEHRP 2001 Yaklaşımı	
2.1.2.3.	Alt Sistem Çözüm Yöntemleri	53
2.1.2.4.	Doğrudan Çözüm Yöntemleri	
2.1.2.4.1.	Kütlesiz Temel Yaklaşımı	

2.1.2.4.2.	Sonlu Eleman Modelleriyle Sanal Sınırların Kullanılması	. 69
2.1.3.	Zeminin Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranışı	. 73
2.2.	Depolar İçin Sıvı-Yapı Etkileşiminin Değerlendirilmesi	. 80
2.2.1.	Analitik Yaklaşımlar	. 82
2.2.1.1.	Tek Kütleli Sistem	. 82
2.2.1.2.	Çok Kütleli Sistem	. 84
2.2.1.2.1.	Housner'in İki Kütleli Sistem Yaklaşımı	. 86
2.2.1.2.2.	Bauer Çok Kütleli Sistem Yaklaşımı	. 87
2.2.1.2.3.	Eurocode 8'de Önerilen Çok Kütleli Sistem Yaklaşımı	. 88
2.2.2.	Sayısal Yöntemlerle Kullanılan Yaklaşımlar	. 91
2.2.2.1.	Kütle Ekleme Yaklaşımı	. 91
2.2.2.2.	Euler Yaklaşımı	. 94
2.2.2.3.	Langrange Yaklaşımı	. 96
2.3.	Depolar İçin Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi	. 99
2.4.	Oluşturulan Modeller ve Bunların Örnek Depolara Uygulanması	101
2.4.1.	Model-1: Sıvı İçin Tek Kütlenin, Zemin İçin İki Farklı Rijitliğin, Yapı İçin İ Mekanik Modelin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli	lse 103
2.4.2.	Model 2: Sıvı İçin Tek Kütlelinin Zemin İçin Frekans Bağımlı Rijitlik ve Sönümlerin Yapı İçin ise Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemir Modeli	1 113
2.4.3.	Model-3: Sıvı İçin İki Kütlenin, Zemin İçin İki Farklı Rijitliğin, Yapı İçin İs Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli	e 123
2.4.4.	Model-4: Sıvının Çok Kütleli Zeminin Frekans Bağımlı Rijitlik ve Sönümle Tanımlandığı Yapı İçin ise Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zem Modeli	rle 11n 136
2.4.5.	Model-5: Sıvı İçin Çok Kütleli Eklenmiş Kütle Yaklaşımının; Zemin İçin Statik Rijitliklerin Kullanıldığı Ayaklı Deponun Sıvı-Yapı-Zemin Modeli	149
2.4.6.	Model-6: Sıvı İçin Eklenmiş Kütle Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli	l 166
2.4.7.	Model-7: Sıvı İçin Sonlu Eleman Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının Kullanıldığı Ayaklı Depo Sıvı-Yapı-Zemin Modeli	180

2.4.8.	Model-8: Sıvı İçin Sonlu Eleman Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının ve Sanal Sınırların Kullanıldığı Sıvı-Yapı -Zemin Modeli 1	94
2.5.	Bulguların Genel Değerlendirilmesi	08
2.5.1.	Modellerin Sistem Davranışını Temsilinin Değerlendirilmesi	08
2.5.2.	Zeminin Sistem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi2	19
2.5.3.	Sıvının Sistem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi	23
2.5.4.	Taşıyıcı Sistem Etkilerinin Değerlendirilmesi 22	27
2.5.5.	Doğrusal Olmayan Davranış Etkilerinin Değerlendirilmesi	32
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	38
4.	KAYNAKLAR	44
5.	EKLER	64
EK-1 Model-1 İçın Geliştirilen Program Kodu		64
EK-2 Mode	el-2 İçin Geliştirilen Program Kodu20	67
EK-3 Mode	el-3 İçin Geliştirilen Program Kodu2	70
EK-4 Mode	el-4 İçin Geliştirilen Program Kodu2	72
Ek-5 Kulla	nılan Alt Program Kodları2	79
ÖZGEÇMİ	İŞ2	82

ÖZET

İşlevsel olarak birçok amaca hizmet edebilen depoların statik davranışlarının belirlenmesi yanında, dinamik davranışlarının belirlenmesi de önemli olmaktadır. Dinamik yükler etkisindeki ayaklı depolarda, birçok yapı sisteminden farklı olarak, yapısal kısmının sıvıyla ve zeminle olan etkileşimleri de depo davranışını belirlemede etkili olmaktadır. Dolayısıyla deprem gibi dinamik yükler etkisindeki ayaklı depoların davranışlarının belirlenebilmesi için etkileşim etkilerinin gerçekçi bir şekilde dikkate alınması gerekmektedir. Yapılan literatür araştırmalarında, ayaklı depolar için bu etkileşimlerin ve bunlar üzerinde etkili olan parametrelerin değişimleri hakkında oldukça kısıtlı çalışmaya rastlanmıştır.

Bu çalışmanın başlıca amacı, literatürde genel sıvı ve zemin etkileşimlerini dikkate almada kullanılan yaklaşımların ayaklı depolar için etkinliklerini irdelemek, bu sayede bunların depoların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini incelemek ve söz konusu etkileşimlerin pratik olarak nasıl dikkate alınabileceklerini uygulamaya sunmaktır.

Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma üç asıl ve bir ek bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, sıvı depoları, zeminlerin özellik ve davranışları, deprem dalgaları, literatür araştırması, çalışmanın amaç ve kapsamı gibi bilgiler sunulmaktadır. İkinci bölümde genel olarak yapı-zemin ve yapı-sıvı etkileşim problemleri için geliştirilen temel yaklaşımlar tanıtılmakta ve bunların ayaklı depolar için uygulanabilirlikleri değerlendirilmektedir. Bu yaklaşımlardan yararlanarak, ayaklı depolar için sıvı-depo-zemin etkileşimleri için sekiz farklı model oluşturulmakta ve bunlardan elde edilen bulgular karşılaştırılarak irdelenmektedir. Üçüncü bölüm sonuç ve öneriler bölümü olup bu bölümü kaynaklar listesi ve program listelerinin verildiği ek bölümü izlemektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada; zeminin, sıvının, taşıyıcı sistemin ve zeminin doğrusal olmayan davranışının deponun deprem davranışı üzerindeki etkileri ortaya konulmuş, etkileşimler için geliştirilen bazı analitik yaklaşımların, sayısal yaklaşımlar kadar gerçekçi sonuçlar üretebildikleri, bazı zemin sistemlerinin davranış üzerinde etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde kaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Ayaklı Depolar, Deprem Hesabı, Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşimi, Koni Modeli, Sanal Sınırlar, EC-8, FEMA, Langrange Yaklaşımı, Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranış.

SUMMARY

Investigation of the Earthquake Behavior of Elevated Tanks Considering Fluid-Structure-Soil Interactions

In addition to the determination of static behavior, determination of the dynamic behavior of tanks which used for many engineering fields is also important. Soil-structure and fluid-structure interactions that are not important for ordinary structures as to be for tanks are effective for estimation of dynamic behavior of elevated tanks subjected to dynamic loads. Thus it is necessary to consider the interaction effects correctly for elevated tanks subjected to dynamic loads like earthquake. It is seen from literature survey that very few studies have been carried out for elevated tanks considering interaction effects and related parameters.

The main purpose of this study is to evaluate effectiveness of general soil–structure and fluid-structure interaction approaches given in the literature for elevated tanks, thus to investigate the effects of these interactions on the dynamic behavior of the tanks and to present how these interactions can be considered practically.

This study carried out for this purpose consists of three main chapters and one appendix. Information related to tanks, mechanical properties and behavior of soils, earthquake waves, literature survey and purpose and content of this study are given in Chapter 1. General soil-structure and fluid-structure approaches are introduced and they are evaluated for elevated tanks. Eight models for fluid-structure-soil interaction were constituted and discussions of results obtained from these models are also given in this chapter. Conclusions drawn from the study are presented and some recommendations for future studies are made in Chapter 3. This chapter is followed by the list of references and an appendix.

Finally, in this study, effects of soil, fluid, structural system and nonlinear behavior of soil on the dynamic behaviour of elevated tanks were exhibited, some analytical methods developed for the interaction problems can produce results like obtained from numerical methods, and the effect of soil on the behaviour of the tanks may be negligible for some soil types.

Key Words: Elevated Tanks, Earthquake Analysis, Fluid-Structure-Soil Interaction, Cone Model, Artificial Boundaries, EC-8, FEMA, Langrange Approach, Nonlinear Material Behavior

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sayfa No</u>

Şekil 1.	Depoların sınıflandırılması (Doğangün, 1989)1
Şekil 2.	Çerçeve taşıyıcı sisteme (a) ve silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip (b) ayaklı depoların şematik düşey kesitleri
Şekil 3.	Dünyanın değişik bölgelerinde uygulanan farklı taşıyıcı sisteme ve hazne tipine sahip ayaklı depo görünümleri
Şekil 4.	Türkiye'de uygulanan bazı ayaklı depolardan görünümler3
Şekil 5.	USCS'de verilen zemin gruplandırma (sınıflandırma) sistemi (Coduto, 2000; Aytekin, 2000)
Şekil 6.	Doğal ortamında zemin ve zeminde oluşan gerilmeler7
Şekil 7.	a) Harmonik tekrarlı yük etkisindeki zemin b) Eliptik tekrarlı döngü kabulüyle gerilme şekildeğiştirme arasındaki ilişki ve tekrarlı yükler etkisi altındaki viskoz sönüm kabulüyle sönüm oranının tespiti c) kayma gerilmesi ile şekildeğişitirme ilişkisi ile teğet ve sekant modüllerinin belirlenmesi
Şekil 8.	a)Tekrarlı yük etkisi altında kayma gerilmesinin zamana bağlı değişimi ile buna bağlı kayma gerilmesi şekildeğiştirme ilişkisi b)Tekrarlı yük etkisi için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi ile en büyük ve sekant kayma modülünün belirlenmesi c) kayma modülünün artan şekildeğiştirme ile azalması
Şekil 9.	Sonsuz büyük kabul edilen bir ortamda P ve S dalgalarının yerdeğiştirme ve yayılma doğrultuları (Celep ve Kumbasar, 2004)
Şekil 10.	Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri14
Şekil 11.	a)1960 Şili depreminde yıkılmış betonarme ve çelik ayaklı depo görünümleri. b)2001 Bhuj depreminde betonarme kabuk taşıyıcı sisteme sahip 500 m ³ eğilmeye bağlı çatlaklar oluşmuş ayaklı depo (merkeze 80 km mesafede), 265 m ³ yıkılmış aynı tipte bir ayaklı depo (merkeze 20 km)
Şekil 12.	(a) Serbest alan ve kontrol noktası ile (b) deprem hareketine maruz bir depo içi yapı-zemin etkileşiminin şematik gösterimi
Şekil 13.	Kinematik ve eylemsizliğe bağlı etkileşimin şematik gösterimi (Youseff, 1998; Stewart, 1999)
Şekil 14.	Eğimli bir şekilde ilerleyen kayma dalgasına maruz rijit bir temel sisteminde kinematik etkileşim için meydan gelen değişimler
Şekil 15.	Elsabee ve Morray'e göre (1977) tabaka kalınlığı (<i>H</i> =2,5 <i>r</i>) olan elastik ortama gömülü rijit silindirik temelin transfer fonksiyonuna ait büyütme katsayılarının değişimi (Hallabian, 2001)
Şekil 16.	Day'e göre (1977) elastik ortama gömülü rijit silindirik temelin transfer fonksiyonuna ait büyütme katsayılarının değişimi (Stewart, 1996; Hallabian, 2001)

Şekil 17.	Eylemsizliğe bağlı etkileşim için yatayda ötelenme ve dönme serbestliklerini içeren basitleştirilmiş bir mekanik model
Şekil 18.	Boussinesq teorisine göre elastik bir ortam (Poisson oranı $v = 1/3$) üzerinde statik olarak yüklü bir diskin ortamda oluşturduğu yerdeğiştirmelerin yüzeydeki yerdeğiştirmeye göre derinliğe bağlı değişimleri
Şekil 19.	Çeşitli serbestlik dereceleri için kabul edilen koni modelleri, bu modellere ait tepe açısı şekilleri, serbestlik dereceleri için dalga yayılma doğrultuları ve zeminde oluşan gerilme şekilleri (Wolf, 1994)
Şekil 20.	a) Zeminin yatay ve dönme serbestlik dereceleri için rijitliklerle tanımlanması (alt sistem yaklaşımı) b) Zeminin sonlu eleman kullanılarak modellenmiş sıvı- ayaklı depo-temel/zemin'e ait bir sonlu eleman modeli (Doğrudan çözüm yaklaşımı)
Şekil 21.	Veletsos yaklaşımına ait mekanik model (Veletsos vd., 1988; Kumar, 1996) 44
Şekil 22.	Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\overline{\zeta}$) periyot oranıyla (\tilde{T}/T) değişimi (Veletsos,1988)
Şekil 23.	Tek serbestlik dereceli ($v = 0.45$, $\zeta = 5\%$, $\gamma = 0.15$,) elastik ortam üzerinde bulunan bir temel sistemi ($e/r_0=0$) ile gömülü ($e/r_0=1$) bir temel-zemin sistemi için yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumdaki periyottaki değişim ile (\tilde{T}/T) ve temel-zemin sisteminin sönümü (ζ (%)) (Stewart, 1996; Stewart vd., 1998; 1999a)
Şekil 24.	Temel-zemin sistemi sönüm katsayısının periyot oranıyla değişimi (FEMA 368, 2001)
Şekil 25.	Değiştirme yöntemlerine ait akış diyagramı
Şekil 26.	Yapı-zemin etkileşiminin çözümlenmesinde alt sistem yaklaşımı çözüm adımları (1) sisteme etkiyen yer hareketinin kinematik etkileşime bağlı olarak belirlenmesi (2) temel ve zemin sistemine bağlı olarak sistemin dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonlarının) belirlenmesi (3) yapıya etkiyen yer hareketinin ve fiziksel özellikleri belirlenmiş yapı-zemin-temel sisteminin çözümü.
Şekil 27.	Çalışmada dikkate alınan (a) zeminin statik yatay ötelenme ve dönme rijitlikleri ile ifade edildiği sistem (b) zeminin frekans bağımlı yatay ötelenme ve dönme rijitlikleri ve sönümleri ile ifade edildiği sistem
Şekil 28.	Tek kütleli sisteme ait dönme ve yatay ötelenme serbestlik derecelerini içeren alt sistem yaklaşımı modeli (Wolf 1994)
Şekil 29.	Homojen bir zemin sistemi üzerindeki ayaklı depolar için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı
Şekil 30.	Yatay ve dönme serbestlikleri için çift koni modelleri
Şekil 31.	Homojen bir zemin sistemi üzerindeki gömülü temel sistemine sahip yapı sistemi için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklasımı
Şekil 32.	Kütlesiz temel yaklaşımı için yapı-temel/zemin etkileşim modeli

Şekil 33.	Kütlesiz temel yaklaşımıyla elde edilmiş ayaklı depo-temel/zemin etkileşimine ait sonlu eleman modeli
Şekil 34.	Yayılma durumunu ifade etmek için kullanılan birim küpe etkiyen kuvvetler 70
Şekil 35.	Sonlu eleman ağında sanal sınırın uygulaması
Şekil 36.	Katı cisim için şematik gerilme şekildeğiştirme eğrisi
Şekil 37.	Çeşitli malzemeler için şekildeğiştirme türleri
Şekil 38.	Bazı ideal malzeme davranışları
Şekil 39.	Farklı kırılma kriterleri için asal gerilme uzayında izotropik akma yüzeyleri 77
Şekil 40.	İki boyutlu asal gerilme düzleminde akma yüzeyi ve akma kuralı (diklik şartı)77
Şekil 41.	İki ve üç boyutlu asal gerilme uzayında Drucker-Prager akma yüzeyi ve düzlemi
Şekil 42.	Analitik yaklaşımlarla yapı sonlu elemanların birlikte kullanıldığı model 81
Şekil 43.	Ayaklı depolara ait tek kütleli mekanik model (a) betonarme silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip depo, (b) betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip depo, (c) çelik kafes ya da betonarme çaprazlı çerçeve taşıyıcı sistemli depo, (d) yığma taşıyıcı sisteme sahip depo, (e) tek kütleli mekanik model
Şekil 44.	Kütle-yay modeli ile sıvı davranışının mekanik olarak tanımlanması
Şekil 45.	Ayaklı depo-sıvı sistemine ait eşdeğer mekanik modelle, iki kütleli model yaklaşımı
Şekil 46.	Eurocede-8'de verilen iki kütleli modele ait katsayıların ve oranlarının sıvı yüksekliğinin hazne yarıçapına oranına (h/R) bağlı olarak değişimleri
Şekil 47.	Eklenmiş kütle yaklaşımının ayaklı bir depoya uygulanması91
Şekil 48.	İmpuls moduna ait normalleştirilmiş ($p_i/(\rho Ra_g)$) hidrodinamik basıncın h/R katsayısına bağlı olarak (a) hazne duvarında yükseklik boyunca (b) tabanda yarıçapa bağlı olarak değişimi (EC-8 Part-4, 2003)
Şekil 49.	(a) İlk iki salınım moduna ait normalleştirilmiş hidrodinamik basınçların derinlikle değişimi ve (b). modlara ait salınım frekansların <i>h/R</i> oranına bağlı olarak değişimi
Şekil 50.	Sıvı-ayaklı depo-zemin sisteminde yapısal kısım, temel/zemin kısmı ve sıvı için kullanılabilecek model yaklaşımlarından bazıları
Şekil 51.	Uygulamaya konu olan çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 895 m ³ lük ayaklı depo. 101
Şekil 52.	17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca ivme kaydı Kuzey-Güney bileşeni. 102
Şekil 53.	<i>Model 1</i> : Sıvı için tek kütlenin, zemin için iki farklı rijitliğin, yapı için ise mekanik modelin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli
Şekil 54.	<i>Model-1</i> 'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 105
Şekil 55.	<i>Model-1</i> 'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 106
Şekil 56.	<i>Model-1</i> 'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 106

Şekil 57. Model-1'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 106 Sekil 58. *Model-1*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 107 Şekil 59. Model-1'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 107 Şekil 60. *Model-1*'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 108 Şekil 61. *Model-1*'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 108 Şekil 62. Model-1'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 109 Şekil 63. *Model-1*'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 109 Şekil 64. Model-1'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 109 Şekil 65. *Model-1*'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 110 Şekil 66. Model-1'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 111 Şekil 67. Model-1'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 111 Şekil 68. Model-1'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 112 Şekil 69. *Model-1*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 112 Şekil 70. *Model-1*'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 112 Sekil 71. Model-1'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 113 Sekil 72. *Model 2*: Sıvı için tek kütlelinin, zemin için frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerin, yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin Şekil 73. Model-2'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 116 Şekil 74. Model-2'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri .116 Şekil 75. Model-2'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 117 Şekil 76. *Model-2*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 117 Şekil 77. *Model-2*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 117 Şekil 78. *Model-2*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 118 Sekil 79. *Model-2*'de S1 icin hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 119 Sekil 80. *Model-2*'de S2 icin hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değisimleri. 119 Şekil 81. *Model-2*'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 119 Şekil 82. *Model-2*'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 120 Şekil 83. *Model-2*'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 120 Şekil 84. *Model-2*'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 120 Şekil 85. *Model-2*'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 121 Şekil 86. Model-2'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 122 Şekil 87. Model-2'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 122 Şekil 88. Model-2'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 122 Şekil 89. *Model-2*'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 123

Şekil 90.	Model-2'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 123
Şekil 91.	<i>Model 3:</i> Sıvı için iki kütlenin, zemin için iki farklı rijitliğin, yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli
Şekil 92.	Model-3'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 127
Şekil 93.	Model-3'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 127
Şekil 94.	Model-3'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 127
Şekil 95.	Model-3'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 128
Şekil 96.	Model-3'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 128
Şekil 97.	Model-3'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 128
Şekil 98.	<i>Model-3</i> 'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 129
Şekil 99.	<i>Model-3</i> 'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 130
Şekil 100.	<i>Model-3</i> 'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 130
Şekil 101.	<i>Model-3</i> 'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 130
Şekil 102.	<i>Model-3</i> 'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 131
Şekil 103.	<i>Model-3</i> 'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 131
Şekil 104.	<i>Model-3</i> 'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 132
Şekil 105.	<i>Model-3</i> 'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 132
Şekil 106.	<i>Model-3</i> 'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 133
Şekil 107.	<i>Model-3</i> 'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 133
Şekil 108.	<i>Model-3</i> 'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 133
Şekil 109.	<i>Model-3</i> 'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 134
Şekil 110.	<i>Model-3</i> 'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 111.	<i>Model-3</i> 'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 112.	<i>Model-3</i> 'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 113.	<i>Model-3</i> 'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 114.	<i>Model-3</i> 'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 136
Şekil 115.	<i>Model-3</i> 'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 136
Şekil 116.	<i>Model 4:</i> Sıvının çok kütleli, zeminin frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerle tanımlandığı yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli.
Sekil 117	<i>Model-4</i> 'de S1 icin hesaplanan vatav verdeğistirmenin zamanla değisimleri 139
,	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Şekil 118. Model-4'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 139
Şekil 119. <i>Model-4</i> 'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 140
Şekil 120. <i>Model-4</i> 'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 140
Şekil 121. <i>Model-4</i> 'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 140
Şekil 122. <i>Model-4</i> 'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 14
Şekil 123. <i>Model-4</i> 'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 142
Şekil 124. <i>Model-4</i> 'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 142
Şekil 125. <i>Model-4</i> 'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 143
Şekil 126. <i>Model-4</i> 'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 143
Şekil 127. <i>Model-4</i> 'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 143
Şekil 128. <i>Model-4</i> 'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 144
Şekil 129. <i>Model-4</i> 'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 14
Şekil 130. <i>Model-4</i> 'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 14
Şekil 131. <i>Model-4</i> 'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 14
Şekil 132. <i>Model-4</i> 'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 140
Şekil 133. <i>Model-4</i> 'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 140
Şekil 134. <i>Model-4</i> 'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 140
Şekil 135. <i>Model-4</i> 'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 14'
Şekil 136. <i>Model-4</i> 'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 137. <i>Model-4</i> 'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 138. <i>Model-4</i> 'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 148
Şekil 139. <i>Model-4</i> 'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 148
Şekil 140. <i>Model-4</i> 'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 149
Şekil 141. <i>Model 5</i> ; Sıvı için çok kütleli eklenmiş kütle yaklaşımının; zemin için statik rijitliklerin, kullanıldığı ayaklı deponun sıvı-yapı-zemin modeli
Şekil 142. <i>Model-5</i> 'e ait yatay yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülmeye bağlı olarak değişimleri
Şekil 143. <i>Model-5</i> 'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin sistemleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları
Şekil 144. Model-5'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 155
Şekil 145. <i>Model-5</i> 'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 150

Şekil 146. Model-5' de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 156 Sekil 147. *Model-5*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 156 Sekil 148. *Model-5*' de S5 için hesaplanan yatay yerdeğistirmenin zamanla değisimleri. 157 Şekil 149. Model-5' de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 157 Şekil 150. Model-5' de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 158 Şekil 151. Model-5'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 158 Şekil 152. Model-5' de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 159 Şekil 153. Model-5'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 159 Şekil 154. Model-5' de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 159 Şekil 155. Model-5' de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 160 Şekil 156. Model-5' de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 161 Şekil 157. Model-5' de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 161 Şekil 158. *Model-5*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 162 Şekil 159. *Model-5*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 162 Sekil 160. *Model-5*' de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 162 Sekil 161. *Model-5*'de S6 icin hesaplanan eğilme momentinin zamanla değisimleri...... 163 Şekil 162. Model-5'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 163. Model-5'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 164. *Model-5*' de S3 icin hesaplanan salınım verdeğistirmesinin zamanla değisimleri Sekil 165. Model-5' de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 166. Model-5'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 167. Model-5'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 168. Model 6; Sıvı için eklenmiş kütle yaklaşımının; zemin için kütlesiz temel yaklaşımının (solid tipte sonlu elemanla), kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli. Şekil 169. Model-6'ya ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri. Sekil 170. Model-6'ya ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo Şekil 171. Model-6'da S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 171 Şekil 172. Model-6'da S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 171

Şekil 173. Model-6'da S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 171 Şekil 174. *Model-6*'da S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 172 Sekil 175. *Model-6*'da S5 için hesaplanan yatay yerdeğistirmenin zamanla değisimleri. 172 Şekil 176. *Model-6*'da S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 172 Şekil 177. Model-6'da S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 173 Şekil 178. Model-6'da S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 174 Şekil 179. Model-6'da S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 174 Şekil 180. Model-6'da S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 174 Şekil 181. Model-6'da S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 175 Şekil 182. Model-6'da S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 175 Şekil 183. Model-6'da S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 176 Şekil 184. Model-6'da S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 176 Şekil 185. Model-6'da S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 176 Şekil 186. Model-6'da S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 177 Sekil 187. *Model-6*'da S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 177 Sekil 188. *Model-6*'da S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değisimleri...... 177 Şekil 189. Model-6'da S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 190. Model-6'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 191. Model-6' de S3 icin hesaplanan salınım verdeğistirmesinin zamanla değisimleri Sekil 192. *Model-6*' de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 193. *Model-6*' de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 194. Model-6'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri. Şekil 195. Model 7; Sıvı için sonlu eleman yaklaşımının, zemin için kütlesiz temel yaklaşımının (solid tipte sonlu elemanla), kullanıldığı ayaklı depo sıvı-yapı-Şekil 196. Model-7'ye ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri. Sekil 197. Model-7'ye ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo Şekil 198. Model-7'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 184 Şekil 199. Model-7'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 185 Şekil 200. Model-7'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 185 Şekil 201. *Model-7*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 185 Sekil 202. *Model-7*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğistirmenin zamanla değisimleri. 186 Şekil 203. Model-7'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 186 Şekil 204. Model-7'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 187 Şekil 205. Model-7'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 187 Şekil 206. Model-7'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 187 Şekil 207. Model-7'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 188 Şekil 208. Model-7'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 188 Sekil 209. Model-7' de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri. 188 Şekil 210. Model-7'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 189 Şekil 211. Model-7'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 189 Şekil 212. *Model-7*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 190 Şekil 213. *Model-7*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 190 Sekil 214. Model-7'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri...... 190 Sekil 215. *Model-7*'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değisimleri...... 191 Şekil 216. Model-7'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 217. Model-7'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 218. *Model-7*' de S3 icin hesaplanan salınım verdeğistirmesinin zamanla değisimleri Sekil 219. *Model-7*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Sekil 220. *Model-7*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 221. Model-7'e ait salınım yer değiştirmenin S6 için zamanla değişimleri...... 193 Sekil 222. Model 7; Sıvı için sonlu eleman yaklaşımının, zemin için kütlesiz temel Sekil 223. Model-8'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri. Sekil 224. *Model-8*'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları......197 Şekil 225. Model-8'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 198 Şekil 226. Model-8'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 199 Sekil 227. Model-8'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 199

Şekil 228.	Model-8'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 199
Şekil 229.	Model-8'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 200
Şekil 230.	Model-8'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri. 200
Şekil 231.	Model-8'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 201
Şekil 232.	Model-8'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 201
Şekil 233.	Model-8'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 201
Şekil 234.	Model-8'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 202
Şekil 235.	Model-8'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 202
Şekil 236.	Model-8'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri 202
Şekil 237.	Model-8'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 203
Şekil 238.	Model-8'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 203
Şekil 239.	Model-8'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 204
Şekil 240.	Model-8'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 204
Şekil 241.	Model-8'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 204
Şekil 242.	<i>Model-8</i> 'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri 205
Şekil 243.	<i>Model-8</i> 'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri
Şekil 244.	. <i>Model-8</i> 'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 206
Şekil 245.	<i>Model-8</i> 'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 206
Şekil 246.	<i>Model-8</i> 'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 206
Şekil 247.	. <i>Model-8</i> 'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 207
Şekil 248.	<i>Model-8</i> ' de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri 207
Şekil 249.	S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modeller için en büyük yatay yerdeğiştirmeler
Şekil 250.	S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durum da bütün modeller için en büyük yatay yerdeğiştirmeler
Şekil 251.	S1 zemin sistemi için $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi
Şekil 252.	S3 zemin sistemi için $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi
Şekil 253.	S6 zemin sistemi için $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi

Şekil 254.	Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S1 zemin sistemi için <i>Model-4</i> ve <i>Model-8</i> 'e ait yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri
Şekil 255.	Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S6 zemin sistemi için <i>Model-4</i> ve <i>Model-7</i> 'ye ait yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri
Şekil 256.	S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük kesme kuvvetleri
Şekil 257.	S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modeller elde edilen en en büyük kesme kuvvetleri
Şekil 258.	S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük eğilme momentleri
Şekil 259.	S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük eğilme momentleri
Şekil 260.	S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda modellerden elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri
Şekil 261.	S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda modellerden elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri
Şekil 262.	Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için analitik yöntemlerin salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması
Şekil 263.	Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için sayısal yöntemlerin salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması
Şekil 264.	Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için <i>Model-4</i> ile <i>Model-7</i> salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması
Şekil 265.	Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri
Şekil 266.	Gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda bütün modeller için yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri
Şekil 267.	Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için kesme kuvvetinin zemin sistemine bağlı değişimleri
Şekil 268.	Gömülmenin olduğu durumda ($e/r_0=1$) bütün modeller için kesme kuvvetinin zemin sistemine bağlı değişimleri. 221
Şekil 269.	Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için salınım yerdeğiştirmesinin zemin sistemine bağlı değişimleri
Şekil 270.	Gömülmenin olduğu durumda ($e/r_0=1$) bütün modeller için salınım yerdeğiştirmesinin zemin sistemine bağlı değişimleri
Şekil 271.	Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S1 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı (<i>Model-8</i>) ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri
Şekil 272.	Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri

Şekil 273.	Gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikka alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri.	.te 225
Şekil 274.	Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen kesme kuvvetleri zamanla değişimleri	nin 226
Şekil 275.	Gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikka alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.	.te 226
Şekil 276.	Kabuk taşyıcı sisteme sahip ayaklı deponun sonlu eleman modeli	227
Şekil 277.	Farklı taşıyıcı sistemlerde üç farklı zemin sistemi için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ ve olduğu $(e/r_o=1)$ durumlarda elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirmeler.	228
Şekil 278.	Farklı taşıyıcı sistemlerde üç farklı zemin sistemi için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ ve olduğu $(e/r_o=1)$ durumlarda elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri.	229
Şekil 279.	S1 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri.	230
Şekil 280.	S3 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri.	230
Şekil 281.	S6 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri.	231
Şekil 282.	Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri	233
Şekil 283.	Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri	233
Şekil 284.	S5 zemin sistemi için doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın dikkate alındı durumlarda yatay yerdeğiştirmenin ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimle	ğı eri 234
Şekil 285.	S6 zemin sistemi için doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın dikkate alındı durumlarda yatay yerdeğiştirmenin ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimle	ğı eri 235
Şekil 286.	Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen kesme kuvvetlerinin zem sistemine bağlı değişimleri	in 235
Şekil 287.	Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda elde edilen kesme kuvvetlerinin zemir sistemine bağlı değişimleri.	n 236

Şekil 288.	Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden,
	gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen salınım yerdeğiştirmelerinin
	zemin sistemine bağlı değişimleri. 237

Şekil 289. Doğrusal olmayan ve olan dav	ranışın dikkate alındığı çözümlemelerden,
gömülmenin olduğu (<i>e/r₀</i> =1)	durumda elde edilen salınım yerdeğiştirmelerinin
zemin sistemine bağlı değişim	ıleri

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.	Türk Deprem Yönetmeliğinde (TDY) tanımlanan zemin grupları4
Tablo 2.	TDY (1998) Eurocode–8, (2003) ve Uniform Building Code-(1997)'de tanımlanan zemin sınıfları (Doğangün ve Livaoğlu, 2002; UBC, 1997;EC-8, Part I 2003; ABYYHY, 1998)
Tablo 3.	Farklı zemin grupları için önerilen yaklaşık Poisson oranları (v) (Bardet, 1997).
Tablo 4.	Farklı zemin grupları için önerilen yaklaşık elastisite modülleri (MPa) (Bardet, 1997)
Tablo 5.	Çeşitli kaya türleri için önerilen yaklaşık elastisite modülü ile poisson oranı değerleri9
Tablo 6.	Yapı-zemin etkileşimindeki hesap yöntemleri
Tablo 7.	Koni modeli ile elde edilmiş temel-zemin sisteminin özellikleri (Wolf, 1994).35
Tablo 8.	Koni (z_0/r_0) oranının poisson oranına göre değişimi (Wolf, 1994)
Tablo 10.	Dairesel, dikdörtgen ve farklı geometriye sahip temel sistemleri için statik rijitlik değerleri
Tablo 11.	G/g_o ve v_s/v_{so} değerlerinin yer ivmesi tepkisiyle değişimi
Tablo 12.	Dönmeye ait dinamik faktör değerleri ($e/r_0 < 0,5$) (Fema 368, 2001)
Tablo 13.	Housner ve bauer yaklaşımlarına ait bağıntılar
Tablo 14.	Eurocede-8'de verilen iki kütleli modele ait katsayılar ve oranlar
Tablo 15.	Uygulamaya konu olan zemin sistemlerine ait mekanik özellikler 103
Tablo 17.	<i>Model 1</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları 105
Tablo 19.	<i>Model 2</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları 115
Tablo 20.	Housner ve ec-8 çok kütleli sistem yaklaşımlarının kullanıldığı modellerden dört farklı zemin sınıfı için elde edilen değerler ve bunların karşılaştırılması.125
Tablo 21.	<i>Model 3</i> için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları 126
Tablo 22.	<i>Model 3</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları,
Tablo 24.	<i>Model 4</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları,
Tablo 25.	<i>Model 5</i> için eklenmiş kütle yaklaşımının iki farklı şekilde kullanılmasıyla dört farklı zemin için elde edilen sonuçlar ve bunların karşılaştırılması

Tablo 26.	<i>Model 5</i> için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları. 153
Tablo 27.	<i>Model 5</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları,
Tablo 29.	<i>Model 6</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları
Tablo 30.	<i>Model-7</i> için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları. 182
Tablo 31.	<i>Model-7</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları
Tablo 32.	<i>Model 8</i> için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları
Tablo 35.	Zemin sistemleri için dikkate alınan elastisite modulü (<i>e</i>), poisson oranı (v), birim ağırlığı (γ), kohezyon (<i>c</i>) ve içsel sürtünme açıları (ϕ)

SEMBOLLER DİZİNİ

A_0	: Temel sistemi eşdeğer alanı
$A_g(t)$: Depo tabanındaki yer hareketi ivmesinin zamanla değişimi
A_{loop}	: Tekrarlı yüklemede döngünün alanı
$A_n(t)$: n. moda ait tepki spektrumu değeri
A_{t1}, A_{t2}	: Viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sınırdaki elemanın alanları
a, b	: Dikdörtgen temel büyük ve küçük kenar boyutları
a_0	: Boyutsuz frekans
a_s	: Zemine ait boyutsuz harmonik kesme titreşim frekansı
С	: Sistem sönüm matrisi
\mathbf{C}^{*}	: Temel-zemin sistemine ait özel sönüm matrisi
C^{ep}_{ijkl}	: Elasto-plastik rijitlik tansörü
$ ilde{C}_s$: Zemin etkileşiminin dikkate alındığı sistemin tasarım spektrumu ordinatını
C_s	: Ankastre sistemin tasarım spektrumu ordinatı
Сі, Сс	: EC-8' e göre impuls ve salınıma ait periyotları belirlemek için boyutsuz ve boyutlu $(s/m^{1/2})$ katsayılar
С	: Sistemde meydana gelen dalganın yataydaki hızını ya da zemine ait kohezyon
<i>C</i> ₁ , <i>C</i> ₂	: İki kütleli sisteme ait sönümleri
D_s	: Rijit bir tabaka üzerindeki zemin yüksekliği
E ₁₁ , E ₂₂ , E ₃₃ ,	: Sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultuları için kısıtlama parametreleri
E_b	: Kirișe ait elastisite modülü
E_{cl} ,	: Taşıyıcı sistemde kolona ait elastisite modülü
E_c	: Hacimsel elastisite modülü

е	: Temel gömülme derinliği,
F	: Euler yaklaşımında sıvı için özel bir sönüm matrisi
F_i	: Genelleştirilmiş <i>i</i> nolu yerdeğiştirme bileşenine karşılık gelen dış yük
f	: Frekans
f()	: Akma fonksiyonu
G_{max}	: En büyük kayma modulü
G _{sec}	: Sekant modulü
G _{tan}	: Teğet kayma modülü
g	: Yerçekimi ivmesi
Н	: Zemin derinliği
Н	: Euler yaklaşımında sıvı için kullanılan rijitlik matrisi
h	: Sıvı yüksekliği
h_1, h_2	: İki kütleli sistem için toplanmış kütlelerin tabandan yükseklikleri
h_c	: Salınım kütlesinin depo tabanından yüksekliği
h _{cl}	: Ayak sisteminin net yüksekliği
h_n^*	: n. moda ait etkin yükseklik
h_i	: İmpuls kütlesinin depo tabanından yüksekliği
h_i^\prime , h_c^\prime	: Temel tabanında meydana gelen devirici momentin hesabı için kullanılan sırasıyla impuls ve salınım kütlesinin hazne tabanına olan sanal yükseklikleri
I_0	: Statik eylemsizlik momenti
$I_1(), I_1'()$: Sırasıyla birinci mertebeden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu ve bunun türevi
I ₁ , I ₂ , I ₃	: Gerilme tansörünün invaryantları (değişmezleri)
I _b	: Kirişe ait eylemsizlik momenti
Ic	: Taşıyıcı sistrme ait eylemsizlik momenti
I _{cl}	: Bir kolona ait eylemsizlik momenti

i	: Kompleks sayı
J_1, J_2, J_3	: Deviatör gerilme bileşenin invaryantları
K	: Sistem rijitlik matrisi
K_H	: Temel zemin sistemi statik yatay rijitliği
K_R	: Temel zemin sistemi statik dönme rijitliği
K_T	: Temel zemin sistemi statik burulma rijitliği
K _u	: FEMA'ya göre değiştiriliş temel zemin sistemi statik yatay rijitliği
K_V	: Temel zemin sistemi statik düşey rijitliği
$K_{ heta}$: FEMA'ya göre değiştiriliş temel zemin sistemi statik dönme rijitliği
$K_{H}^{*} \ K_{V}^{*} \ K_{ heta}^{*} \ K_{T}^{*}$: Gömülmenin olduğu temel zemin sistemi için yönlere bağlı statik rijitlikler
K_{∞}, C_{∞}	: Temel-zemin sistemine ait rijitlik ve sönüm matrisleri
<i>k</i> ₁ , <i>k</i> ₂	: İki kütleli sisteme ait rijitlikler.
<i>k</i> _b	: Sıkışamazlık modülü
k _{ci}	: i. salınım rijitliği,
$k_{H}(a_{0}), c_{H}(a_{0})$: Yatay ötelenme için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
$k_{_{H\zeta_g}}$, $c_{_{H\zeta_g}}$: Malzeme sönümünün de dikkate alındığı yatay ötelenme serbestlik derecesinin zemine ait frekans bağımlı rijitlik ve sönüm
k_s , c_S	: Taşıyıcı sisteme ait rijitlik ve sönüm
$k_{V}(a_{0}), c_{V}(a_{0})$: Düşey ötelenme için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
$k_{ heta\!\zeta_s}$, $c_{ heta\!\zeta_s}$: Malzeme sönümünün de dikkate alındığı dönme serbestlik derecesinin zemine ait frekans bağımlı rijitlik ve sönüm
$k_{\theta T}(a_0), c_{\theta T}(a_0)$: Burulma için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
$k_{ heta heta}(a_0), c_{ heta heta}(a_0)$: Dönme için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları
L	: Euler yaklaşımında sıvı elemanların enterpolasyon fonksiyonlarına bağlı olarak sıvı ortamında ve yüzeyinde integral alınmak suretiyle belirlenen bir matrisi,

L	: Her bir panelde bulunan kiriş açıklığı
l _{cg}	: Haznede bulunan sıvının ağırlık merkezinden taşıyıcı sistemin mesnetlendiği temel sistemine olan mesafe
Μ	: Sistem kütle matrisi
M'	: Temel plağı alt seviyesinde bulunan devirici moment
M _a	: Eklenmiş kütle matrisi
M [*] (=M+M _a)	: Toplam kütle matrisi
M _{max}	: Ayaklı depo tabanındaki bulunan elemanlarda oluşan en büyük eğilme momenti
$M_0(\omega)$: Tek kütleli sistem için tabanda meydana gelen frekansa bağlı eğilme momenti
M_o	: En büyük eleman eğilme momenti,
M_{b} ,	: Taban eğilme momenti
M_n^*	: n. moda ait etkin kütle
m_1, m_2	: İki kütleli sistem için uygun seviyelerde toplanmış kütleler
<i>m_{ci}</i>	: i. salınım kütlesi
m_i	: İmpuls kütlesi
m _{ss}	: Taşıyıcı sistem kütlesi
m_{ν}	: Boş hazne kütlesi
m_w	: Sıvı toplam kütlesi
N _{cl}	: Toplam kolon sayısı
N_p	: Taşıyıcı sistemi çerçeve olan depodaki panel sayısı
n, t	: Sanal sınırdaki doğrultuları ifade eden indisler
$P_0(t)$: Yapıya temel-zemin sistemi sebebiyle uygulanacak zamanla değişen bir kuvvet
$P_0(\omega)$: Tek kütleli sistem için tabanda meydana gelen kesme kuvvetinin frekansla değişimi
PI	: Plastisite indisi

$PSA(\tilde{T}, \zeta_0)$: Belirli bir periyot ve sönüm değeri için ivme spektrumu tepkisi
р	: Basınç
p_c	: Salınım moduna ait hidrodinamik basınç
p_i	: İmpuls moduna ait hidrodinamik basınç
p_{xr}, p_{yr}, p_{zr}	: Dönme basınçları
R	: Deponun yarıçapı
$\{R(t)\}$: Zamana bağlı dış yük vektörü
R_s	: Ortalama ayak yarıçapı
r ₀	: Temel yarıçapı veya eşdeğer yarıçap
r_u, r_{Θ}	: Ötelenmede ve dönmede eşdeğer yarıçaplar
$S(\omega)$: Dinamik rijitlik matrisi
S _{DS}	: (1 s) den az periyota sahip sistemler için spektrum ivme katsayısı
$S_e\left(T_{imp}\right)$: İmpuls modu için %5 tepki spektrumu değeri
$S_e(T_c)$: Salınım modu için % 0,5 sönüm değerine karşılık tepki spektrumu değeri
$S_{H\zeta_g}$: Ötelenmeye bağlı zemin sönümünü de içeren dinamik rijitlik
$S_{_{ heta\!\zeta_g}}$: Dönmeye bağlı zemin sönümünü de içeren dinamik rijitlik
S	: Hazne duvarı eşdeğer kalınlığı
S _{ij}	: Deviator gerilme bileșeni
ss, sb, bb	: Sırasıyla yapıya, yapı-temel ara yüzüne ve temel-zemin sistemine ait özellikleri ifade eden indisler
Ĩ	: Yapı-temel/zemin sistemine ait eşdeğer periyot ya da değiştirilmiş periyot
T_c	: Salınım moduna ait periyot
T_{imp}	: İmpuls moduna ait periyot
U	: Toplam potansiyel enerji
U	: Eylemsizliğe bağlı yerdeğiştirme

U _f ,	: Kinematik etkileşime ait yerdeğiştirme
$u_{fim}, \dot{u}_{fim}, \ddot{u}_{fim}$: Rijit dairesel temel sisteminin maruz kaldığı kinematik yerdeğiştirme hız ve ivme
$\left\{u_g(\omega)\right\}$: Frekans ortamında yer hareketinin açısal frekansla değişimi
$\left\{u_g(t)\right\}$: Zaman ortamında yer hareketinin zamanla değişimi
$u_{g}, \dot{u}_{g} \ddot{u}_{g}$: Kontrol noktasında kaydedilen yerdeğiştirme, hız ve ivme
$\ddot{u}_{gx}(t),$: Serbest alan hareketinin x doğrultusu için ivme bileşeni
u_{max}	: En büyük yatay yerdeğiştirme
u_s	: Sıvı serbest yüzeyindeki düşey sıvı yerdeğiştirmesi
<i>u_{smax}</i>	: Sıvı serbest yüzeyindeki en büyük düşey sıvı yerdeğiştirmesi
$u_{ heta fim} \dot{u}_{ heta fim} \ddot{u}_{ heta fim}$: Rijit dairesel temel sisteminde dönmeye bağlı oluşan kinematik yerdeğiştirme, hız ve ivmeler
V	: Taban kesme kuvveti
V _{max}	: Tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvveti
v_k	: Kinematik viskozite
v_p	: p dalgası hızı
Vs	: Kayma (s) dalgası hızı
$v_{s0:} G_0$: Küçük şekildeğiştirme değerleri (<10 ⁻³) için elde edilmiş kayma dalgası hızı ve modülü
v_x, v_y, v_z	: Sırasıyla sıvının x, y ve z eksenleri doğrultularındaki hızları
W^{*}	: Tek kütleli sistemin eşdeğer ağırlığı
\overline{W}	: Tek kütleli olarak değerlendirilen sistemin (moda ait) ağırlığının %70 i
W_D	: Tekrarlı yüklemede tüketilen enerji miktarı
Ws	: Tekrarlı yüklemede en büyük şekildeğitirme enerji miktarı
W_D	: Zeminin harmonik tekrarlı yükleme etkisinde gerilme birim şekildeğiştirme grafiğinde devirler arasındaki alan

XXVIII

Ws	: En büyük şekildeğiştirme enerjisi (gerilme-birim şekildeğiştirme grafiğinde en büyük gerilme ve birim şekildeğiştirme değerlerinin orijinle birleştirilmesiyle elde edilen üçgenin alanını)
W_L	: Tek kütleli sistemin; hazne ağırlığının tümünü, taşıyıcı sisteminin ağırlığının %66'sını ve sıvı toplam ağırlığını tümünü içeren ağırlık
W_w	: Yapı ağırlığı, sıvı ağırlığı ve varsa hareketli yüklerin %25'inin toplamı
Y, O	: Euler yaklaşımında yapı–sıvı ara yüzey etkileşimi ile doğan kuvvetlere ilişkin matrisler
z_0/r_0	: Koni modeli için tepe oranı
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
α	: Deprem dalgalarının yayılma doğrultularının düşeyle yaptıkları açı
α_u , α_{Θ}	: Temel zemin ve yapı dinamik davranışına bağlı katsayılar
γ	: Zemine ait birim hacim ağırlığını
ΔM , $\Delta M_{ heta}$: Ötelenme ve dönme için ek kütleler
δ	: Zeminin histerik ya da malzeme sönüm kapasitesi
$\delta_{_{ij}}$: Kroncker deltası
δ_{st}	: Yapı sistemine ait yapı m kütlesinin yatay yük olarak sisteme uygulanması durumunda meydana gelecek yatay yerdeğiştirme
\mathcal{E}_{ij}	: Toplam şekildeğiştirme
ε ^e	: Elastik şekildeğiştirme
ε^p	: Plastik şekildeğiştirme
ϵ_v	: Birim hacim değişimini
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$: Sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultularındaki şekildeğiştirmeleri ya da sıvı için birim boy değişimleri
ζ	: Taşıyıcı sistem sönüm oranı
ζ_0	: Eşdeğer sönüm oranı
ζ	: Temel-zemin sistemi sönüm oranı
$\zeta_h(a_0), \zeta_{\theta}(a_0)$: Yatay ötelenme dönme serbestlik dereceleri için radyasyonel sönümler

ζ_g	: Zemin sistemin sönüm oranı
К	: İsotropik pekleşme
<u>ĸ</u>	: Kinematik pekleşme
λ	: Dalga boyu ya da mazlemeye bağlı skaler bir fonksiyon (plastik çarpan)
λ_n	: Birinci mertebeden birinci türde Bessel fonksiyonun kökleri
μ , $\mu_{ heta}$: Sırasıyla ötelenme ve dönme ek kütleleri için katsayılar
$\Pi_{arepsilon}$: Şekildeğiştirme enerjisi
Π_s	: Yüzey elemanları şekildeğiştirme enerjisi
ρ	: Yoğunluk
σ_{ij}	: Gerilme tansörü
σ, γ	: Yapı ve zemin özelliklerine bağlı katsayılar
$\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$: Asal gerilmeler
τ	: Kayma gerilmesi
$ au^*$: Temel yarıçapı ve zemine ait kayma dalgası hızına bağlı bir katsayı
$ heta_b$: Tabanda meydana gelen dönme
$\psi_{x}, \psi_{y}, \psi_{z}$: Sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultuları için kısıtlama parametresi katsayıları
ω	: Açısal frekans
\mathcal{O}_{ci}	: i. salınım frekansı
ω_{sn}^2	: Sıvının n. salınım moduna ait açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Sıvı Depoları

Sıvı depoları; içme, kullanım sularını, araçlar için akaryakıtları, enerji üretimi ve sanayi için gerekli çeşitli sıvıları depolamada kullanılmaktadır. Suyu muhafaza etmek için kullanılan depolar, genellikle kaynaktan alınan suyun debisiyle, işletme debileri arasına bir denge sağlamak ya da bu debinin sağlanabilmesi için belirli bir yükseklikte suyu depolamak için kullanılan ara sistemler olarak nitelendirilebilir.

Depoları kullanım amaçlarına, kullanılan malzemeye, plan geometrilerine ve zemindeki konumlarına göre sınıflandırmak mümkündür. Bu bağlamda yapılan bir sınıflandırma Şekil 1'deki şemada görülmektedir. Burada sunulan depo sınıflarından çerçeve ve silindirik kabuk ayak taşıyıcı sistemlere sahip ayaklı depolar seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında, uygulamada yaygın olarak kullanılan çerçeve ve silindirik kabuk taşıyıcı sistem ve bunun üzerine mesnetlenen kesik koniye oturan silindirik hazneye sahip ayaklı depolar dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Depoların sınıflandırılması (Doğangün, 1989).

• AYAKLI DEPOLAR

Ayaklı depolar ayak adı verilen taşıyıcı bir sistem ile bu sistemin üstüne yerleştirilen bir hazneden ibarettir (Şekil 2). Ayaklı depoların hazneleri için çok farklı mimari tasarımlarla karşılaşmak mümkündür. Örnek olarak silindirik, konik, küresel ve küp şeklinde düzenlenmiş hazne tasarımları verilebilir (Şekil 3). Haznenin mesnetlendiği taşıyıcı sistem için de farklı uygulamalarla karşılaşılmaktadır. Hazne, çerçeve sistem, silindirik kabuk, eğik elemanlı çerçeve ya da uzay çerçeve gibi taşıyıcı sistemlere mesnetlenebildiği gibi (Şekil 3 ve 4), bazen bina türü bir yapıya da mesnetlenebilmektedir. Dolayısıyla çok farklı taşıyıcı sisteme sahip ayaklı depoların özellikle deprem etkisinde her bir sistemin rijitlik ve süneklik gibi dinamik özellikleri birbirlerinden farklı olacağından dinamik davranışları da çok farklı olacaktır.



Cerçeve taşıyıcı sisteme (a) ve silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip (b) ayaklı Şekil 2. depoların şematik düşey kesitleri



a) Betonarme çerçeve taşıyıcı sistem ve dikdörtgen hazneye sahip betonarme ayaklı depo





b) Çelik çaprazlarla bağlı çelik taşıyıcı sisteme sahip ayaklı depo.





küre hazneye sahip ayaklı depo.

Şekil 3. Dünyanın değişik bölgelerinde uygulanan farklı taşıyıcı sisteme ve hazne tipine sahip ayaklı depo görünümleri



 a) 100 m³ lük çerçeve taşıyıcı sistem ve silindirik hazneye sahip ayaklı depo (Bingöl 2003).



b) 100 m³ lük çerçeve taşıyıcı sistem ve silindirik hazneye sahip ayaklı depo (Zincirlikuyu, İstanbul 2003).



c) 1000 m³ lük çerçeve taşıyıcı sistem ve silindirik hazneye sahip ayaklı depo (4.Levent, İstanbul 2003).

Şekil 4. Türkiye'de uygulanan bazı ayaklı depolardan görünümler

1.2. Zeminlerin Özellik ve Davranışları

Bilindiği gibi statik yükler, makine, rüzgar ve diğer titreşim yükleri yapıya etkidiğinde yapı taşıyıcı sistemi temelleri aracılığıyla bu yükleri zemine aktarmaktadır. Mesnet çökmeleri ve sismik yer hareketleri nedeniyle oluşan etkiler ise zeminden temel sistemi vasıtasıyla yapıya aktarılmaktadır. Her iki durum için de zeminin davranışı üst

yapının davranışında etkili olmaktadır. Diğer taraftan, ayaklı depolarda ağırlık merkezinin zemin seviyesinden belirli bir yükseklikte toplanması ve yüklerin nispeten küçük bir alanda zemine aktarılması, bu depolar için zeminin önemini daha da artırmaktadır. Dolayısıyla çalışmaya konu olan ayaklı depoların da çeşitli yüklemeler altında gerçek davranışlarını ortaya koyabilmek için statik ve dinamik yükler altındaki tepkilerinin de gerçekçi birşekilde bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda çalışmanın kapsamı içinde zeminlere ilişkin dikkate alınan parametrelere esas olarak öz bilgiler aşağıda sunulmaktadır. Bu konuya ilişkin daha ayrıntılı bilgiler zemin mekaniği ve zemin dinamiği ile ilgili yayınlarda verilmektedir.

Zeminlerin sınıflandırılması genellikle dayanımı, sıkışabilirliği, geçirgenliği, tane boyutu ve bunlar gibi özelliklerine bağlı olarak yapılmaktadır. BSSC (British Soil Classification System), USCS (Unified Soil Classification System) ve AASHTO (American Assoc of State Highway & Transportation Officials) sistemleri olarak zemin sınıfı belirlemede kullanılan sistemlerden bazılarıdır. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılması nedeniyle USCS sınıflandırma sistemi Şekil 5'de verilmektedir. Çalışmanın kapsamı içerisinde dikkate alınacak zeminlerin belirlenmesinde de esas alınan yönetmeliklerden olan Türk Deprem Yönetmeliği'nde öngörülen sınıflandırmalar ise Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmektedir.

Zemin Grubu	Zemin Grubu Tanımı	Stand. Penetr. (N/30)	Relatif Sıkılık (%)	Serbest Basınç Direnci (kPa)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)
(A)	1. Masif volkanik kayaçlar ve ayrışmamış sağlam metamorfik kayaçlar, sert çimentolu tortul kayaçlar 2. Çok sıkı kum, çakıl 3. Sert kil ve siltli kil	> 50 > 32	85–100 —	> 1000	> 1000 > 700 > 700
(B)	1. Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar 2. Sıkı kum, çakıl 3. Çok katı kil ve siltli kil	 30-50 16-32	65–85 —	500–1000 200–400	700–1000 400–700 300–700
(C)	1.Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar 2. Orta sıkı kum, çakıl 3. Katı kil ve siltli kil	 10–30 8–16	 35-65 	< 500 100–200	400-700 200-400 200-300
(D)	1.Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları 2. Gevşek kum 3. Yumuşak kil, siltli kil		 <35 	<100	< 200 < 200 < 200

Tablo 1. Türk Deprem Yönetmeliğinde (TDY) tanımlanan zemin grupları



Şekil 5. USCS'de verilen zemin gruplandırma (sınıflandırma) sistemi (Coduto, 2000; Aytekin, 2000).

Türk Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan zemin sınıfları ile ülkemizi de ilgilendiren Birleşik Avrupa (Eurocode–8) ve USA'daki yönetmeliklerle ülkemizde verilen sınıflar arasındaki farklılıkları görmek amacıyla karşılaştırma yapılarak söz konusu sınıflandırmalar Tablo 2' de verilmektedir.

Tablo 2.TDY-98 (1998) Eurocode-8, (2003) ve Uniform Building Code-(1997)'de
tanımlanan zemin sınıfları (Doğangün ve Livaoğlu, 2002; UBC, 1997; EC-8,
Part I 2003; ABYYHY, 1998).

TDY-98		UBC-97 (IBC)		EC-8-03			
Zemi sınıfı	n	Zemin sınıflarının tanımları	Zemin sınıfı	Tanım	Zemin sınıfı	Tanım	
Z1	•	Masif volkanik kayaçlar ve ayrışmamış sağlam metamorfik kayaçlar, sert çimentolu tortul kayaçlar v _s > 1000 Çok sıkı kum, çakıl v _s >700.Sert kil ve siltli kil v _s > 700	SA	Sağlam kayaçlar v _s >1500	A	Kayma dalgası hızı 800 m/s den daha büyük en az 5 m lik kaya ya da kayaya benzer jeolojik formasyonlar. ya 20	
	j≤15 m	Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar. v _s ≈700~1000, Sıkı kum, çakıl v _s ≈400~700; Çok	SB	Kayaç <i>vs</i> ≈760~1500		>800	
Z2	h ₁ >15 m h	katı kıl ve siltli kıl v _s ≈300–700 Tüf ve aglomera gibi gevşek volkanik kayaçlar, süreksizlik düzlemleri bulunan ayrışmış çimentolu tortul kayaçlar v _s ≈700~ 1000, Sıkı kum, çakıl v _s ≈ 400~700, .Çok katı kil ve siltli kil v _s ≈300~700	S _C	Çok sıkı ya da sert zemin veya gevşek kayaçlar <i>v</i> s ≈360~760	В	Mekanik özellikleri derinlikle artan en az birkaç on metre kalınlığında Çok yoğun kum, çakıl veya çok rijit kil, $v_{s,30}$ $\approx 360 \sim 800$	
	$h_1 \leq 15 \text{ m}$	Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar v_s $\approx 400 \sim 700$, Orta sıkı kum, çakıl, $v_s \approx 200 \sim 400$, Katı kil ve siltli kil $v_s \approx 200 \sim 300$					
Z3	15m< <i>h</i> ₁≤50m	Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar v _s ≈400~700, Orta sıkı kum, çakıl, v _s ≈200~400, Katı kil ve siltli kil v _s ≈200~300	SD	Sıkı ya da sert zemin v. ≈180~360	С	Kalınlığı birkaç on metreden yüzlerce metye ulaşan yoğun veya ortalama yoğunlukta kum, çakıl ya da rijit kil. $v_{s,30} \approx 180 \sim 360$	
	$h_1 \le 10 \text{m}$	Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları. $V_s < 200$, Gevşek kum $V_s < 200$, Yumuşak kil, siltli kil. $V_s < 200$.					
Z4 .	я	Yumuşak süreksizlik düzlemleri bulunan çok ayrışmış metamorfik kayaçlar ve çimentolu tortul kayaçlar v_s $\approx 400-700$, Orta sıkı kum, çakıl, $v_s \approx 200-400$, Katı kil ve siltli kil $v_s \approx 200-300$					
	h ₁ >50		~	Yumuşak ya da gevsek	D	Gevşek ya da ortalama kohezyonsuz zeminler (bir kısım koheyonlu zemin tabakası içerebilir) veya genelde gevşek olan fakat bir miktar sıkı kohezyonlu zemin içeren zeminler. $v_{s,30}$ <180	
	$h_I > 10 \text{m}$	Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın alüvyon tabakaları. $V_s < 200$, Gevşek kum $V_s < 200$, Yumuşak kil, siltli kil. $V_s < 200$.	S _E	zemin $v_s < 180$			
Bütün deprem bölgelerinde, yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden itibaren 10 metre içinde olduğu durumlarda, Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yumuşak, kalın		S _F	Özel değerlendirme gereken zemin sınıfları	Е	Alivyonlu tabaka içeren zeminler, $v_{s,30}$ >800 m/s olan bir tabaka üzerinde C ve D sınıfi 5~20 m lik zemin tabakası olan zeminler.		
-	al Yi gr bu da	alüvyon tabakaları. $V_s < 200$, Gevşek kum $V_s < 200$, Yumuşak kil, siltli kil. $V_s < 200$ diğer bir ifadeyle (D) grubuna giren zeminlerde <i>Sıvılaşma Potansiyeli</i> 'nin bulunup bulunmadığının, saha ve laboratuar deneylerine dayanan uygun analiz yöntemleri ile incelenmesi ve	-		S ₁	10 m den daha düşük bir kalınlıklta be plastisite indeksi yumuşak kil/silt tabakası içeren plastisite indeksi (PI>40) ve su içeriği yüksek olan zeminler	
S		sonuçıarın beigelenmesi zorunludur.			S ₂	Ozel killer, sıvılaşma potansiyeli olan zeminler veya diğer sınıflara girmeyen zeminler.	
• Zeminlerin mekanik özellikleri

Birçok heterojen malzeme gibi zemin de karmaşık mekanik özelliklere sahiptir. Yükleme türüne bağlı olarak mekanik özellikler farklı karakter gösterebilir. Zemin doğal halde üç eksenli basınç etkisinde olduğundan zeminin bu durumdaki dayanım ve şekildeğiştirme karakterlerinin belirlenmesi zeminin davranışı açısından yol gösterici olmaktadır (Şekil 6). Bilindiği gibi zeminin kesme dayanımı ve birim şekildeğiştirme ilişkisi zeminlerin en önemli mekanik özelliğidir. Bu sebeple zeminlerin davranışları kesme dayanımlarına bağlı olarak ifade edilmektedir (Kramer, 1996). Zeminin bu mekanik özelliklerini dikkate alırken boşluk suyu basıncı, zeminin boşluk oranı, doygunluk derecesi, vb diğer geoteknik parametrelerin de dikkate alıması gerekmektedir.



Şekil 6. Doğal ortamında zemin ve zeminde oluşan gerilmeler

Çeşitli araştırmacıların değişik zemin türleri için yaptıkları deneysel çalışmalardan elde ettikleri Poisson oranları ve elastisite modülleri Tablo 3 ve 4'te kaya türleri için ise Tablo 5'de verilmektedir.

Zemin Grubu	Zemin tipi	Bowles (1988)	Cernica (1995)	Converse (1962)	Hunt (1986)	Poulos (1975)
	Yumuşak (Soft)		0,40			
	Orta Sert(Medium)		0,30			0,30~0,35
	Sert (Hard)		0,25			
	Rijit plastik (Stiff plastic)			0,40~0,45		
Kil	Doygun (Saturated)	0,40~0,50				
	Doygun olmayan (Unsaturated)	0,10~0,30				
	Yumuşak normal konsolide					0,35~0,45
	Sert aşırı konsolide		-			0,10~0,30
	Kumlu	0,20~0,30	0,25			
Silt		0,30~0,35			0,30~0,35	
	Gevşek		0,20		0,20~0,35	0,35~0,40
Kum	Orta sıkı					0,30~0,35
	Sıkı	0,30~0,40	0,30	0,30~0,36	0,30~0,40	0,25~0,30
Calul	Gevşek		0,20			
Çaklı	Sıkı		0,30			

Tablo 3. Farklı zemin grupları için önerilen yaklaşık Poisson oranları (v) (Bardet, 1997).

Tablo 4. Farklı zemin grupları için önerilen elastisite modülleri (MPa) (Bardet, 1997).

Zemin Grubu	Zemin tipi	Bowles (1988)	Cernica (1995)	Converse (1962)	Hallam et.al. (1978)	Hunt (1986)
Organik	Bataklık çamuru (muck)			0,5~3,5		
Zeminl	Bataklık kömürü (peat)				0,4~1	
er					0,8~2	
	Çok Gevşek	2~15				
	Gevşek	2~25	3		1~3	2~4
	Orta sert	15~50	7			
	Sert				2,5~5	8~19
	Zayıf plastik			1,4~4		
Kil	Sert plastik			4,2~8		
	Yarı-Pekleşmiş				5~10	
	Yarı-Katı			6,9~14		
	Pekleşmiş	50~100	14			
	Kumlu	25~250	36			8~19
	Katı				30~100	
	Silt	2~20			3~10	2~19
	Yumuşak, az miktarda kill deniz silti				2~5	
Silt	Yumuşak, çok miktarda killi				0,5~3	
	Yumuşak				4~8	
	Yarı sert				5~20	
	Gevşek	10~25	15	10~21	20~80	10~29
V	Orta Sıkı				50~150	29~48
Kuili	Sıkı	50~81	80	52~83	49~78	48~77
	Siltli	5~20				
Calul	Gevşek	50~150	100			29~77
Çaklı	Siki	100~200	150	102~204		96~192
Calul	Kumsuz				100~200	
Çaklı	Kaba, Keskin uçlu				150~300	
Lös		14~60				14~58
Dumi	Gevşek	10~150				
Duzul	Orta sıkı	150~720				
tili	Sıkı	500~1440				

Kayao Tiirii	Converse (1962)		Hunt (1986)	
Kayaç Tulu	E (GPa)	υ	E (GPa)	υ
Granit	31~57	0,15~0,24		
Kısmen ayrışmış granit	7~14	0,15~0,24		
Kireç Taşı	21~48	0,16~0,23		
Bozulmamış volkanik ve metamorfik,			57~96	0,25~0,33
Bozulmamış kumtaşı ve kireçtaşı			38~76	0,25~0,33
Bozulmamış killi şist (shale),			10~40	0,25~0,33
Kömür			10~20	

Tablo 5. Çeşitli kaya türleri için önerilen yaklaşık elastisite modülü ile Poisson oranı değerleri

• Zeminlerin Dinamik Özellikleri

Statik yükleme durumunda bile, heterojen bir malzeme olması ve davranışını çok sayıda parametrenin etkilenmesi nedeniyle zeminlerin mekanik özelliklerini belirlemek kolay olmamaktadır. Buna ek olarak sismik hareket etkisinde bulunan zeminlerin davranışlarının gerçekçi olarak belirlenmesi ise daha zor olmaktadır.

Deprem etkisinde kalmış olan yapıların hasar durumları incelendiğinde, hasarlara neden olan en önemli etkenlerden birinin tekrarlı ve dinamik yük etkisinde kalmış zemin etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır (Kramer, 1996). Farklı karaktere sahip yüklerin etkisinde zemin farklı özellikler sergilemektedir. Bu durum özellikle deprem gibi dinamik yükler etkisinde kalan zeminlerin özellik ve davranışlarının belirlenmesine ne kadar dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Zemine ait dinamik özelliklerin belirlenmesiyle ilgili olarak birbirine göre çeşitli üstünlüklere sahip birçok yöntem literatürde bulunmaktadır. Bu yöntemler daha çok iki ana başlık altında incelenebilmektedir. Bunlardan birincisi *sismik yöntemler* olarak adlandırılmakta olup, bu yöntemler küçük şekildeğiştirme durumunda kullanılabildiği gibi, numune alınmasında güçlüklerle karşılaşılabilecek derinliklerdeki zemin davranışlarını incelemede tercih edilmektedir. İkincisi ise *Geoteknik yöntemler* olarak adlandırılmakta olup bu yöntemler zemin numuneleri üzerinde uygulanabilecek birçok deneyle, zemine ait mekanik özelliklerin hem küçük hem de büyük şekildeğiştirme durumlarında etkin olarak kullanılmaktadır (Kramer, 1996; Coduto, 2001; Barnes, 2000).

Rijitlik, sönüm, Poisson oranı ve yoğunluk gibi zemin özelliklerinden rijitlik ve sönüm gibi parametreler diğerlerine nazaran daha büyük öneme sahiptir (Kramer, 1996). Elastisite modülü (Tablo 4) 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 açabileceği bilinmektedir (Borja vd., 1999; Chao, 1996). Deneysel sonuçlar zeminin doğrusal şekildeğiştirme sınırının, şekildeğiştirme eşiğinin ancak 1/30'na karşılık geldiğini bu bölümden sonraki davranışın doğrusal olmadığını göstermektedir (Kramer,1996). Bu nedenle zeminlerin mekanik özelliklerinin hem doğrusal hem de doğrusal olmayan durumlar için ayrı ayrı belirlenmesinin gerekliliği açıktır.

Zemin yatay ya da düşey, statik ya da dinamik kuvvetler etkisi altında benzer göçme mekanizmalarına sahiptir. Kaya sistemleri haricindeki zemin sistemleri taneli bir yapıya sahip olduklarından, göçme büyük ekseriyetle tanelerin dayanım kaybını yitirmesiyle değil, tane arasındaki sürtünme, kohezyon gibi kuvvetlerin aşılmasıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla zeminlerin, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları için en belirleyici parametre kesme dayanımları olmaktadır (Coduto, 2001). Simetrik tekrarlı yükler etkisinde yer seviyesindeki bir zemin numunesi için kayma gerilmesi (τ) birim şekildeğiştirme ilişkisi (γ) Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. a) Harmonik tekrarlı yük etkisindeki zemin b) Eliptik tekrarlı döngü kabulüyle gerilme şekildeğiştirme arasındaki ilişki ve tekrarlı yükler etkisi altındaki viskoz sönüm kabulüyle sönüm oranının tespiti c) kayma gerilmesi ile şekildeğişitirme ilişkisi ile teğet ve sekant modüllerinin belirlenmesi Şekildeki grafikten görülebileceği gibi davranış açısından eğrinin eğimi ve döngünün genişliği önemli olmaktadır. Bu eğrinin eğimi ise kayma modüllerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Grafik üzerinde herhangi bir gerilme seviyesindeki teğetin eğimi teğet kayma modülünü (G_{tan}) ve bunların ortalaması ise sekant kayma modülünü (G_{sec}) ifade etmektedir. Döngünün genişliği tüketilen enerji ile ilişkilidir. Burada A_{loop} döngünün alanını, W_D tüketilen enerji miktarını, W_s ise en büyük şekildeğiştirme enerji miktarını göstermektedir. Böylece deneysel olarak tekrarlı yük etkisi için elde edilen bu grafik yardımıyla zeminlere ait sönüm oranları belirlenebilmektedir. Ek olarak sönüm değerleri zeminlerin konsolidasyon özelliklerine ve plastisite indisine (PI) bağlı olarak ifade edilebilmektedir (Kramer, 1996).

Gerçek durumda tekrarlı yükler etkisindeki bir zeminde zamana bağlı değişim ve buna bağlı olarak kayma gerilmesi ile açısal şekildeğiştirme arasındaki ilişki Şekil 8'dekine benzer olmaktadır. Bu durum için eşdeğer doğrusal bir model kullanılırsa literatürde sıkça karşılaşılan omurga (Backbone) eğrisi tanımlanmaktadır (Kramer, 1996). Daha önce de belirtildiği gibi sismik yöntemlerle gerilme şekildeğiştirme ilişkilerinin belirlenmesi ancak çok küçük şekildeğiştirme mertebeleri (%3x10⁻⁴) için geçerli olmaktadır. Bu durumda davranış tamamen doğrusal olduğundan tekrarlı yük etkisi altında (Şekil 8b) kayma gerilmesi ile açısal birim şekildeğiştirme arasındaki ilişki için belirlenecek kayma modülü en büyük kayma modülü ($G_{max} = \rho v_s^2$) olarak bilinmektedir (Şekil 8b). Fakat tekrarlı yük etkisi arttıkça buna bağlı birim şekildeğiştirme artmakta, kayma modülü ise artan yük etkisi ile azalmaktadır. Bu azalma grafik olarak Şekil 8c' de verilmektedir.



Şekil 8. a) Tekrarlı yük etkisi altında kayma gerilmesinin zamana bağlı değişimi ile buna bağlı kayma gerilmesi şekildeğiştirme ilişkisi b) tekrarlı yük etkisi için gerilme şekildeğiştirme ilişkisi ile en büyük ve sekant kayma modülünün belirlenmesi c) kayma modülünün artan şekildeğiştirme ile azalması

1.3. Deprem Dalgaları

Elastik bir ortamda dinamik bir hareketin yayılması dalga hareketi şeklinde olmaktadır. Sınırsız olarak kabul edilecek bir homojen ortamda iki tür dalga hareketi mümkündür. Bunlardan en hızlı olanı (primary wave) P-dalgası olarak nitelendirilen boyuna hareketle, ses dalgalarına benzer olarak ortamda zamana bağlı hacimsel (basınççekme sonucu) değişikliğe sebep olan dalgalardır. Ana dalga veya basınç-çekme dalgası olarak da nitelendirilen bu dalga hareketinde, yayılma doğrultusunda ve ona dik doğrultuda yerdeğiştirmeler ve normal gerilmeler meydana gelir (Şekil 9). Hızı daha düşük olan ve Sdalgası (Secondary wave) olarak bilinen ikinci tür dalgada, ortamda hacim değişikliği olmadan biçim değişikliği meydana gelir. Bu durumda dalga yayılma doğrultusuyla belirli bir açı yapmakta ve daha düşük bir hızla yayılmaktadır (Şekil 9). Bu sebeple yatayda kayma dalgası (SH), düşeyde kayma dalgası (SV) olarak da iki şekilde bilinmektedir (Şekil 9). Kayma dalgası sıvılarda yayılmadığından sıvılarda yalnızca P-dalgaları yayılabilir, S



dalgalarının yalnızca sıvılaşma özelliği bulunan zeminlerde de yayılma kabiliyetleri oldukça düşüktür.

Şekil 9. Sonsuz büyük kabul edilen bir ortamda P ve S dalgalarının yerdeğiştirme ve yayılma doğrultuları (Celep ve Kumbasar, 2004).

Deprem esnasında yapıya ilk olarak P-dalgası ulaşır, ses bombasına benzer bir etki göstererek ilk olarak bir çarpma hissi uyandırır. Birkaç saniye içersinde ise S-dalgaları birbirlerine dik düşey ve yatay doğrultularda zeminde biçim değişikliklerine yol açarak yapıya ulaşır ve asıl yıkıcı etkiyi yapı üzerinde gösterir (Bolt, 2001).

P-dalgasının ve S-dalgasının hızları (v_p ve v_s), sıkışmazlık modülü (k_b), hacimsel elastisite modülü (Bulk modülü) (E_c), Poisson oranı (υ), kayma modülü (G) ve yoğunluk (ρ) gibi parametrelerle ifade edilebilir.

$$G = \frac{E_c}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \qquad v_p = \sqrt{\frac{k_b + \frac{4G}{3}}{\rho}} ; \qquad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$
(1)

P dalgası ve S dalgası yanında, yeryüzüne yakın olarak yayılan ortamın bir sınır yüzeye sahip olması nedeniyle ortaya çıkan daha başka dalga türleri de mevcuttur. Bunlar yüzey dalgaları olarak nitelendirilir (Şekil 10).



Şekil 10. Elastik ortamda dalga türleri ve yayılma özellikleri

Şekil 10'da görülen Rayleigh ve Love dalgaları bu tür dalgalardır. Rayleigh dalgasında yerdeğiştirmeler serbest düzeyden derinlere indikçe azalmaktadır. Yerdeğiştirmeler ilerleme doğrultusunu içeren düzlemlerde bulunur. Yüzey dalgaları ise elips üzerinde hareket eder. İlerleme doğrultusuna dik bir yer değiştirme bileşeni mevcut değildir. Rayleigh dalgasının hızı, kayma dalgasının hızına (v_s) ve Poisson oranına (v) bağlıdır. Deprem dalgalarının incelenmesi sonucu bunların yayılma doğrultusuna dik yer değiştirme bileşenleri bulunan, SH-dalgasına benzetilebilecek türden dalgaları da içerdiği görülmüştür. Yapılan araştırmalar bu tür dalgaların yarı sonsuz homojen ortamın üstünde bir elastik tabaka bulunması durumunda meydana gelebileceğini ortaya çıkarmıştır (Celep

ve Kumbasar, 2004). Love dalgası olarak bilinen bu tür dalgalar kayma dalgasının üstteki tabaka içinde yansıması sonucu ortaya çıkmaktadır. Dalga hareketi dalga kılavuzu olarak nitelendirilebilecek tabaka içinde yayılırken, dalganın enerjisi bu tabaka içinde kalır. Diğer dalga çeşitlerinden farklı olarak, Love dalgasının hızı dalga boyuna bağlı olup, değeri üst tabaka ile altta bulunan ortamın kayma dalgası hızları arasında bulunur.

1.4. Literatür Araştırması

Teknik literatüre göre 1800'lerin son yarısından itibaren depolar hakkında çalışmalar yapılmaya başlanmış ve günümüze kadar da devam etmiştir (Doğangün, 1995). Depoların çeşitli yüklemeler altındaki davranışları; zemine göre konumlarına (gömme, yerüstü ve ayaklı), plandaki şekillerine (dairesel, dikdörtgen vb.) ve mesnetlendikleri zemin durumlarına göre değişmektedir. Bu tez kapsamına giren konularla ilgili yapılmış olan çalışmalar genel olarak sınıflandırılmakta ve aşağıda guruplar halinde sunulmaktadır.

• Yerüstü silindirik depolara ilişkin yapılan çalışmalar:

- Depo-Sıvı etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar (Veletsos ve Yang, 1976; Fischer, 1979; Fujita, 1981. Gedikli, 1996; Saatçi, 1998; Hosseini ve Mohojer, 2000).
- Depo-Zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar (Fujita, 1982; Baysal ve Nash, 1984; Yamamoto vd., 1984; Haroun, ve Abdel-Hafiz, 1986; Zaman ve Mahmood, 1988; Veletsos ve Tang, 1990; Chatterjee-Basu, 2001, Shrimali ve Jangid, 2002).
- Sıvı-Depo-Zemin etkileşimlerinin dikkate alındığı çalışmalar (Seeber vd., 1990; El-Zeiny, 1995; El-Zeiny, 2002; Cho vd., 2005).
- Depoda meydana gelebilecek salınım hareketinin dikkate alındığı çalışmalar (Housner, 1963; Bauer, 1964; Bauer, ve Siekmann, 1971; Aslam ve Godden, 1979; Fujita, 1981; Housner ve Haroun, 1980; Malhotra vd., 2000).
- Depo mesnet koşullarına bağlı olarak tabandaki kalkmaları dikkate alan çalışmalar (Arros ve Sogabe, 1984; Borton ve Parker, 1987; El-Zeiny, 1995; 2002; Meler, 2002)

- Depremin düşey bileşeninin dikkate alındığı çalışmalar (Marchaj, 1979; Veletsos ve Kumar, 1984).
- Depoların dinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlendiği çalışmalar (Haroun, 1983; Minowa, 1984; Hamdan, 2000).

• Yerüstü dikdörtgen depolara ilişkin yapılan çalışmalar:

- Depo duvarına etkiyen hidrodinamik basıncı belirlemeye yönelik çalışmalar (Hoskins ve Jacobsen, 1934; Housner, 1957; Doğangün ve Livaoğlu, 2004).
- Kütle-yay (Toplanmış Kütle) modellemesiyle depoların pratik deprem hesabına yönelik çalışmalar (Graham ve Rodriquez, 1952; Housner, 1963; Chen ve Barber, 1976).
- Duvar esnekliğinin dikkate alındığı çalışmalar (Priestley vd., 1986; Haroun ve Chen, 1989; Doğangün, 1995; Doğangün vd., 1997; Koh vd., 1998).
- Depo-zemin etkileşiminin dikkate alındığı çalışmalar (Doğangün, 1995; Kim vd., 1996; 1998; Doğangün vd., 1997; Koh vd., 1998).
- Depoda meydana gelen salınım hareketinin dikkate alındığı çalışmalar (Bauer ve Eidel, 1987; Haroun ve Chen, 1989).
- > Depoda taban izolasyonunun dikkate alındığı çalışmalar (Park vd., 2000)
- Deneysel çalışmalar (Koh vd., 1998).

• Yapı-zemin etkileşimine ilişkin yapılan çalışmalar:

Yapı zemin etkileşimi farklı disiplinlerde çalışan araştırmacıların çalışmalarına konu olmuş ve bu konuda çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bunları değişik şekillerde gruplamak mümkündür. Aşağıda bunlardan başlıcaları sunulmaktadır.

Yapı zemin etkileşimi için analitik ve sayısal yöntemlerin geliştirildiği ve incelendiği temel çalışmalar (Lysmer ve Kuhlmeyer, 1969, Veletsos ve Wei, 1971; Bielak, 1971; Veletsos ve Meek, 1974; Wong, 1975; Wong ve Luco, 1978; Dobry, ve Gazetas, 1984; Luco vd., 1986; Gazetas ve Tassoulas 1986a; 1986b; Veletsos vd., 1988; Wolf 1994; 1997; Wu ve Smith, 1995; Mylonakis ve Gazetas, 2000; Wu ve Chen, 2001).

- Kinematik etkileşimin incelendiği çalışmalar (Veletsos vd., 1988; Youssef, 1998; Stewart, 1996; Werkle, 1984; Lee, 1980; Lin, 1984; Inoue ve Kawano, 1984; Mendelson ve Alpan, 1976; Zhao, 1998; Aviles ve Perez-Rocha, 1998; Aviles ve Suarez, 2002).
- Eylemsizliğe bağlı etkileşimin dikkate alındığı temel çalışmalar (Veletsos vd., 1988; Youssef, 1998; Chao, 1996; Duan, 1999; Chuanromance, 1995; Wolf 1994 Halabian, 2001; Kumar, 1996; Stewart vd., 2003).
- Etkileşimde temelin gömülme etkisinin incelendiği çalışmalar (Lee, 1980; Lin, 1984; Inoue ve Kawano, 1984; Apsel ve Luco, 1987; Luco ve Wong, 1987; Stewart, 1996; Aviles ve Perez-Rocha, 1998; Youssef, 1998; Stewart vd., 1998; Aviles ve Perez-Rocha, 1998; Aviles ve Suarez, 2002).
- Temel sisteminin özel bir geometrik şekle sahip olmadığı sistemlere ilişkin temel yaklaşımların sunulduğu çalışmalar (Wong, 1975; Dobry ve Gazetas, 1977).
- Temel sisteminin kare ya da dikdörtgen plan geometrisine sahip olduğu durumlara ilişkin yaklaşımların sunulduğu çalışmalar (Wong ve Luco, 1978; Wolf., 1996; Gazetas ve Tassoulas, 1986a; 1986b).
- Temel sisteminin esnek olması durumunun irdelendiği çalışmalar (Warburton 1984; Novak ve El-Hifnawy 1984; Yamamoto vd 1984; Ambrosini vd., 2000; Kim, 2001).
- Temel sisteminin rijit bir zemin tabakasına oturan zemin sistemi üzerinde olduğu durumlara ilişkin yaklaşımların sunulduğu çalışmalar (Wolf, 1985; 1994).
- Zemin sisteminin düşeyde tabakalı olduğu durumların da hesaba katıldığı yaklaşımların sunulduğu çalışmalar (Mendelson ve Alpan., 1976; Yasui, 1980; Werkle, 1984; Sasaki vd., 1984; Inoue ve Kawano, 1984; Zhao, 1997; Kim, 2001).
- Zemin sisteminin yatayda tabakalı olduğu durumların da hesaba katıldığı yaklaşımların sunulduğu çalışmalar. (Dotson ve Velotsos, 1987; Veletsos ve Dotson, 1987).
- Yatayda tabakalı zeminlerin davranışlarının incelendiği çalışmalar (Dotson ve Veletsos, 1987; Apsel ve Luco, 1987; Veletsos ve Tang, 1990).
- Düşeyde tabakalı zeminlerin davranışlarının incelendiği çalışmalar (Mendelson ve Alpan, 1976; Yasui, 1980; Sasaki, 1984; Inoue ve Kawano, 1984; Werkle, 1984; Luco ve Wong, 1987; Zhao, 1997).

- Alt sistem yaklaşımlarından koni modelinin geliştirildiği ve değişik alanlara uyguladığı çalışmalar (Wolf ve Meek, 1992; 1993; 1994; Meek ve Wolf, 1994; Wolf ve Preisig, 2003; Takewaki vd., 2004).
- Etkileşiminde zemin için sonlu elemanların kullanıldığı çalışmalar (Kuhlameyer ve Lysmer, 1973; Hadjian vd., 1974a; 1974b; Luco ve Hadjian, 1974; Luco vd., 1974; Aydınoğlu, 1977; Youssef, 1988; Takewaki, 1998b; Wilson, 2002; Halabian ve El Naggar, 2002).
- Etkileşiminde zemin için sonlu ve sonsuz elemanların birlikte kullanıldığı çalışma (Yerli, 1998).
- Etkileşiminde zemin için sonlu elemanların ve sınırlar için sanal sınırlar kullanıldığı çalışmalar (Johnson vd., 1976; Kausel ve Roesset, 1978; Dumanoğlu, 1978; 1979; Nofal, 1988, Wolf ve Song, 1996; Pker ve Pender, 2000; Çakıroğlu, 2001; Shakib, 2003; Shakib ve Fuladgar, 2004).
- Yapı-zemin etkileşiminin bina türü yapıların ek dış merkezliliğinin ve burulma davranışının üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalar (Shakib, 2004, Shakib ve Fuladgar, 2004).
- Genleşme ve sıvılaşma özelliğine sahip zemin ortamının davranışının incelendiği çalışma (Yang, 1999).
- Zemin ile kazıklı temel arasındaki doğrusal olmayan davranış da dikkate alınarak etkileşimin incelendiği çalışma (Nofal, 1999).
- Sanal sınırlarla birlikte geçirgen sınırların kullanıldığı çalışmalar (Kausel ve Roesset 1975; Dumanoğlu, 1978;1979; Çakıroğlu, 2001).
- Etkileşimin birleşik (Hybrid) yöntemlerle incelendiği çalışmalar (Youssef, 1988; Eltaher, 1998).
- Yapı-zemin sisteminin lineer olmayan davranışının incelendiği çalışmalar (Bielak, 1971; Jennings ve Bielak, 1972; Chao, 1996; Kumar, 1996; Takewaki, 1998a; 1998b; Halabian, 2001, Halabian ve El-Naggar, 2002).
- Etkileşimde analitik yöntemlerin etkinliğinin deneysel olarak incelendiği çalışmalar (Chao, 1996; Stewart, 1996; Stewart vd., 1998; Kim, 2001).
- Etkileşimde frekans bağımsız yaklaşım kullanarak analitik yöntemlerin etkiliğinin incelendiği çalışmalar (Tsai vd., 1974; Wolf ve Somaini, 1986; Wolf, 1991a;1991b).

- Yapı için tek kütleli modelin kullanıldığı, zemin için ise çekme almayan Winkler zemin modeli kullanıldığı çalışmalar (Celep ve Güler 1990, Güler, 1992).
- Reaktör, viyadük ve köprü gibi özel sistemlerde yapı zemin etkileşimini inceleyen çalışmalar (Somaini, 1984; Endres vd., 1984; Elaidi, 1998; Halbritter vd., 2000; Mylonakis ve Gazetas, 2000; Wu ve Wang, 2001; Spyrakos ve Loannidis, 2003).

• Ayaklı depolarla ilgili yapılan çalışmalar :

- Ayaklı depoların statik tasarımına ilişkin olarak gerçekleştirilen çalışmalar (Gamphir, 1986, Allen vd., 1990; Dias ve Hattiarachchi, 1992; Jain ve Sameer, 1993).
- Ayak sisteminin davranışının ve bu sistemlerin rijitliklerin incelendiği çalışmalar (Dutta vd., 2000a; 2000b; 2001).
- Tek kütleli sistem kullanılarak salınımın ihmal edildiği çalışmalar (Chandrasekaran ve Krishna, 1954; Sonobe ve Nishikawa, 1969; Resheidat ve Suna, 1990; Haroun ve Temraz, 1992; Rai, 2002).
- Çok kütleli sistem yaklaşımı kullanılarak salınımın da dikkate alındığı çalışmalar (Housner, 1963; Shepherd, 1972; Dieterman, 1986; 1988; 1993; Durmuş ve Doğangün, 1992; Livaoğlu ve Doğangün, 2003)
- Eklenmiş kütle yaklaşımının kullanıldığı çalışmalar (Doğangün vd., 1997; Asthana, ve Sridhar 1997).
- Sıvı için tek kütleli sistem yaklaşımı ile zemin için standart alt sistem yaklaşımının kullanıldığı çalışmalar (Haroun ve Temraz, 1992; Galswarthy ve El-Naggar, 2000).
- Sıvının iki kütle, zeminin ise statik rijitliklerle tanımlandığı çalışmalar (Haroun ve Ellaithy, 1985).
- Stokastik yaklaşımlar kullanılarak ayaklı depoların deprem davranışlarının incelendiği çalışma (Tung, 1989).
- Taban izolasyonun kullanıldığı çalışmalar (Haroun ve Temraz, 1992; Shenton ve Hampton, 1999; Shrimali ve Jangid, 2003).
- Depo-sıvı-zemin etkileşiminin analitik olarak dikkate alındığı çalışmalar (Dieterman, 1986; 1988; 1993, Dutta vd., 2004).
- Depoların dinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlendiği çalışma (Marashi ve Shakib, 1997).

Yukarıda sınıflandırılmış çalışmalar irdelendiğinde ayaklı depolar için gerek sayısal olarak sıvı-depo etkileşiminin, gerekse de sıvı-depo-zemin etkileşiminin incelendiği çalışmalar için literatürde bir boşluğun olduğu görülmektedir.

• Depolarla ilgili standart ve yönetmelikler

Depolarla ilgili yapılan birçok bilimsel çalışmadan ve hasar görmüş çok sayıda depo için yapılan gözlemlerden yararlanarak çeşitli ülke ve kuruluşlar depoların hesap ve tasarımı ile ilgili yönetmelik ve standartları hazırlamışlardır. Bunlardan başlıcaları aşağıda sunulmaktadır:

- Depoların tasarımının tanımlandığı yönetmelikleri bulunan ülke ve topluluklar: ABD (Veletsos, 1984; ACI 371R-98, 1998; FEMA 368, 2001; FEMA 369, 2001). Avusturya (Fischer vd., 1991), Yeni Zelanda (Priestley vd., 1986), Japonya (AEDCHP, 1981) ve Avrupa Topluluğu (EC-8 Part 4, 2003).
- Ayaklı Depoların depreme göre tasarımını kapsayan yönetmelikleri bulunan ülke ve topluluklar: Yeni Zelanda (Priestley vd., 1986), ABD (ACI 371R-98, 1998, ACI 350.3, 2001), Avrupa Topluluğu (EC-8 Part 4, 2003).

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Teknik literatürde gömme, yerüstü, ve ayaklı depoların, statik ve betonarme hesaplarıyla, öngerilmeli betonarme depoların hesap ve inşa teknikleri için bir takım çalışmalar mevcuttur. Dolayısıyla literatürde depoların statik hesaplarıyla ilgili önemli bir eksiklik görülmemektedir. Ancak nadiren de olsa statik yükler etkisinde depolar hasar görebilmekte ya da yıkılabilmektedir. Bunlara örnek olarak Bursa DSİ 1. Bölge tesislerinde 50 tonluk 25 metre yüksekliğinde deponun rüzgar sebebiyle yapım aşamasında tamamen göçmesi (Ermutlu, 1964), Kanada'nın New-Brunswick şehrinde bir ayaklı deponun ilk kullanımda göçmesi (Lee ve Dawe, 1996) gibi örnekler verilebilir.

Statik yükler etkisinde nadiren görülen bu hasar ve göçme durumlarıyla, dinamik yüklemeler için sıkça karşılaşılmaktadır. Bunlara örnek olarak 1960 Şili depreminde (Steinbrugge ve Rodrigo, 1963) (Şekil 11), 1978 İzu-Oshima ve Miyagi depremlerinde (Minowa, 1980), 1971 San Fernando, 1987 Whittier (Knoy, 1995), 2001 El-Salvador

(Duran ve Miyajima, 2001) ve 2001 Bhuj (Hindistan) (Rai 2002) depremlerinde oluşan depo hasarları verilebilir.

Depoların depremlerde hasar görmelerinin yanında depremden sonra işlevlerini yerine getirebilmesi de son derece önemlidir. Zira 1964 Niigata ve Alaska (El-Zeiny, 1995), 1933 Long Beach, 1971 San Fernando (El-Zeiny, 2002) ve 2001 Bhuj (Hindistan) (Rai 2002) depremlerinde depoların hasar görmeleri nedeniyle, deprem sonrası işlevlerini yerine getirememeleri sonucunda yangınların söndürülememesi, gerekli içme ve kullanma suyunun temin edilememesi gibi etkenler bu felaketin boyutlarını artırmıştır. Dolayısıyla yapım ve fonksiyonları yönünden özellik arz eden ayaklı depoların depremden sonra da görevini yerine getirebilmesi için depreme dayanıklı olarak yapılması gereği açıktır.

Görüldüğü gibi, sıvı depolarının depremlerden sonra da görevlerini yerine getirebilmesi insan ve çevre sağlığı açısından son derece önemlidir. Hızlı kentleşme sürecine girmiş bulunan Türkiye'de içme ve kullanma sularını depolamak için bu tür yapılara duyulan ihtiyacın giderek arttığı da bir gerçektir. Diğer taraftan ayaklı depoların dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik çalışmaların yerüstü depoları ile karşılaştırıldığında yok denecek kadar az olup, yönetmeliklerde de ayaklı depolar için depreme göre tasarım bazen birkaç tanımla bazen de birkaç cümleyle geçiştirilmiştir. Dolayısıyla da ayaklı depoların depreme göre hesap ve tasarımı ile ilgili literatürde genel olarak bir eksiklik bulunmaktadır. Ancak bu konuların hepsini incelemek ve sonuçlandırmak çalışmanın kapsamını aşırı derecede artıracağından esas olarak, sıvı-ayaklı depo-zemin etkileşiminin deponun dinamik davranışları üzerindeki etkilerini incelemeye yönelinmiştir.

Sıvı-ayaklı depo-zemin etkileşimi konusunda daha önce de belirtildiği gibi çeşitli araştırmacılar tarafından bazı çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan, Dieterman (1986; 1988; 1993) tarafından yapılan çalışmalarda gerek depo ayak sistemi, gerekse de sıvı ve zemin analitik olarak modellenmiştir. Sözkonusu çalışmada statik rijilikler ile zemin etkileşimi dikkate alınmaya çalışılmaktadır. Haroun ve Ellaithy (1985) tarafından yapılan çalışmada ise sıvı etkileşimi analitik olarak iki kütleli modelle dikkate alınırken, zemin ötelenme ve dönme serbestlikleri için statik rijitlikler vasıtasıyla modellenmiştir. Haroun ve Temraz (1992) ise salınımın ihmal edildiği iki boyutlu bir model üzerinde ayaklı depoların elastik olmayan davranışlarını incelemişlerdir. Son olarak Dutta vd., (2004) tarafından yapılan çalışmada ise çeşitli ayak sistemlerine sahip depolar için zemin statik rijitliklerle modellenmiş sıvı ise iki kütleli olarak dikkate alınmıştır. Durum böyle olunca; ayaklı depoların deprem davranışlarının sıvı-yapı-zemin etkileşiminin gerek analitik gerekse de sayısal yöntemler aracılığıyla zeminin doğrusal olmayan davranışlarının da gerçekçi olarak dikkate alındığı çalışmalara ihtiyaç duyulduğu literatür araştırmasından ortaya çıkan bir gerçektir.

Bu çalışmada, literatürde genel sıvı ve zemin etkileşimlerini dikkate almada kullanılan yaklaşımların ayaklı depolar için etkinliklerini irdelemek, bu sayede bunların depoların dinamik davranışları üzerindeki etkilerini geliştirilen modeller yardımıyla incelemek ve sözkonusu etkileşimlerin pratik olarak nasıl dikkate alınabileceklerini uygulamaya sunmak amaçlanmaktadır. Bu nedenle geliştirilen modellerin çözümlemeleri zaman ve frekans ortamında çeşitli analitik yöntemler ve sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



Şekil 11. a)1960 Şili depreminde yıkılmış betonarme ve çelik ayaklı depo görünümleri.
 b)2001 Bhuj depreminde betonarme kabuk taşıyıcı sisteme sahip 500 m³
 eğilmeye bağlı çatlaklar oluşmuş ayaklı depo (merkeze 80 km mesafede), 265 m³ yıkılmış aynı tipte bir ayaklı depo (merkeze 20 km)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR BULGULAR VE İRDELEME

Yapı-zemin ve yapı-sıvı etkileşimleri bir çok yapı türü için söz konusu olduğundan çok farklı özelliklere sahip yapılar için bu etkileşimler gerçekleştirilmiş çalışmalarla incelenmiştir. Bu bölümde literatürde yapı-zemin ve yapı-sıvı etkileşimi için önerilen temel yaklaşımlardan yararlanılarak bunların ayaklı depolara uyarlanması sunulmaktadır. Bunun için yapı-zemin ve yapı-sıvı etkileşimleri ayrı ayrı başlıklar altında irdelenmektedir. Her bir etkileşim için çalışmanın kapsamı içinde kalınarak, yaklaşımlara ilişkin yöntem ve bağıntılar irdelenmekte ve ayaklı depolar için dikkate alınacak modeller tanıtılmaktadır.

2.1. Yapı-Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi

Yapı-Zemin etkileşimi problemi için ilk çalışmalar 1904'lerde Lamb tarafından gerçekleştirilenlere kadar uzanmaktadır (Filho, 1997). Bu çalışmadan yararlanarak Reissner 1936'da elastik homojen ve izotrop yarısonsuz ortam üzerinde bulunan dairesel rijit temel sisteminin hormonik yükleme altında etkileşimini incelemiştir (Filho, 1997). Daha sonra Merit ve Housner'în 1957'de temellerini attığı ve 1970'lere kadar süren dönemde hafif ve esnek yapılar için yapı-zemin etkileşiminin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisi incelemiştir. 1970'lerin başlarından itibaren gerçekleştirilen benzer çalışmalarda, konut, nükleer reaktör ve sıvı yapıları gibi ağır ve rijit yapılar üzerinde yapı-zemin etkileşiminin ne kadar etkili olduğu incelenmiştir (Youssef, 1998; Halbritter vd., 1998). Yapı- temel/zemin etkileşimi konusundaki çalışmalar, günümüze kadar çeşitli yapı ve temel/zemin sitemleri için devam etmiştir (Veletsos ve Wei, 1971; Jennings ve Bielak, 1971; 1972; Luco vd., 1974; 1986; Hadjian vd; 1974; Bielak, 1977; Dobry ve Gazetas, 1984; Gazetas ve Tassoulas, 1986a, 1986; Veletsos vd., 1988; Veletsos ve Tang, 1990; Wolf, 1985; 1994; Wolf ve Song 1996.a; 2002)

Bina türü yapıların statik ve dinamik davranışları incelendiğinde uygulamada geleneksel olarak yapı ile temel-zemin sistemi arasında meydana gelen etkileşim ihmal edilmektedir. Geleneksel yaklaşımda yapının temel sistemi vasıtasıyla zemine ankastre olarak mesnetlendiği kabul edilmektedir. Bu yaklaşım tarzı çok rijit karaktere sahip zemin türleri için temelin ankrajının da mükemmel derecede sağlanması durumunda gerçekçi

olabilir. Ancak kaya türü çok rijit zeminler haricindeki diğer zeminler (kil, kum, ayrışmış kayaçlar vb..) üzerine inşa edilmiş yapılarda bu kabul geçerliliğini yitirmektedir. Yapı ile zemin arasındaki etkileşimin dikkate alındığı bu tür zemin sistemlerinde yapının periyodunda uzama, yapıda iç kuvvetlerde azalma, yerdeğiştirmeler de ise artma eğilimi gözlenmektedir. Dolayısıyla artan yerdeğiştirmelerden dolayı ikinci mertebe etkileri de önemli olabilmektedir. Burada ikinci mertebe etkilerini önleyecek şekilde yerdeğistirmelerin kontrolü durumunda, yapıda oluşacak iç kuvvetlerin azalması nedeniyle davranış oldukça değişebilmektedir (Livaoğlu, 2003; 2004). Bütün bu iç kuvvelerin olumlu yönde değişimlerine ek olarak zeminin dikkate alınması sebebiyle ankastre kabulde ortaya çıkmayan davranış şekilleri de ortaya çıkabilmektedir. Sonuç olarak, zeminin ve temel sisteminin yapı davranışına olan etkilerinin dikkate alındığı yaklaşımlardan elde edilen sonuçlar arasında oldukça önemli farklılıklar bulunmaktadır. (Veletsos, 1988; Stewart, 1996; Youssef, 1998). Yapı-Temel-Zemin etkileşimiyle amaçlanan, bu bileşik sistemin davranışının statik etkiye, serbest yer hareketine ya da zamana bağlı değişen herhangi bir etkiye karşı göstereceği tepkinin incelenmesidir.

2.1.1. Yapı-Zemin Etkileşim Mekanizması

Yapı zemin etkileşiminde ilk olarak serbest alandaki yer hareketi ortam parametrelerinden bağımsız olarak belirlenmektedir. Bu hareketin karakterinin belirlenmesi *kontrol noktası* (Şekil 12) olarak bilinen ve etkileşimin dikkate alınılacağı ortamın geoteknik karakteristiklerini yansıtan uygun bir nokta seçilerek başlanmaktadır. Daha sonra yapı-zemin sistemine etkiyen zamana bağlı yük geçmişi bu nokta vasıtasıyla uygun şekilde tanımlanmaktadır. Kontrol noktasında kaydedilen yer hareketinin zemin ve temel sistemine bağlı olarak değişim (kinematik etkileşim) etkilerinin de hesaba katılması gerekebilmektedir. Zamana bağlı belirlenen yük geçmişi, yapı-zemin sisteminin eylemsizlik karakteristiklerine bağlı olarak yapıda ve zeminde çeşitli iç kuvvetlere, ötelenmelere ve dönmelere neden olmaktadır. Burada oluşacak olan iç kuvvet, ötelenme ve dönmeler belirlendikten sonra etkileşim tamamlanmış olmaktadır. Özellikle sığ küçük ve rijit temel sistemleri için kinematik etkileşimin serbest alan hareketini oldukça az değiştirdiği, bu nedenle söz konusu değişim etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde kaldığı belirtilmektedir (Veletsos vd., 1988). Yer hareketinin ve dalgaların yayılmasıyla ilgili daha

ayrıntılı bilgi için bu konudaki kaynaklara başvurulabilir. (Wolf, 1985; Oshaki, 1991; Pınar, 1995; Chopra, 2000; Livaoğlu, 2001; Celep ve Kumbasar, 2004).

Serbest alan için yer hareketi birçok parametreye bağlı olmakla birlikte düzgün yayılan formda da değildir. Bu nedenle zamanla değişen herhangi bir hareketin serbest alandaki karakterleri ile, yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki karakterleri birbirine göre farklılıklar göstermektedir (Şekil 12, 13). Deprem dalgaları kaynaktan yayılmaya başladıktan sonra çok daha farklı bir anda, farklı bir açıyla ve formda temel sistemine ulaşmaktadır. Dalgalar yayıldıkları farklı fiziksel ortamlardan geçerken dalga şiddeti ve faz açıları gibi karakterleri değişikliğe uğramaktadır. Özel olarak deprem kayıtlarının temel sistemleri veya farklı ortamlarda meydana gelmesi durumunda, buralardaki hareket ile serbest alandaki yer hareketi arasında çeşitli faktörler sebebiyle yer hareketi uyumsuzluk etkileri (incoherence effect) ortaya çıkmaktadır.



Şekil 12. (a) Serbest alan ve kontrol noktası ile (b) deprem hareketine maruz bir depo içi yapı-zemin etkileşiminin şematik gösterimi

Yapı sisteminin herhangi bir noktasında meydana gelen iç kuvvetlerin, birbirine çeşitli şekillerde bağlı yapı, temel ve zemin elemanlarının her birinin ve birleşim ara yüzeyinin özelliklerine göre farklı şekillerde etkilenebilecekleri daha önce de ifade edilmişti. Yapı-temel/zemin sisteminin birlikte çalışması temelde fiziksel olarak iki etkileşime ayrılabilir. Bunlar eylemsizliğe bağlı etkileşim (inertial interaction) ve kinematik etkileşim (kinematic interaction) olarak ifade edilmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Kinematik ve eylemsizliğe bağlı etkileşimin şematik gösterimi (Youseff, 1998; Stewart, 1999).

Kinematik Etkileşim

Kinematik etkileşim serbest alan hareketinin çeşitli sebeplerle, temel-zemin ara yüzeyinde bulunan her bir noktada farklı özellik göstermesi olarak ifade edilebilir. Serbest alan hareketinin değişkenlik göstermesine neden olan bu etkiler, genellikle temel sisteminin rijitliği ve geometrisi ile bu sistemin ve ortam özelliklerinin değişkenliği sebebiyle deprem dalgalarının dağılmasından (wave scattering) kaynaklandığı söylenebilir. Örneğin gömülü bir temel sistemi düşeyde yayılan SH-dalgasına maruz kaldığında, temel sisteminin içersindeki herhangi bir noktayla, serbest alan üzerindeki herhangi bir noktanın hareketinin karakterleri arasında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Serbest alandaki herhangi bir kontrol noktasında elde edilen hareket ile temel-zemin sistemi etkileşim yüzeyinde herhangi bir noktadaki hareket arasındaki bu fark kinematik etkileşim nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla temel boyutlarının büyük olması, temel gömülme oranının büyük ya da temel sisteminin esnek olması gibi durumlarda bu etkileşim önemli olabilmektedir (Halabian, 2001).

Harmonik bir dinamik kuvvet etkisindeki rijit dairesel temel sisteminin kinematik yerdeğiştirme (u_{fim}) , hız (\dot{u}_{fim}) ve ivmelerinin (\ddot{u}_{fim}) kontrol noktası (CPM) kaydedilen yerdeğiştirme (u_g) , hız (\dot{u}_g) ve ivmeleriyle (\ddot{u}_g) değişimi Şekil 14a'da görülmektedir.

Burada (Θ) indisi temel sisteminde meydana gelen dönme hareketini ifade etmektedir. Benzer değişim 1940 El-Centro depremi dikkate alınarak ta Şekil 14b'de verilmektedir (Mizuno, 1980; Veletsos, 1988).

Yapı temelinin maruz kaldığı yüksek frekanslı dalgalar, daha düşük frekanslı dalgalara göre farklı kinematik etkileşime sebep olmaktadır. Bu tür dinamik hareketlere en iyi örnek olarak deprem hareketi verilebilir. Kuvvetli yer hareketinde bulunan yüksek frekanslı dalgalar temel tarafından etkin bir şekilde filtre edilerek dalgaların temel sisteminin maruz kaldığı hareketin değişmesindeki rolünü diğer bir ifadeyle kinematik etkileşimin artmasını sağlamaktadır. Şekil 14b'de de görülebileceği gibi kontrol noktasındaki ivme kaydının temel sisteminin maruz kaldığı harekete göre değişim çok daha etkin görünürken bu durum hız değişiminde daha az etkili, yerdeğiştirme değişiminde ise hemen hemen ihmal edilebilir düzeyde kaldığı görülmektedir (Lee, 1980; Inoue ve Kawano, 1984; Veletsos vd., 1988). Burada a_0 boyutsuz frekansı, v_s kayma dalgası hızını, α deprem dalgalarının yayılma doğrultularının düşeyle yaptıkları açıyı, c sistemde meydana gelen dalganın yataydaki hızını ve r_0 dairesel rijit temelin yarıçapını göstermek üzere aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$c = \frac{v_s}{\sin \alpha} \quad \tau = \frac{r_0}{v_s} \qquad \tau^* = \frac{r_0}{c} = \frac{r_0}{v_s} \sin \alpha = \tau \sin \alpha \tag{2}$$

$$a_0 = \frac{\omega r}{v_s} \quad a_0^* = \omega \tau^* = a_0 \sin \alpha \tag{3}$$



Şekil 14. Eğimli bir şekilde ilerleyen kayma dalgasına maruz rijit bir temel sisteminde kinematik etkileşim için meydan gelen değişimler

Yapı-zemin etkileşiminde, kinematik etkileşimin hangi parametreler üzerinde etkili olduğunu belirlemeye yönelik birçok araştırma bugüne kadar yapılmıştır. Bunlardan sıkça karşılaşılanı temel gömülme derinliğinin kinematik yerdeğiştirmeye etkisidir. Roesset'e (1980) göre *e* temel gömülme derinliğini, r_0 temel yarıçapını (ya da eşdeğer yarıçapı) göstermek üzere, gömülme oranının $e/r_0 < 0,5$ olduğu durumlarda kinematik etkileşimden kaynaklanan etkilerin ihmal edilebileceği, bu orandan daha büyük oranlarda ise kinematik etkileşimin hesaba katılması gerektiği ifade edilmektedir (Halabian, 2001).

Kinematik etkileşim sebebiyle yapı temel sisteminde meydana gelen yer hareketinin analitik olarak ifade edilebilmesi için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan Luco (1969) ve Elsabee (1977) gibi araştırmacıların yaptığı çalışmalarda; gömülme derinliğine bağlı olarak harmonik eğimli düşey SV dalgasına maruz temel sistemlerinde, büyütme fonksiyonlarının ötelenme ve dönme hareketleri için aşağıdaki bağıntılarla belirlenebileceği ifade edilmektedir.

$$I_{u}(\omega) = \begin{cases} a_{0} \leq \frac{2}{3}a_{s} & i \zeta in \ \cos\left(\frac{H}{r}a_{0}\right) \\ a_{0} > \frac{2}{3}a_{s} & i \zeta in \ 0,453 \end{cases} \qquad I_{\theta}(\omega) = \begin{cases} a_{0} \leq a_{s} & i \zeta in \ \frac{0,257}{r} \left[1 - \cos\left(\frac{H}{r}a_{0}\right)\right] \\ a_{0} > a_{s} & i \zeta in \ \frac{0,257}{r} \end{cases}$$
(4)

Burada *H* zemin derinliğini, (a_s) $(a_s = \pi r/2e)$ zemine ait boyutsuz harmonik kesme titreşim frekansını göstermektedir (Halabian, 2001).

Temel gömülme derinliği konusunda deprem hareketi için kinematik etkileşimin nasıl değiştiğine ilişkin çalışmalar da literatürde mevcuttur. Bu çalışmalardan Elsabee ve Morray (1977) düşey olarak yayılan SH dalgalarının kütlesiz rijit temeldeki kinematik etkileşimi ortaya koyabilmek için transfer fonksiyonunu büyütme katsayılarının boyutsuz frekansla değişimini belirlemeye çalışmışlardır. Temelin gömülü olduğu, zeminin viskoelastik olarak kabul edildiği, tabaka kalınlığının temel yarıçapının 2,5 katı olarak dikkate alındığı model üzerinde hem ötelenme hem de dönme serbestlik dereceleri için transfer fonksiyonu büyütmelerini gömülme oranları 0,5 ve 1,0 için belirlemişlerdir (Şekil 15). Benzer bir çalışmada ise Day (1977) tarafından elastik yarısonsuz ortamda üç farklı derinlikte gömülü silindirik rijit temeller sonlu elemanlarla modellenerek serbest alan hareketine göre temel hareketinin değişimi incelenmeye çalışılmış, elde edilen transfer fonksiyonuna ait değişimler Şekil 16'da verilen formda ortaya çıkmıştır. Bu grafiklerde verilen düşey eksen transfer fonksiyonu büyütme katsayılarını yatay eksen ise boyutsuz frekans değerlerini (a_0) göstermektedir (Stewart, 1996; Hallabian, 1998).



Şekil 15. Elsabee ve Morray'e göre (1977) tabaka kalınlığı (H=2,5r) olan elastik ortama gömülü rijit silindirik temelin transfer fonksiyonuna ait büyütme katsayılarının değişimi (Hallabian, 2001).



Şekil 16. Day'e göre (1977) elastik ortama gömülü rijit silindirik temelin transfer fonksiyonuna ait büyütme katsayılarının değişimi (Stewart, 1996; Hallabian, 2001).

Rijit temel sistemine sahip bir yapı sisteminin zemin içinde ya da üstünde bulunmasının serbest alan hareketinin değişimine sebep olacağı daha önce de belirtilmişti. Bunlara ek olarak temel sisteminin tabakalı zemin sistemi üzerinde olmasının kinematik etkileşim açısından göz önüne alınması gereken bir etki olmadığı bilinmektedir (Werkle, 1984). Temel-zemin sisteminin boyutu ile maruz kaldığı dinamik etkinin dalga boyuna oranın 1 den çok küçük olduğu durumlarda kinematik etkileşimin etkilerinin ihmal edilebileceği bilinmektedir (Trifunac, 2000). Kısaca kinematik etkileşim serbest alan hareketinin yapı sisteminin rijitliğine bağlı olarak değişimi ile ifade edildiğinden, bu olayı potansiyel olarak etkileyen parametreler aşağıda sıralanmaktadır.

- 🕨 Taban plağı rijitliği ve düzlemi (Mendelson ve Alpan, 1976).
- Temelin zemine gömülme şekli ve derinliği (Lee, 1980; Lin, 1984; Inoue ve Kawano, 1984; Werkle, 1984).
- Dalgaların saçılması ya da dağılması (Inoue ve Kawano, 1984).
- Eylemsizliğe Bağlı Etkileşim

Eylemsizliğe bağlı etkileşim, yapıda titreşimlere bağlı olarak oluşan eylemsizlik kuvvetleri sebebiyle meydana gelen taban kesme kuvveti ve taban eğilme momentlerinin, yapı sisteminin temel-zemin ara yüzeyinde, serbest alana göre dönme, yatay ve düşey yerdeğiştirme ile burulma serbestlikleri doğrultularında rölatif yerdeğiştirmelere sebep olmasıyla ortaya çıkmaktadır (Şekil 17). Bu tür serbestlik derecelerinin de yapı serbestliklerine eklenmesiyle yapı taşıyıcı sistemi ile temel-zemin sistemi arasındaki eylemsizliğe bağlı etkileşim de dikkate alınmış olacaktır. Eylemsizliğe bağlı etkileşim bütün yapılar üzerinde etkili olmasına rağmen daha çok narin ve/veya yüksek yapılar üzerinde önemli ölçüde etkili olabilmektedir (Halabian, 2001; Livaoğlu 2003).



Şekil 17. Eylemsizliğe bağlı etkileşim için yatayda ötelenme ve dönme serbestliklerini içeren basitleştirilmiş bir mekanik model

Kinematik etkileşim temel sistemi çok büyük, esnek ve derin olmayan bir çok yapı sisteminde ihmal edilebilmektedir. Bu tür sistemlerde en önemli etkileşim parametresinin eylemsizliğe bağlı olduğu yapılan teorik ve uygulamalı çalışmalarda ortaya konulmuştur (Stewart, 1996; Stewart vd., 1999a; 1999b; Chao, 1996).

• Yönetmeliklerde Yapı-Zemin Etkileşimi

Yapı-zemin etkileşimine ait ilk çalışmalar 1900'lü yılların başlarına kadar ulaşmasına rağmen günümüzde kullanılan yöntemlere ilişkin ilk çalışmalara 1950'lerin sonlarında rastlanmaktadır. ATC (Applied Technology Council) tarafından 1971'de San-Fernado depreminden sonra yapı-zemin etkileşiminin yapılar için dikkate alınması maksadıyla standartlarda uygulanabilecek ilk çalışmalar başlatılmıştır. Bu dönemdeki çalışmalar sonucu, Veletsos ve ekibinin geliştirmiş olduğu modal analiz sonuçlarının değiştirilerek kullanıldığı bir yöntem ATC 3-06, 1978 "Tentative provision for the Development of Seismic Regulation for Buildings" yönetmeliğinde önerilmiştir. ABD'de yaygın olarak kullanılan ve ilk olarak 1991'de uygulamaya giren NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) yönetmeliğinde yine ATC3-06'da önerilen yöntem, bina türü yapılarda zemin etkileşiminin hesaba katılması için önerilmektedir. 1991 de uygulamaya başlatılan "Uniform Building Code" (UBC, 1991) yönetmeliğinde ise S4 sınıfı üzerinde inşa edilen ve 0,7 s den daha yüksek titreşim periyoduna sahip yapılarda yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasının gerekliliği belirtilmiş olmasına karşın, herhangi bir matematik model ya da yöntem önerilmemiştir. Gerek ATC-1978 gerekse NEHRP (FEMA, 2001) de yapı zemin etkileşimi için sadece eylemsizliğe bağlı etkileşim dikkate alınmakta kinematik etkileşim etkileri ise bu yönetmeliklerde ihmal edilmektedir (Kumar, 1996; Stewart vd., 2003). Meksika için hazırlanan deprem yönetmeliğinde ise Veletsos'a ait çözüm yöntemi kullanılmaktadır (Rodriguez, 2000).

Avrupa Birliği için 1994'de yürürlüğe giren Eurocode 8'de de temelini Veletsos ve ekibinin attığı bir yöntemle yapı-zemin etkileşiminin aşağıdaki durumlarda dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir (EC-8, 2003).

- İkinci mertebe etkilerinin söz konusu olduğu yapılarda
- Silolar, köprüler ve deniz yapıları gibi ağır ya da derin temel sistemlerine sahip yapılarda
- Kuleler ve bacalar gibi narin yapılarda

- Ortalama kayma dalgası hızı $v_s=100$ m/s olan, çok az rijitliğe sahip zeminler üzerinde inşa edilen yapılarda
- Düşük kayma dalgası hızlarına sahip S1 ve S2 gibi zemin sınıfları (bkz Tablo 2.) üzerinde inşa edilen yapılarda (EC-8, 2003)
- Temel sistemlerinin deformasyon yapabilme riskinin bulunması durumunda

Türkiye için 1998'de yürürlüğe giren "Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar hakkında Yönetmelikte" ise yapı-zemin etkileşimine ilişkin herhangi bir kısıtlama ya da yönlendirme bulunmamaktadır (ABYYHY, 1998).

2.1.2. Yapı-Zemin Etkileşimi Hesap Yöntemleri

Yapı sistemlerinin hesabında geleneksel olarak temel sistemi ile zemin sistemi arasındaki ilişkinin oldukça rijit olduğu, bu sebeple bu noktadaki yapı sisteminin temelzemin sistemine göre rölatif olarak yerdeğiştirme yapmadığı, diğer bir ifadeyle yapı-temel sisteminin zemine ankastre olarak bağlı olduğu kabul edilmektedir. Fakat zemine ait dayanımın düşük değerler alması veya zeminin esnekliğinin artması, temel sisteminin yeterince rijit olmaması ya da çok büyük olması gibi koşullarda bu kabul gerçek durumdan uzaklaşmaktadır. Bu gibi koşullarda temel-zemin sisteminin yapıya olan etkisinin dikkate alınması, yapı sisteminin ankastre olarak zemine bağlandığı duruma göre elde edilen iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerlerinde oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Örnek olarak Mexico City (1985) depreminin özellikle 10~12 katlı yapılar üzerinde etkili olduğunu, bu yapıların ankastre olarak çözümünde doğal titreşim periyotlarının 1,0 s civarında olmasına karşın bir çok yapının etkileşim sebebiyle periyotlarının 2,0 s civarına kadar uzadığı ve bu nedenle büyük kayıpların yaşandığı bilinmektedir (Mylonakis ve Gazetas, 2000). Yine Adana-Ceyhan depreminde zemin etkileşiminin önemli rol oynadığı (Çelebi, 1998) ve son olarak ise 1999 Kocaeli depreminde birçok bölgede bu durumla karşı karşıya kalındığı bilinmektedir.

Etkileşim mekanizmasının çözümü için genel olarak yöntemleri ikiye ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki, zeminin ve yapının ayrı ayrı alt sistemler olarak düşünülüp, zemine ait rijitlik ve sönüm mekanizmalarının belirlenerek zeminin mevcudiyetinin üst yapıya etkisinin incelendiği alt sistem yaklaşımlarıdır. Burada alt sistem mantığıyla aynı olmakla birlikte zeminin ankastre olduğu durumda elde edilmiş değerleri, zemin sisteminin rijit ve sönüm mekanizmasına bağlı olarak modal değerlerin değiştirilmesiyle, yapı-zemin etkileşiminin dikkate alındığı değiştirme yöntemlerinden de bahsetmek uygun olmaktadır. Bu yöntemlerden ikincisi ise her iki sistemin de birlikte düşünülerek etkileşimin hesaba katıldığı doğrudan çözüm yöntemleridir (Tablo 6). Buradaki yöntemlerle etkileşime bağlı davranışları statik ve dinamik yükleme durumları için ayrı ayrı incelemek daha uygun olmaktadır.

Yukarıda ifade edilen her iki çözüm yaklaşımının birbirine göre üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır. Örnek olarak alt sistem yaklaşımlarının en önemli üstünlüklerinden biri temel-zemin sisteminin birkaç yay ve sönümle ifade edilerek sistemin çözümü için gerekli işlemlerin kısaltılması dolayısıyla hesapta basitlik sağlanmasıdır (Johnson vd., 1976, Wolf ve Song, 2002). Doğrudan çözüm yöntemlerinin üstün yönleri arasında ise zemin davranışını daha gerçekçi olarak temsil edebilmesi, zeminde oluşan gerilme dağılımın kolaylıkla belirlenebilmesi ve zeminin doğrusal olmayan davranışını da dikkate alınabilmesi gösterilebilir (Luco vd., 1974; Hadjian vd., 1974; Wolf, 1996; Borja vd., 1999). Bu yöntemlerden doğrudan çözüm yöntemleriyle çözümleme frekans ve zaman ortamında yapılabileceği gibi, her iki ortamda kolaylık sağladıkları durumlar için kullanıldıkları birleşik (Hybrid) yaklaşımlar da bulunmaktadır. Burada ifade edilen çözüm yöntemleri ve sınırlılıkları Tablo 6'da verilmektedir.

Metot	Үарı	Zemin	Çözümleme Prosedürü
	Doğrusal	Doğrusal	Zaman ortamı
Değiştirilme Yöntemleri	Doğrusal olmayan		Tepki spektrumu
			Tepki spektrumu
	Doğrusal	Doğrusal	Zaman ortamı
Alt Sistem Yaklaşımları	Doğrusal olmayan	Doğrusal olmayan	Frekans ortamı
			Tepki spektrumu
	Doğrusal	Doğrusal	Zaman ortamı
Doğrudan (Direkt) Çözüm Yöntemler	Doğrusal olmayan	Doğrusal olmayan	Birleşik (HYBRID) yaklaşımlar
			Tepki spektrumu

Tablo 6. Yapı-zemin etkileşimindeki hesap yöntemleri

Zeminin statik yükler altında gösterdiği davranışın, dinamik yükler altındakine göre çok farklı olduğu daha önce de belirtilmişti. Ancak dinamik davranışın yorumlanabilmesi için statik davranışın bilinmesi gerekli olmaktadır. Bu nedenle etkileşim statik ve dinamik olmak üzere aşağıda iki başlık halinde sunulmaktadır.

• STATİK ETKİLEŞİM

Yapı-temel sistemlerin zeminle statik olarak etkileşimlerinin hesaba katılması Winkler'in ortaya koyduğu yöntemle yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu yaklaşımda zemin taşıma gücüne bağlı olarak sadece düşeyde yaylarla temsil edilmeye çalışılmıştır. Sözkonusu yaklaşımda temel sisteminin yataydaki yerdeğiştirmesini ihmal etmesi ve temel sistemi altında her noktanın eşit rijitlikle ifade edilmesi gibi zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu eksiklikler daha sonra yapılan çalışmalarla giderilmeye çalışılmış ve bu konuda yeni yaklaşımlar önerilmiştir (Coduto, 2001). Ancak temelde Winkler teorisi zeminin temel sistemine karşı düşey tepkisi üzerine inşa edildiğinden, bu yöntem zemin sisteminin statik tepkisini tam olarak yansıtmadığı gibi, dinamik etkileşime kaynak olabilmesi için de önemli eksiklikler içermektedir (Resheidat, 1984).

Alt sistem yaklaşımı düşünüldüğünde yapı temelinin üzerinde bulunduğu zeminin statik haldeki rijitlik değerlerinin bilinmesi gerekir. Herhangi bir yarı sonsuz elastik ortam üzerinde bir disk düşeyde statik bir yük etkisinde kalırsa elastik ortamda düşey yerdeğişmelerin derinlikle değişimi birçok teoriyle ifade edilmeye çalışılmıştır. Temel olarak teoriler arasında büyük farklılıklar olmamakla beraber bu durum Boussinesq teorisine göre Şekil 18'deki gibi ifade edilebilir (Wolf, 1994). Teoriye göre elastik ortamın rijitlik karakteristiğini ifade edebilmek için taralı alan içerisinde kalan koninin rijitliği sistemin statik olarak düşey serbestlik derecesi için düşey rijitliği olarak kabul edilebilir.



Şekil 18. Boussinesq teorisine göre elastik bir ortam (Poisson oranı v = 1/3) üzerinde statik olarak yüklü bir diskin ortamda oluşturduğu yerdeğiştirmelerin yüzeydeki yerdeğiştirmeye göre derinliğe bağlı değişimleri

Benzer şekilde yatay ve düşey ötelenme ile dönme ve burulma serbestlik dereceleri için yapılacak olan yüklemelerde meydana gelecek konik etki alanları Şekil 19'da gösterildiği gibidir (Wolf, 1994).



Şekil 19. Çeşitli serbestlik dereceleri için kabul edilen koni modelleri, bu modellere ait tepe açısı şekilleri, serbestlik dereceleri için dalga yayılma doğrultuları ve zeminde oluşan gerilme şekilleri (Wolf, 1994).

Burada koni şeklindeki zemin kısımlarının rijitlik özelliklerinin belirlenmesinde, disk yarıçapı (r_0), uygulanan kuvvetin ya da hareketin doğrultusu, zeminin mekanik özellikleri gibi parametreler etkili olmaktadır. Her bir hareket ya da kuvvet doğrultusu ile mekanik özelliklere göre Şekil 19'da verilen konilerin, eşdeğer yarıçapları ve bunlara bağlı olarak dikkate alınması gereken ek kütleler Tablo 7'de verilmektedir. (z_0/r_0) oranının çeşitli Poisson oranları için aldığı değerler ise Tablo 8'de verilmektedir.

Koni tipi	Hareket	Eşdeğer yarıçap (r ₀)	$\frac{z_0}{r_0}$ oranı	Poisson orani (v)	Dalga hızı v	Ek kütle ΔM
Ötelenme	Yatay	$\sqrt{\frac{A_0}{\pi}}$	$\frac{\pi}{8}(2-\upsilon)$	Her (v) için	Vs	0
$K = \rho v^2 A_0 / z_0$	D	$\overline{A_0}$	π (v) ²	$\upsilon \leq 1/3$	v_p	0
$C = \rho A_0$	Düşey	$\sqrt{\frac{6}{\pi}}$	$\frac{1}{4} (1-v) \left(\frac{1}{v_s} \right)$	$1/3 < \upsilon \le 1/2$	$2v_s$	$2,4(v-1/3)\rho A_0r_0$
$\frac{\text{Dönel}}{K_{\theta} = 3\rho v^2 I_0 / z_0}$	Buruluma	$\sqrt{rac{2I_0}{\pi}}$	$\frac{9\pi}{32}$	Her (v) için	Vs	0
$C_{\theta} = \rho v I_0$	Dönme	$\sqrt{4I_0}$	$\frac{9\pi}{32}(1-\upsilon)\left(\frac{\nu}{\nu}\right)^2$	$\upsilon \leq \frac{1}{3}$	v_p	0
$M_{\theta} = \rho I_0 z_0$		Vπ		$1/3 < \upsilon \le 1/2$	$2v_s$	$1, 2(v-1/3)\rho I_0 r_0$

Tablo 7. Koni modeli ile elde edilmiş temel-zemin sisteminin özellikleri (Wolf, 1994).

Hareket	v=0	$\upsilon = \frac{1}{4}$	$v = \frac{1}{3}$	$\upsilon = 0, 4$	v = 0,45	$\upsilon = \frac{1}{2}$
Yatay	$\frac{\pi}{4} = 0,785$	$\frac{7\pi}{32} = 0,687$	$\frac{5\pi}{24} = 0,654$	$\frac{\pi}{5} = 0,654$	$\frac{31\pi}{160} = 0,609$	$\frac{3\pi}{16} = 0,609$
Düşey	$\frac{\pi}{2} = 1,571$	$\frac{9\pi}{16} = 1,767$	$\frac{2\pi}{3} = 2,094$	$\frac{3\pi}{5} = 1,885$	$\frac{11\pi}{20} = 1,728$	$\frac{\pi}{2} = 1,571$
Burulma	$\frac{9\pi}{16} = 1,767$	$\frac{81\pi}{128} = 1,988$	$\frac{81\pi}{128} = 1,988$	$\frac{3\pi}{4} = 2,356$	$\frac{27\pi}{40} = 2,121$	$\frac{9\pi}{16} = 1,767$
Dönme	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$	$\frac{9\pi}{32} = 0,884$

Tablo 8. Koni (z_0/r_0) oranının Poisson oranına göre değişimi (Wolf, 1994).

Tablo 9. Rijit dairesel temel zemin sistemlerinin, yüzeysel, gömülü ve rijit bir tabaka üzerindeki zemin sistemleri için karşılaştırmalı statik rijitlikler (Livaoğlu ve Doğangün, 2004).

Rijitlik	Yüzeysel temel kabulü	Gömülü Temel Kabulü		
Yatay (K_H)	$\frac{8Gr_0}{2-\upsilon}$	$\frac{8Gr_0}{2-\upsilon} \left(1 + \frac{1}{2}\frac{r_0}{d}\right) \left(1 + \frac{e}{r_0}\right) \left(1 + \frac{e}{d}\right)$		
Düşey (K_v)	$\frac{4Gr_0}{1-\nu}$	$\frac{4Gr_0}{1-\upsilon} \left(1+1.3\frac{r_0}{d}\right) \left(1+0.54\frac{e}{r_0}\right) \left(1+\left(0.85-0.28\frac{e}{r_0}\right)\frac{e/d}{2-e/d}\right)$		
Dönme (K_R)	$\frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{1}{6}\frac{r_0}{d}\right) \left[1 + 2.3\frac{e}{r_0} + 0.58\left(\frac{e}{r_0}\right)^3\right] \left(1 + 0.7\frac{e}{d}\right)$		
Burulma (K_T)	$\frac{16Gr_0^3}{3}$	$\frac{16Gr_0^3}{3} \left(1 + \frac{1}{10}\frac{r_0}{d}\right) \left(1 + 2.67\frac{e}{r_0}\right)$		
Dönme ile yatay serbestlik arasındaki etkileşim		$K_{HR} = \frac{e}{3}K_H$		
Burada; G: Kayma modülü , r_0 : dairesel temel yarıçapı, v: Poisson oranı, d: rijit bir tabaka				

Burada; G: Kayma modülü , r_0 : dairesel temel yarıçapı, v: Poisson oranı, d: rijit bir tabaka üzerindeki zemin yüksekliği, e: temelin gömülme derinliğidir.

		Yatay (K_V)	Düşey (K_H)	Dönme (K_R)	Burulma (K_T)	
Dairesel (r_0)		$\frac{8Gr_0}{2-\upsilon}$	$\frac{4Gr_0}{1-\upsilon}$	$\frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)}$	$\frac{16Gr_0^3}{3}$	
birtgen 22a)	2b doğ	$\frac{Gb}{2-\nu}\left[6,8\left(\frac{a}{b}\right)^{0.65}+0,8\frac{a}{b}+1,6\right]$	$Gb\left[3\left(a\right)^{0.75}+16\right]$	$\frac{Gb^3}{1-\upsilon} \left[3,73 \left(\frac{a}{b}\right)^{2,4} + 0,27 \right]$	$Gb^{3}\left[4,25\left(\frac{a}{b}\right)^{2,45}+4,0\right]$	
Dikdö (2b≤	2a doğ	$\frac{Gb}{2-\upsilon}\left[6,8\left(\frac{a}{b}\right)^{0.65}+2,4\right]$	$\left[\frac{1-v}{1-v}\right]^{3,1}\left(\frac{b}{b}\right)^{-1,1}$	$\frac{Gb^3}{1-\upsilon} \left[3, 2\frac{a}{b} + 0, 8 \right]$		
eometri ≤2a)	2b doğ	$K_{II} = \frac{2Ga}{2-\nu} \left[2 + 2, 5 \left(\frac{A_b}{4a^2} \right)^{0.05} + 0.8 \frac{a}{b} + 1.6 \right]$	$\frac{2Ga}{0.73+1.54(\frac{A_0}{A_0})^{0.75}}$	$\frac{2,9G}{1-\upsilon}I_{0b}^{0,75}\left(\frac{a}{b}\right)^{0,15}$	$35GU^{0.75}\left(\frac{b}{b}\right)^{0.4}\left(\frac{I_0}{I_0}\right)^{0.2}$	
Farklı g (2b⊴	2a doğ	$K_H - \frac{0,2Ga}{0,75-\upsilon} \left[1 - \frac{b}{a} \right]$	$1-v\left[3,2,2,3,3,4,4a^2\right]$	$\frac{G}{1-\nu}I_{0a}^{0,75}\left(\frac{a}{b}\right)^{0.25}\left[2,4+0,5\frac{b}{a}\right]$	$\overline{b}, \overline{b}$	

Tablo 10. Dairesel, dikdörtgen ve farklı geometriye sahip temel sistemleri için statik rijitlik değerleri

Statik olarak tüm bunlar belirlendiğinde alt sistem yaklaşımı için zemin rijitlikleri belirlenmiş olmaktadır. Doğrudan çözüm yöntemleri açısından bakıldığında ise yarı sonsuz elastik ortam katı cisim mekaniğinden faydalanılarak modellenebilmektedir. Örnek olarak sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla zemin sistemi katı ortam olarak modellenebilir (Şekil 20) ve bu sayede malzemenin doğrusal ya da doğrusal olmayan halleri için gerek zeminde, gerekse yapı sisteminde oluşan tüm iç kuvvetler kolaylıkla elde edilebilir.



Şekil 20. a) Zeminin yatay ve dönme serbestlik dereceleri için rijitliklerle tanımlanması (alt sistem yaklaşımı) b) Zeminin sonlu eleman kullanılarak modellenmiş sıvı-ayaklı depo-temel/zemin'e ait bir sonlu eleman modeli (Doğrudan çözüm yaklaşımı)

• DİNAMİK ETKİLEŞİM

Dinamik etkileşimde statik etkileşimden farklı bir şekilde rijitliklere ek olarak sistemin sönüm karakteristiğinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu duruma ek olarak yükleme frekansına ve temel sistemine bağlı olarak ortamın, rijitlik ve sönüm gibi sismik özellikleri değişkenlik gösterdiğinden bu değişimin de dikkate alınması gerekmektedir (Veletsos ve Wei, 1971; Dobry ve Gazetas, 1984; Wolf, 1985). Genel durumda sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{R(t)\}$$
(5)

Burada [M] sistemin kütle matrisini, [C] sistemin sönüm matrisini ve [K] sistemin rijitlik matrisini, $\{\ddot{u}(t)\}, \{\dot{u}(t)\}, \{u(t)\}\}$ ve $\{R(t)\}$ sırasıyla zamana bağlı değişen ivme, hız, yerdeğiştirme ve yük vektörlerini göstermektedir. Klasik olarak (5) bağıntısıyla tanımlanmış sistemde sönüm sadece [C] malzeme sönümünden ibarettir. Dinamik bir yük etkisindeki elastik bir ortamda yayılan dalgaların yayılmaya bağlı olarak enerjisinin kaybını ifade eden radyasyonel sönüm (5) bağıntısıyla ifade edilen hareket denkleminde içerilmemektedir. Gerek rijitlik gerekse de sönüm frekansla değişkenlik gösterdiğinden etkileşimin gerçekçi bir şekilde dikkate alınabilmesi için sistemin hareket denkleminin frekans ortamında ya da frekansla değişkenlik gösteren ifadelerlerin dikkate alındığı zaman ortamında yazılması gerekli olmaktadır. Frekans ortamında (5) ifadesi (8) bağıntısında olduğu gibi yazılabilmektedir. Burada her bir frekans bağımlı değer için Fourier ve Laplace gibi dönüşüm tekniklerinden herhangi biri kullanılarak zaman ortamındaki bağıntının çözümlenmesi ile de sonuca ulaşmanın mümkün olduğunu belirtmek uygun olmaktadır. Frekans ortamında hareket denkleminin yazılabilmesi için zaman ortamındaki hareket denklemi yer hareketine ait ivmenin Fourier yöntemiyle (6) ve (7) bağıntıları yardımıyla frekans ortamına dönüştürülerek genel hareket denklemi (8) bağıntısında olduğu gibi frekans ortamında yazılabilir.

$$\left\{u_g(\omega)\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{u_g(t)\right\} \exp(\omega) dt$$
(6)

$$\{R(\omega)\} = [\mathbf{M}]\{u_g(\omega)\}$$
⁽⁷⁾

$$[\mathbf{M}]\{\dot{u}(\omega)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(\omega)\} + [\mathbf{K}]\{u(\omega)\} = \{R(\omega)\}$$
(8)

(8) bağıntısında verilen frekans ortamındaki hareket denkleminde ivme ve hız yerdeğiştirme cinsinden sistemin hareket denklemi yazılmak istenirse (9) bağıntısı elde edilebilir.

$$-[\mathbf{M}]\omega^{2}u(\omega) + [\mathbf{C}]\omega u(\omega)i + [\mathbf{K}]u(\omega) = \{R(\omega)\}$$
(9)

Bu bağıntıda sistemin yerdeğiştirmeleri ile tepkileri arasındaki ilişki dinamik rijitlik $[S(\omega)]$ matrisi ile aşağıda bağıntıyla ifade edilebilir.

$$[S(\omega)]u(\omega) = \{R(\omega)\}$$
⁽¹⁰⁾

Dinamik rijitlik matrisi (9) ve (10) bağıntılarından kompleks formda (11) bağıntısında verilen şekilde yazılabilir.

$$[S(\omega)]u(\omega) = ([K]+i\omega[C]-[M]\omega^{2})u(\omega)$$

$$[S(\omega)] = [K]+i\omega[C]-[M]\omega^{2}$$
(11)

$$[S(\omega)] = [K](1+i2\tilde{\zeta})-[M]\omega^{2}$$

Bu aşamadan sonra yapılacak işlem statik halde mekanik özellikleri belirlenmiş, dinamik davranışı ifade edilmiş zemin sistemi ile yapı sistemi arasındaki etkileşimi çeşitli yöntemlerle çözümlemektir.

2.1.2.1. Yapı-Temel-Zemin Sistemi Hareket Denklemlerinin Çözümlenmesi

Yapı-temel-zemin sistemine ait hareket denklemi yaygın olarak bilindiği gibi zaman ortamında (5) bağıntısında olduğu gibi ya da açık formda aşağıdaki bağıntılarla ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} M_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} \{\ddot{u}_{ss}(t)\} \\ \{\ddot{u}_{bb}(t)\} \end{cases}^{+} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} \{\dot{u}_{ss}(t)\} \\ \{\dot{u}_{bb}(t)\} \end{cases}^{+} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} \{u_{ss}(t)\} \\ \{u_{bb}(t)\} \end{bmatrix}^{+} = \begin{cases} \{0\} \\ -\{P_0(t)\} \end{cases}$$
(12)

Burada [M], [C] ve [K] sırasıyla sisteme ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ss, sb, ve bb indisleri ise sırasıyla yapıya, yapı-temel ara yüzeyine ve temel-zemin sistemine ait özellikleri ifade etmektedir. $\ddot{u}_{ss}(t)$, $\dot{u}_{ss}(t)$ ve R(t) ise zamana bağlı olarak yapı sistemi üzerindeki söz konusu noktanın toplam ivme, hız ve yerdeğiştirmesi ile bu noktaya uygulanan zamana bağlı yük ifadesini göstermektedir (örnek olarak Şekil 27'deki sistemde $u_{ss}(t) = u_g(t) + u_b(t) + u_0(t) + h_T \theta$) ve $u_{bb}(t) = u_g(t) + u_b(t)$). (12) bağıntısında ($P_0(t)$) ile yapıya temel-zemin sistemi vasıtasıyla uygulanacak zamanla değişen bir kuvvet ifade edilmektedir. Sözü edilen bu kuvvet daha önce de bahsedildiği gibi yükleme frekansına bağlı olarak temel-zemin sistemi rijitlik ve sönüm mekanizmasında değişikliklere yol açmaktadır. Bu nedenle yapı/temel zemin sistemine ait hareket denklemi zemin sisteminin frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerinin dikkate alınması durumunda (12) bağıntısı aşağıdaki hale getirilebilir.

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} M_{sb} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} M_{bs} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} M_{sb} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{u}_{ss}(t) \\ \tilde{u}_{bb}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{sb} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{u}_{bs} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \tilde{u}_{bb}(t) \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{sb} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} K_{bs} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{bb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} u_{ss}(t) \\ u_{bb}(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{cases} \begin{cases} \{0\} \\ - \left\{ \begin{bmatrix} K_{\infty} \end{bmatrix} u_{b}(t) + \begin{bmatrix} C_{\infty} \end{bmatrix} \dot{u}_{b}(t) + \int_{0}^{t} S(t-\tau) u_{b}(\tau) d\tau \end{bmatrix} \end{cases}$$
(13)

Burada \mathbf{K}_{∞} ve C_{∞} temel-zemin sistemine ait rijitlik ve sönüm ifadelerini, göstermektedir. (13) bağıntısı frekans ortamında dinamik rijitlikle aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S(\omega) = [S_{bb}(\omega)] - [K_{\infty}] - i\omega[C_{\infty}]$$
⁽¹⁴⁾

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S(\omega)] e^{i\omega t} d\omega$$
(15)

Burada S_{bb} zemin sistemine ait dinamik rijitlik ifadesini göstermektedir. Temel-zemin sistemi dinamik rijitliğinin frekansla değişimlerinin zaman ortamındaki dönüşümünü ifade eden $S(t-\tau)$ ise S_{bb} 'ye bağlı olarak frekans ortamından zaman ortamına Fourier dönüşümü ile (14) ve (15) bağıntılarında olduğu gibi dönüştürülebilir. Hareket denkleminin frekans ortamında aşağıdaki gibi ifade edilmesi durumunda her Δt zaman artımı için frekans bağımlı hesaplanarak zaman ortamına dönüştürülmesi gereken rijitlik ve sönüm değerleri belirlenmeyecek dolayısıyla da bir işlem kolaylığı sağlanmış olacaktır.

$$-\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} M_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \omega^{2} \begin{cases} \{u_{ss}(\omega)\} \\ \{u_{bb}(\omega)\} \end{cases} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} C_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} i\omega \begin{cases} \{u_{ss}(\omega)\} \\ \{u_{bb}(\omega)\} \end{cases} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{ss} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} K_{sb} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{u_{ss}(\omega)\} \\ \{u_{bb}(\omega)\} \end{bmatrix} = \begin{cases} \{0\} \\ -\{P_{0}(\omega)\} \end{cases}$$
(16)

Şekil 27'de görülen tek kütleli sistem temel-zemin sisteminin ötelenme ve dönme serbestlik dereceleri dikkate alınarak frekans ortamında çözülmek istenirse her serbestlik derecesi için aşağıdaki bağıntılar sırasıyla yazılabilir.

$$-m\omega^{2}[u(\omega) + u_{b}(\omega) + h_{T}\theta_{b}(\omega)] + k_{s}(1 + 2i\zeta)u(\omega) = m\omega^{2}u_{g}(\omega)$$
(17)

$$-m\omega^{2}[u(\omega) + u_{b}(\omega) + h_{T}\theta_{b}(\omega)] + S_{H\zeta_{g}}(a_{0})u_{b}(\omega) = m\omega^{2}u_{g}(\omega)$$
(18)

$$-mh\omega^{2}[u(\omega) + u_{b}(\omega) + h_{T}\theta_{b}(\omega)] + S_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})\theta_{b}(\omega) = mh_{T}\omega^{2}u_{g}(\omega)$$
(19)

Yukarıdaki (17) ve (18) bağıntılarının her iki tarafı da $m\omega^2$ ile, (19) bağıntısı ise $mh\omega^2$ ile bölünürse aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir.

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T \theta_b(\omega) + \left(\frac{k_s(1+2i\zeta)u(\omega)}{m\omega^2} = \frac{\omega_s^2}{\omega^2}(1+2i\zeta)u(\omega)\right) = u_g(\omega)$$
(20)

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T \theta_b(\omega) + \frac{S_{H\zeta_g}(a_0)u_b(\omega)}{m\omega^2} = u_g(\omega)$$
(21)

$$-u(\omega) - u_b(\omega) - h_T \theta_b(\omega) + \frac{S_{\theta \zeta_g}(a_0) \theta_b(\omega)}{m h \omega^2} = u_g(\omega)$$
(22)

Bu (20), (21) ve (22) ile verilen üç bağıntı katsayılar matrisi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_{s}^{2}}{\omega^{2}}(1+2i\zeta)-1 & -1 & -1\\ -1 & \frac{S_{H\zeta_{g}}(a_{0})}{m\omega^{2}}-1 & -1\\ -1 & -1 & \frac{S_{g\zeta_{g}}(a_{0})}{mh^{2}\omega^{2}}-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(\omega)\\ u_{b}(\omega)\\ h_{T}\theta_{b}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1\\ 1\\ 1 \end{bmatrix} u_{g}(\omega)$$
(23)

 $u_b(\omega)$ ve $h_T \theta_b(\omega)$, yukarıdaki bağıntıdan, $u(\omega)$ cinsinden ifade edilmek istenirse aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir.

$$u_{b}(\omega) = \frac{\omega_{s}^{2}(1+2i\zeta)}{\frac{S_{H\zeta_{g}}(a_{0})}{m}}u(\omega) \qquad h\theta_{b}(\omega) = \frac{\omega_{s}^{2}(1+2i\zeta)}{\frac{S_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})}{mh^{2}}}u(\omega)$$
(24)

Sonuç olarak tek kütleli sisteme ait yatay yerdeğiştirme aşağıdaki şekilde genel halde yazılabilir.
$$u(\omega) = \frac{1}{\left[\frac{1}{\omega^{2}} - \frac{M_{n}^{*}}{S_{H\zeta_{g}}(a_{0})} - \frac{\omega^{2}M_{n}^{*}h_{n}^{*2}}{S_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})} - \frac{1}{\omega_{sn}^{2}(1+2i\zeta)}\right](1+2i\zeta)\omega_{sn}^{2}}u_{g}(\omega)$$
(25)

Temel-zemin sistemi için ek kütlenin dikkate alınması durumunda (23~25) denklemleri aşağıdaki şekli almaktadırlar.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_{sn}^{2}}{\omega^{2}}(1+2i\zeta)-1 & -1 & -1\\ -1 & \frac{S_{H\zeta_{g}}(a_{0})}{M_{n}^{*}\omega^{2}}-1 & -1\\ -1 & -1 & \frac{S_{g\zeta_{g}}(a_{0})}{M_{n}^{*}(h_{n}^{*})^{2}\omega^{2}}-\frac{\Delta M_{\theta}}{M_{n}^{*}(h_{n}^{*})^{2}}-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(\omega) \\ u_{b}(\omega) \\ (h_{n}^{*})^{2}\theta_{b}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{g}(\omega) \\ u_{g}(\omega) \\ u_{g}(\omega) \end{bmatrix}$$
(26)

 $u_b(\omega)$ ve $(h_n^*)^2 \theta_b(\omega)$, yukarıdaki ifadelerden çekilerek, $u(\omega)$ cinsinden ifade edilmek suretiyle ek kütlenin dikkate alınması durumunda tek kütleli sisteme ait yatay yerdeğiştirme aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilir.

$$u_{b}(\omega) = \frac{\omega_{sn}^{2}(1+2i\zeta)}{\frac{S_{H\zeta_{g}}(a_{0})}{M_{n}^{*}}}u(\omega) \qquad h_{n}^{*}\theta_{b}(\omega) = \frac{\omega_{sn}^{2}(1+2i\zeta)}{\frac{S_{g\zeta_{g}}(a_{0})}{M_{n}^{*}(h_{n}^{*})^{2}} - \frac{\Delta M_{\theta}}{M_{n}^{*}(h_{n}^{*})^{2}}\omega^{2}}u(\omega)$$
(27)

$$u(\omega) = \frac{u_g(\omega)}{\omega_{sn}^2 (1+2i\zeta) \left[\frac{1}{\omega^2} - \frac{1}{\omega_{sn}^2 (1+2i\zeta)} - \frac{M_n^*}{S_{H\zeta_g}(a_0)} - \frac{1}{\frac{S_{\theta\zeta_g}(a_0)}{M_n^* (h_n^*)^2} - \frac{\Delta M_{\theta}}{M_n^* (h_n^*)^2} \omega^2 \right]}$$
(28)

Modal analiz yardımıyla ayrıklaştırılarak tek kütleli sistemler haline getirilen çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümü yukarıda ifade edilen bağıntılar yardımıyla gerek zaman gerekse de frekans ortamında geçekleştirilebilir.

2.1.2.2. Değiştirme Yöntemleri

Yapı-Zemin etkileşim yöntemlerinin uygulama güçlükleri sebebiyle hem bilinen hesap yöntemleriyle kullanılabilecek hem de karmaşıklıktan uzak olacak bir hesap yönteminin geliştirilmesi, etkileşimin dikkate alınmasını kolaylaştıracaktır. Bu sebeple temelde bir alt sistem yaklaşımı olarak kabul edilebilen değiştirme yöntemleri Veletsos ve ekibi tarafından yapılan çalışmalar neticesinde ortaya konmuştur. Daha sonra bu yöntem küçük farklılıklarla ATC, FEMA ve EC-8 gibi yönetmeliklerde de yerini almıştır (Stewart, 1999; FEMA 368-369, 2001; EC-8, 2003).

2.1.2.2.1. Veletsos Yaklaşımı

Veletsos yaklaşımında, Şekil 21'de görüldüğü gibi düşey olarak temel sistemine belli bir açıyla gelen SH dalgasına maruz, kütlesiz yüzeysel dairesel ya da eşdeğer dairesel rijit temel sisteminin zamana bağlı olarak hem yatay hem de dönme serbestlik dereceleri doğrultularında hareket edebildikleri kabulleri yapılmaktadır (Veletsos ve Melek, 1974). Bu yöntem esas olarak tek kütleli bir sistemin hesabı için düşünüldüğünde iki adımda açıklanabilmektedir. Bunlardan ilki, bahsedilen harekete karşı temel-zemin sisteminin tepkilerini belirlemek, ikincisi ise yapı-temel-zemin sisteminin eşdeğer sönüm değerlerini belirlemektir.



Şekil 21. Veletsos yaklaşımına ait mekanik model (Veletsos vd., 1988; Kumar, 1996).

Bu yaklaşımda yapıya ait periyot değeri artırılarak temel-zemin sisteminin esnekliği dikkate alınmakta, sönüm değerinin artırılmasıyla da yayılma (radiation) ve tekrarlı yükleme (material ya da hysteretic) etkisine bağlı harcanan enerji dikkate alınmaya çalışılmaktadır (Veletsos vd., 1988; Kumar, 1996; FEMA 368-369, 2001).

Temel-zemin sisteminin kütleleri ihmal edilerek zemine elastik olarak mesnetli tek kütleli sistemin periyodu, T harmonik zorlanmaya maruz tek kütleli sisteme ait periyodu, δ_{st} yapı sistemine ait m kütlesinin yatay yük olarak sisteme uygulanması durumunda meydana gelecek yatay yerdeğiştirmeyi, h_n^* tek kütleli sistemin eşdeğer yüksekliğini, W_n^* tek kütleli sistemin eşdeğer ağırlığını, g yerçekimi ivmesini k, K_u ve K_r sırasıyla sistemin eşdeğer rijitliğini, temel zemin sisteminin ötelenme rijitliğini ve temel zemin sisteminin dönme rijitliğini göstermek üzere bu sisteme ait periyot (\tilde{T}) aşağıdaki bağıntıda olduğu gibi belirlenebilir (Şekil 21).

$$\delta_{st} = \frac{W_n^*}{k_n^*} + \frac{W_n^*}{K_u} + \frac{W_n^*(h_n^*)^2}{K_r}$$
(29)

$$\tilde{T} = \sqrt{\frac{\delta_{st}}{g}} = \sqrt{\frac{M_n^*}{k_n^*} + \frac{M_n^*}{K_u} + \frac{M_n^*(h_n^*)^2}{K_r}} = \sqrt{\frac{m}{k_n^*} (1 + \frac{k_n^*}{K_u} + \frac{k_n^*(h_n^*)^2}{K_r})} = T\sqrt{(1 + \frac{k_n^*}{K_u} + \frac{k(h_n^*)^2}{K_r})}$$
(30)

$$\tilde{T} = T \sqrt{\left(1 + \frac{k}{K_u} \left(1 + \frac{K_u h^2}{K_r}\right)\right)}$$
(31)

(31) bağıntısıyla yapı-temel-zemin sistemine ait değiştirilmiş periyot, ankastre sistemin periyoduna göre elde edildikten sonra, sistemin dinamik tepkisini elde etmek için eşdeğer sistemin sönüm değerini belirlemek gerekmektedir. Bu amaçla iki farklı yol izlenmektedir. Bunlardan ilkiyle zemin sisteminin sönümü, harmonik tekrarlı yük etkisinde zeminine ait kayma gerilmesi-şekildeğiştirme ilişkisinden zeminin histerisis ya da malzeme (hysteretic ya da material) sönüm kapasitesi (δ) aşağıdaki bağıntıyla elde edilebilmektedir.

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{W_s} \tag{32}$$

Burada W_D , zeminin harmonik tekrarlı yükleme etkisinde gerilme şekildeğiştirme grafiğinde devirler arasındaki alanı, W_s ise en büyük şekildeğiştirme enerjisini göstermektedir (gerilme-şekildeğiştirme grafiğinde en büyük gerilme ve şekildeğiştirme değerlerinin orijinle birleştirilmesiyle elde edilen üçgenin alanıyla elde edilmektedir) (bkz Şekil 8). Temel-zemin sistemine ait sönüm oranı $\overline{\zeta}$; zemin histerik sönüm kapasitesine, yapı sisteminin yüksekliğinin yarıçapına oranına (h_T/r_0) ve değiştirilmiş periyodun ankastre kabulle belirlenen yapı periyoduna oranına \tilde{T}/T bağlı olarak Şekil 22'de verilmektedir (Veletsos vd., 1988). Çoğu durumda zemin sistemi ile ilgili sönüm kapasitesini belirlemek kolay olmaz. Bu güçlük zemine ait kayma dalgası hızına (v_s), tek kütleli sisteme ait doğal titreşim periyoduna (T), ve tek kütleli sistemin yüksekliğine (h_T) bağlı olarak Veletsos, Nair ve Bielak tarafından 1975'te yapılan çalışmalarla aşılmaya çalışılmıştır (Stewart vd., 1998). Yapı sistemi ile zemin-temel sistemi arasındaki ilişkileri ifade eden (33) ve (34) bağıntılarıyla elde edilebilen σ ve γ katsayıları yardımıyla gerek periyot değerindeki değişim, gerekse de zemin sisteminin sönüm değerleri Şekil 23 yardımıyla belirlenebilir.

$$\sigma = v_s T / h \tag{33}$$

$$\gamma = \frac{m}{\rho \pi r^2 h} \tag{34}$$



Şekil 22. Temel-zemin sistemi sönüm oranının ($\overline{\zeta}$) periyot oranıyla (\tilde{T}/T) değişimi (Veletsos,1988).

Sonuç olarak yapı-temel sistemine ait eşdeğer sönüm değeri ζ_0 Şekil 22 ve 23'den uygun olanından alınan temel-zemin sönümü $(\overline{\zeta})$ ve yapı sistemi sönümüne (ζ) bağlı olarak (35) bağıntısından elde edilebilir.

$$\zeta_0 = \tilde{\zeta} + \frac{\zeta}{(\tilde{T}/T)^3}$$
(35)

Yapı-temel-zemin sistemine ait eşdeğer periyot (\tilde{T}) ve sönüm (ζ_0) değerleri elde edildikten sonra doğrudan ya da tepki spektrumu çözümü yardımıyla sisteme ait iç kuvvet ve yerdeğiştirme değerleri elde edilebilir. Yapıda oluşan kuvvetler ve en büyük yerdeğiştirmeler; \tilde{V} tek kütleli sistemin kütle seviyesindeki kesme kuvvetini, M_b taban eğilme momentini, u tek kütleli sistemin kütle seviyesindeki yerdeğiştirmeyi ve PSA belirtilen periyot ve sönüm değerlerine bağlı ivme spektrumu fonksiyonunu göstermek üzere, tepki spektrumu çözümüyle aşağıdaki şekilde elde edilebilirler.

$$\tilde{V} = m \cdot PSA(\tilde{T}, \zeta_0) \tag{36}$$

$$M_b = \tilde{V}h^* = m \cdot PSA(\tilde{T}, \zeta_0) \cdot h^*$$
(37)

$$u = \frac{\tilde{V}}{k} + \frac{\tilde{V}h^{*2}}{K_r}$$
(38)

Eğer çok serbestlik dereceli bir sistemin hesabı yapılmak isteniyorsa aşağıdaki yaklaşımlar uygulanabilir.

• Çok serbestlik dereceli bir sistem için temel-zemin sisteminin serbestlik derecelerinin tümünün tutulduğu kabulüyle elde edilen modal analiz sonuçlarının, her moda ait periyot (*T*) ve sönüm (ζ) değerleri temel sisteminin serbestlikleri dikkate alınarak değiştirilebileceği ve bu doğrultuda yapı zemin etkileşimin dikkate alınabilir (Veletsos, 1988).

• Yapı sistemi için dikkate alınan rijitlik ve sönüm değerleri temel-zemin sisteminin serbestlikleri de dikkate alınarak eşdeğer rijitlik ve sönüm değerleri ile benzer modal analiz yaklaşımı ve tepki spektrumu yöntemi kullanılarak sonuca ulaşılabilir (Veletsos, 1988).



Şekil 23. Tek serbestlik dereceli ($\upsilon = 0.45$, $\zeta = 5\%$, $\gamma = 0.15$,) elastik ortam üzerinde bulunan bir temel sistemi ($e/r_0=0$) ile gömülü ($e/r_0=1$) bir temel-zemin sistemi için yapı zemin etkileşiminin dikkate alındığı durumdaki periyottaki değişim ile (\tilde{T}/T) ve temel-zemin sisteminin sönümü ($\overline{\zeta}$ (%)) (Stewart, 1996; Stewart vd., 1998; 1999a).

2.1.2.2.2. NEHRP 2001 Yaklaşımı

NEHRP 2001 (National Earthquake Hazards Reduction Program) ya da BSSC 2000 (Building Seismic Safety Council) olarak bilinen ve Amerika Birleşik Devletlerinde birçok eyalette bağlayıcılığı olan bu yönetmeliklerde değiştirme yöntemi bir yapı zemin etkileşim prosedürü olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşım tarzının özünü Veletsos'un çalışmaları oluşturmakla beraber, literatürdeki birçok çalışmadan elde edilen kazanımlar da burada içerilmektedir (Kumar, 1996; Stewart, 1996; 1998; FEMA 368; 369, 2001; Stewart vd., 2003).

Yönetmelik tarafından önerilen bu yöntem dairesel temel sistemleri için verilmiş olmasına rağmen aşağıdaki bağıntılarla elde edilen eşdeğer yarıçaplar yardımıyla, diğer geometrik tipte temel sistemlerine de uygulanabilmektedir.

$$r_{u} = \sqrt{\frac{A_{0}}{\pi}} ; \quad r_{\theta} = \sqrt[4]{\frac{4I_{0}}{\pi}} ; \quad \alpha = \frac{\overline{W}}{\gamma A_{0} h^{*}}$$
(39)

Burada r_u ötelenmede ve r_{Θ} dönmede eşdeğer yarıçapları, A_0 temel sisteminin alanını, I_0 statik eylemsizlik momentini, h^* tek kütleli sistemin (moda ait) yüksekliğini, α göreli yapı zemin ağırlığını, γ zemine ait birim hacim ağırlığını ve \overline{W} tek kütleli olarak değerlendirilen sistemin (moda ait) ağırlığının %70'ni ifade etmektedir.

Sismik yöntemlerle küçük şekildeğiştirme değerleri (<10⁻³) için elde edilmiş (v_{s0}) kayma dalgası hızı ile buna bağlı elde edilen kayma modülü ($G_0 = \gamma v_{s0}^2/g$) değerleri yardımıyla hesaplarda kullanılacak olan (v_s) kayma dalgası hızı ve (G) kayma modülü Tablo 11 den en büyük yer ivmesine göre belirlenmektedir.

	En büyük yer ivmesi (g)			
	≤ 0,10	≤0,15	0,20	>0,30
G/G _o	0,81	0,64	0,49	0,42
v _s /v _{so}	0,90	0,80	0,70	0,65

Tablo 11. G/G_o ve v_s/v_{so} değerlerinin yer ivmesi tepkisiyle değişimi

• Dönme (K_{Θ}) ve yatay ötelenme (K_U) rijitlikleri gerçekte frekans bağımlı olduğundan, FEMA 368-369'da bu rijitlikler $\alpha_u = 1$ ve α_{Θ} gibi temel zemin ve yapı dinamik davranışına bağlı olarak aşağıdaki bağıtılarla belirlenebilmektedir.

$$K_{U} = \alpha_{u} \frac{8}{2-\nu} Gr_{u} = \alpha_{u} K_{H} \qquad K_{\theta} = \alpha_{\theta} \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_{\theta}^{3} = \alpha_{\theta} K_{R}$$
(40)

Burada α_u ve α_{θ} , sırasıyla periyoda ya da frekansa bağlı ötelenme ve dönme rijitliklerine ait dinamik faktörleri göstermektedir. α_u pratik kullanımlar için yaklaşık 1 kabul edilmektedir. α_{θ} ise Tablo 12 de verilen dinamik faktörlere bağlı olarak gömülme oranı $e/r_0 < 0,5$ değeri için belirlenmektedir.. Veletsos yaklaşımının ilk halinde ise dönme rijitliğinde böyle bir azalma öngörülmemektedir.

$(r / v_s)T$	$\alpha_{ heta}$
<0,05	1,00
0,15	0,85
0,35	0,70
0,50	0,60

Tablo 12. Dönmeye ait dinamik faktör değerleri ($e/r_0 < 0.5$) (FEMA 368, 2001).

Temel zemin sisteminde gömülme oranının büyük olduğu durumlarda ($e/r_0 > 0,5$) ise gömülme etkileri temel-zemin sisteminin davranışını önemi oranda etkilemektedir. Bu durum için gerek statik gerekse de dinamik rijitlik değerlerinin tekrar belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerler ve rijit bir ortam üzerinde bulunan tabakalı zeminlere ait temel-zemin sistemlerine ilişkin statik rijitlik değerleri daha önce Tablo 9'da verilmişti. Dinamik rijitliklerin değişimleri ise alt sistem yöntemleri başlığı altında irdelenecektir.

 Temel-Zemin sistemine ait sönüm (ζ) birçok faktörün etkisini birleştiren bir katsayıdır. Temel-zemin sistemi içerisinde dalgaların yayılması (radyosyenel ya da geometrik sönüm), histerik ya da elastik olmayan davranış (hysteretic ya da malzeme sönümü) gibi birçok parametrenin bu faktörü etkilediği daha önce de ifade edilmişti. Bu katsayı Veletsos yaklaşımından farklı olarak sisteme ait tepki spektrumu değeri, yapı esnekliği ve değiştirilmiş periyodun ankastre sistemin periyoduna oranına bağlı olarak Şekil 24 yardımıyla belirlenmektedir.



Şekil 24. Temel-zemin sistemi sönüm katsayısının periyot oranıyla değişimi (FEMA 368, 2001).

$$\overline{\zeta} = f(S_{DS}, \frac{h^*}{r}, \frac{\tilde{T}}{T})$$
(41)

Burada (S_{DS}) periyodu (1 s) den az olan sistemlerin spektrum ivme katsayısını, \tilde{T}/T 'değiştirilmiş periyodun ankastre sistemin periyoduna oranını, h_T/r_0 ise tek kütleli sistemin (moda ait) yüksekliğinin temel yarıçapına oranını göstermektedir.

 Velesos yaklaşımından farklı olarak sistemin ankastre olarak çözümlemesinden elde edilecek taban kesme kuvveti (V), yapı zemin etkileşiminin hesaba katılması ile elde ediilen kesme kuvveti (V) değerleri aşağıdaki bağıntılarla belirlenebilir. Söz konusu yönetmelik etkileşim dikkate alınarak elde edilmiş taban kesme kuvvetinin ankastre çözümden elde edilenin %70'inden daha az olamayacağını öngörmektedir.

$$\Delta V = \left[C_s - \tilde{C}_s \left(\frac{0.05}{\overline{\zeta}} \right) \right] \overline{W} \qquad \overline{V} = (V - \Delta V) > 0.7V \tag{42}$$

Burada (\tilde{C}_s) zemin etkileşimini dikkate alındığı sistemin (C_s) ise ankastre sistemin tasarım spektrumu ordinatını göstermektedir.

FEMA'da (2001) yapı–zemin etkileşimine ilişkin önerilen ve burada verilenler dışındaki işlevler ve yaklaşımların temeli Veletsos yaklaşımıyla aynıdır. Her iki yaklaşımda Şekil 25'de özetlenmektedir.



Şekil 25. Değiştirme yöntemlerine ait akış diyagramı

2.1.2.3. Alt Sistem Çözüm Yöntemleri

Yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde gerek basitliği gerekse de fiziksel olarak etkileşimi büyük bir yaklaşıklıkla ortaya koyabilmesi sebebiyle en sık kullanılan hesap yöntemleridir. Alt sistem yaklaşımları, tabanı ankastre olarak düşünülen geleneksel yaklaşım tarzına ek olarak çeşitli yöntemler vasıtasıyla temel zemin sistemlerinin rijitlik, kütle ve sönüm gibi fiziksel parametrelere bağlı modellendiği bir yaklaşım tarzı şeklinde özetlenebilir. Geleneksel olarak temelde tutulan serbestlik dereceleri yerine temel zemin sistemini davranışını karakterize eden serbestlik dereceleri eklenmesi ile tüm sistemin Şekil 26'da gösterilen mekanik modelle ifade edilebilmesi bu yaklaşımın tercih edilmesinde en büyük etkendir. Burada üzerinde durulması gereken bir diğer husus da geleneksel olarak yapı-zemin etkileşim mekanizmasında tanımlanan fiziksel değişkenlerin yükleme frekansına bağlı olarak değişkenlik göstermesi sebebiyle, bu tür problemlerin çözümlerinin frekans ortamında gerçekleştirilmesi zaman ortamına göre daha kolay olduğudur.

Alt sitem yaklaşımlarına ilişkin olarak yapılan kabuller aşağıda sıralanmaktadır.

- 1. Yapı sistemi altında bulunan zemin homejen ve elastik bir ortamdır.
- 2. Yapı temel sistemi rijit ve daireseldir.
- 3. Düzlem kesitler şekildeğiştirmeden sonra da düzlem kalırlar
- 4. Yapı temel sistemi altında bulunan elastik ortam ötelenme veya dönmeye bağlı idealleştirilmiş koni şeklinde bir zemin parçası olarak dikkate alınmaktadır (koni modeli için) (bkz.Şekil 19).
- 5. Deformasyon, dönme ve yatay ötelenme hareketi için kayma gerilmelerine, düşey ötelenme ve burulma hareketleri için ise eksenel gerilmelere bağlı olarak gerçekleşir.

Alt sistem yaklaşımlarının basitlik ve gerçeğe yakın sonuç vermesinin yanında, bu tür çözüm yaklaşımlarının özellikle doğrusal ve elastik olmayan davranışların dikkate alındığı durumlarda sistemin fiziksel özelliklerin belirlenmesinde ve çözümün frekans ortamında gerçekleştirilmesinde birçok güçlükle karşılaşılmaktadır. Özellikle deprem gibi dinamik bir yük etkisinde kalan sistemlerde yapı-zemin etkileşiminin etkin olduğu zemin sistemlerinin çoğu kez doğrusal olmayan tarzda bir davranış gösterip göstermeyeceklerinin araştırılması gerekliliği açıktır. Bu sebeple örnek olarak şekildeğiştirmeye bağlı doğrusal olmayan davranış dikkate alınmak istendiğinde şekildeğiştirmenin değişimlerinin zaman tanım alanında göz önüne alınması, frekans ortamında tanımlanmasına göre oldukça kolaylıklar içerdiğinden, bu tür durumlarda doğrudan çözüm yöntemlerinin kullanılması daha uygun olmaktadır. Bunlara ek olarak alt sistem yaklaşımları düşük ve orta dereceli yükleme frekansında gerçeğe yakın sonuç verirken, yüksek frekanslı yüklemelerde ise sonuçlar gerçekten uzaklaşabilmektedir (Wolf, 1985; 1994; Wu, 1997).



Şekil 26. Yapı-zemin etkileşiminin çözümlenmesinde alt sistem yaklaşımı çözüm adımları (1) sisteme etkiyen yer hareketinin kinematik etkileşime bağlı olarak belirlenmesi (2) temel ve zemin sistemine bağlı olarak sistemin dinamik rijitliklerin (empedans fonksiyonlarının) belirlenmesi (3) yapıya etkiyen yer hareketinin ve fiziksel özellikleri belirlenmiş yapı-zemin-temel sisteminin çözümü

Genel olarak literatür incelendiğinde temel zemin sisteminin çeşitli serbestlik dereceleri kullanılarak alt sistem yaklaşımı ile modellenilmeye çalışıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Bunların birçoğunda temel-zemin sistemine ait rijitlikler statik rijitliklere eşit kabul edilerek, hem zeminin en önemli özelliklerinden radyasyonel sönüm hem de sistemin rijitliklerinin frekansla değişiminin ihmal edildiği yaklaşımlar kullanılmaktadır (Ramey vd., 1984; Haroun ve Ellaithy, 1985; Spyrakos ve Loannidis, 2003; Tongaonkar ve Jangid, 2003; Bhattacharya ve Dutta, 2004; Bhattacharya vd., 2004). Zeminin frekans bağımlı fiziksel özelliklerinin tespit edildiği ve bu özelliklerin dikkate alınabildiği analitik yöntemlerin önerildiği çalışmalar da bulunmaktadır (Bielak, 1971; Jennings ve Bielak, 1972; Veletsos ve Wei, 1971; Luco vd., 1986; Wong ve Luco, 1975; Wolf, 1994; 1997;

Wolf ve Song, 2002). Bunlara ek olarak alt sistem yaklaşımlarının kullanılmasında ortamın karakteristiklerinin sonlu elemanlar veya sınır elemanlar gibi sayısal yöntemler yardımıyla özel olarak belirlendiği çalışmalar da mevcuttur (Zhao, 1997; Jeremic vd., 2004). Burada gerek deneysel çalışmalardan gerekse de gerçekleşmiş depremlerden elde edilen kayıtlar incelendiğinde, alt sistem yaklaşımlarının oldukça gerçekçi sonuçlar vererebildiklerini ifade etmek uygun olmaktadır (Bielak, 1971; Luco vd.; 1986; Stewart, 1996; Chao, 1998).

Alt sistem yaklaşımları genel olarak; temel geometrisine, zemine gömülme oranına, zeminin tabakalı yapısına ya da zemin sisteminin rijit bir tabaka üzerinde bulunup bulunmamasına bağlı olarak ayrı ayrı değerlendirilmektedir.

Bu çalışma kapsamında dikkate alınan ayaklı depolar için zeminin elastik ve tabakasız bir ortam olduğu kabul edilmektedir. Ayaklı depoya ait temel sisteminin rijit ve dairesel radye olduğu ve söz konusu temel sisteminin gömülü ve yüzeysel olması durumları ayrı ayrı dikkate alınmaktadır. Bu kabuller doğrultusunda alt sistem yaklaşımıyla depo-zemin etkileşiminin dikkate alınacağı modeller Şekil 27'de gösterilmektedir. Burada kullanılan frekans bağımlı modeldeki gerekli rijitlik, sönüm ve ek kütleler yüzeysel ve gömülü temel duruları için Wolf (1985; 1994; 1997), Wolf ve Song (1997) tarafından yapılan çalışmalardan uyarlanarak elde edilmektedir. Temel sistemlerinin dairesel olmama durumu için de bu yaklaşımın eşdeğer temel yarıçapları kullanılarak belirli bir yaklaşıklıkla kullanılabilir.



Şekil 27. Çalışmada dikkate alınan (a) zeminin statik yatay ötelenme ve dönme rijitlikleri ile ifade edildiği sistem (b) zeminin frekans bağımlı yatay ötelenme ve dönme rijitlikleri ve sönümleri ile ifade edildiği sistem

• Yarı Sonsuz Elastik Ortam Üzerinde Bulunan Temel Sistemi İçin Frekans Bağımlı Alt Sistem Yaklaşımı

Şekil 28'de görülen alt sisteme ait mekanik model irdelendiğinde, temel zemin sistemi yatay ötelenme ve dönme serbestlik dereceleri dikkate alınarak tabanda meydana gelen kesme kuvvetinin frekansla değişimi için (43) ifadesi tabanda meydana gelen eğilme momentini frekansla değişimi için ise (44) bağıntı yazılabilir.

$$P_{0}(\omega) = K_{H}k_{H\zeta_{g}}(a_{0})u_{o}(\omega) + \frac{r_{0}}{v_{s}}K_{H}c_{H\zeta_{g}}(a_{0})u_{o}'(\omega) = S_{H\zeta_{g}}(a_{0})u_{o}(\omega)$$
(43)

$$M_{0}(\omega) = K_{\theta}k_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})\theta_{b}(\omega) + \frac{r_{0}}{v_{s}}K_{\theta}c_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})\theta_{b}'(\omega) = S_{\theta\zeta_{g}}(a_{0})\theta_{b}(\omega)$$
(44)

Burada $k_{H\zeta_g}(a_0)$ ve $c_{H\zeta_g}(a_0)$ yatay ötelenme serbestlik derecesinin zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı frekans bağımlı rijitlik ve sönümü, $k_{\theta\zeta_g}(a_0)$ ve $c_{\theta\zeta_g}(a_0)$ dönme serbestlik derecesi için zemine ait malzeme sönümünün de dikkate alındığı frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerini göstermektedir.



Şekil 28. Tek kütleli sisteme ait dönme ve yatay ötelenme serbestlik derecelerini içeren alt sistem yaklaşımı modeli (Wolf 1994).

Yaklaşık olarak ötelenme ve dönme dinamik rijitlikleri $(S_{H\zeta_g}(a_0), S_{\theta\zeta_g}(a_0))$ malzeme (ζ_g) ve radyasyonel sönümü de $(\zeta_h(a_0), \zeta_\theta(a_0))$ içerecek şekilde aşağıdaki gibi bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$S_{H\zeta_g}(a_0) = K_H k_{H\zeta_g}(a_0) \left(1 + 2i\zeta_h(a_0) + 2i\zeta_g \right)$$
(45)

$$S_{\theta\zeta_g}(a_0) = K_\theta k_{\theta\zeta_g}(a_0) \left(1 + 2i\zeta_\theta(a_0) + 2i\zeta_g \right)$$
(46)

Burada $\zeta_H(a_0)$, $\zeta_{\theta}(a_0)$ ötelenme ve dönme için radyasyonel sönüm değerlerinin boyutsuz frekansla değişimlerini göstermektedir. Bu sönüm değerleri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilir.

$$\zeta_{H}(a_{0}) = \frac{a_{0}c_{H}(a_{0})}{2k_{H}(a_{0})} \qquad \zeta_{\theta}(a_{0}) = \frac{a_{0}c_{\theta}(a_{0})}{2k_{\theta}(a_{0})}$$
(47)

Temelde koni modellerinden (bkz Şekil 19) faydalanarak gerek ötelenme gerekse de dönme hareketleri için homojen bir zemin ortamı üzerinde bulunan temel sistemine ait (Şekil 29) frekans bağımlı (boyutsuz frekans $a_0=\omega r_0/v_s$) sönümsüz sisteme ait rijitlik ve sönüm ifadeleri ayrı ayrı elde edilebilir. Bu hareketlerden ötelenme için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları için (48) ve (49) bağıntıları yazılabilir.

$$k(a_0) = 1 - \frac{\mu}{\pi} \frac{z_0}{r_0} \frac{v_s^2}{v^2} a_0^2$$
(48)

$$c(a_0) = \frac{z_0}{r_0} \frac{v_s}{v}$$
(49)



Şekil 29. Homojen bir zemin sistemi üzerindeki ayaklı depolar için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı

Yatayda ötelenme hareketine maruz koni modeli için hız, kayma dalgası hızına $(v=v_s)$, μ katsayısı ise bütün v değerleri için sıfıra eşittir. Düşey doğrultuda hareket için ise v < 1/3 durumunda hız, boyuna dalga hızına $(v=v_p)$, μ katsayısı ise sıfıra eşittir. Yaklaşık olarak zeminin sıkışamaz kabul edildiği $1/3 \le v < 1/2$ aralığında ise hız kayma dalgası hızının iki katına $(v=2v_s)$ eşittir. μ katsayısı ve buna bağlı belirlenen ΔM ek kütlesi ise bu durumda aşağıdaki bağıntılardan hesaplanmaktadır.

$$\mu = 2, 4\pi \left(\upsilon - \frac{1}{3} \right) \qquad ; \qquad \Delta M = \mu \rho r_0^3 \tag{50}$$

Düşey ve yatay serbestlik derecelerini içeren ötelenme türü hareket için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları aşağıdaki gibi belirlenebilir.

Yatay serbestlik derecesi için frekans bağımlı yatayda dinamik rijitlik k_H (a_0) ve sönüm c_H (a_0) katsayıları koni (z_0/r_0) oranı (bkz Tablo 7) ve zemin ortamı kayma dalgası hızına (v_s) bağlı olarak zemine ait her Poisson oranı (v) için aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilir.

$$k_H(a_0) = 1 \tag{51}$$

$$c_{H}(a_{0}) = \frac{\pi}{8}(2-\nu)$$
(52)

Düşey serbestlik derecesi için ise düşeyde dinamik rijitlik k_v (a_0) ve sönüm c_v (a_0) katsayıları, zemine ait Poisson oranın v < 1/3 olduğu durumda; $\mu = 0$ ise aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilir.

$$k_V(a_0) = 1 \tag{53}$$

$$c_{\nu}(a_0) = \frac{\pi}{4}(1-\nu)\left(\frac{\nu_P}{\nu_s}\right) \tag{54}$$

Zemine ait Poisson oranının $1/3 \le \nu < 1/2$ aralığında ya da başka bir değişle zeminin yaklaşık olarak sıkışabilir kabul edilebildiği durumda **Düşey** serbestlik derecesi için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları aşağıdaki bağıntılarla elde edilebilir.

$$k_{\nu}(a_{0}) = 1 - \left(\frac{2, 4\pi\left(\nu - \frac{1}{3}\right)}{\pi}\right) \frac{\pi}{2}(1 - \nu)a_{0}^{2}$$
(55)

$$c_{\nu}(a_0) = \frac{\pi}{2}(1-\nu)$$
(56)

Dönme ve burulma serbestlik derecelerini içeren dönme durumu için dinamik rijitlik ve sönüm katsayılarının genel ifadeleri;.

$$k_{\theta}(a_{0}) = 1 - \frac{4}{3} \frac{\mu_{\theta}}{\pi} \frac{z_{0}}{r_{0}} \frac{v_{s}^{2}}{v^{2}} a_{0}^{2} - \frac{1}{3} \frac{a_{0}^{2}}{\left(\frac{r_{0}v}{z_{0}v_{s}}\right)^{2} + a_{0}^{2}}$$
(57)

$$c_{\theta}(a_{0}) = \frac{z_{0}v_{s}}{3r_{0}v} \frac{a_{0}^{2}}{\left(\frac{r_{0}v}{z_{0}v_{s}}\right)^{2} + a_{0}^{2}}$$
(58)

bağıntılarıyla belirlenebilir. Burulma serbestlik derecesi için koni modelinin hızı, kayma dalgası hızına ($v=v_s$), μ_{θ} katsayısı ise bütün υ değerleri için sıfıra eşittir. Dönme hareketinde $\upsilon < 1/3$ aralığında hız, boyuna dalga hızına ($v=v_p$), μ_{θ} katsayısı ise sıfıra şittir. Yaklaşık olarak zeminin sıkışamaz kabul edildiği $1/3 \le \upsilon < 1/2$ aralığında ise $\nu=2\nu_s$, μ_{θ} katsayısı ve buna bağlı dönme serbestliği için hesaba katılacak ΔM_{θ} ek kütlesi aşağıdaki bağıntılarla belirlenebilir.

$$\mu_{\theta} = 0, 3\pi \left(\upsilon - \frac{1}{3} \right) \qquad \Delta M_{\theta} = \mu_{\theta} \rho r_0^5 \tag{59}$$

Burulma serbestlik derecesi için frekans bağımlı burulma dinamik rijitlik $k_{\theta T}(a_0)$ ve sönüm $c_{\theta T}(a_0)$ katsayıları; koni oranı (z_0/r_0) (bkz Tablo 7) ve zemin ortamı kayma dalgası hızına (v_s) bağlı olarak zemine ait her Poisson oranı (v) için aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilir.

$$k_{\theta T}(a_0) = 1 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32}\right)^2 + a_0^2}$$
(60)

$$c_{\theta T}(a_0) = \frac{3\pi}{32} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32}\right)^2 + a_0^2}$$
(61)

Dönme serbestlik derecesi için Poisson oranın $\upsilon < 1/3$ olduğu durumda; μ_{θ} katsayısı sıfırdır. Dönme dinamik rijitlik $k_{\theta\theta}$ (a_0) ve sönüm $c_{\theta\theta}$ (a_0) katsayıları aşağıdaki gibi belirlenebilir.

$$k_{\theta\theta}(a_0) = 1 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32}(1-\upsilon)\left(\frac{\nu_p}{\nu_s}\right)^3\right)^2 + a_0^2}$$
(62)

$$c_{\theta\theta}(a_0) = \frac{3\pi}{32} (1-\nu) \left(\frac{v_p}{v_s}\right) \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{32} (1-\nu) \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^3\right)^2 + a_0^2}$$
(63)

Zemine ait Poisson oranının $1/3 \le \upsilon < 1/2$ aralığında olması başka bir deyişle zeminin yaklaşık olarak sıkışabilir kabul edildiği durumda **dönme** serbestlik derecesi için dinamik rijitlik ve sönüm katsayıları aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilir.

$$k_{\theta\theta}(a_0) = 1 - 3 \frac{0.3\pi \left(\nu - \frac{1}{3}\right)}{8} (1 - \nu)a_0^2 - \frac{1}{3} \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{4}(1 - \nu)\right)^2 + a_0^2}$$
(64)

$$c_{\theta\theta}(a_0) = \frac{3\pi}{16} (1-\nu) \frac{a_0^2}{\left(\frac{9\pi}{4} (1-\nu)\right)^2 + a_0^2}$$
(65)

• Yarı Sonsuz Elastik Ortama Gömülü Olan Temel Sistemi İçin Alt Sistem Yaklaşımı

Elastik bir yarı sonsuz ortam üzerinde bulunan temel sistemini karakterize eden koni modeli benzer şekilde gömülü temeller için de kullanılabilmektedir. Burada en önemli fark Şekil 30'da görüldüğü gibi yüzeysel temel sistemlerindeki tek koniden farklı olarak yeterli derinliğe sahip bir temel sistemi için çift koniden bahsedilebileceğidir. Burada temel-zemin sisteminin rijitliğindeki zemin rijitliğinin iki kat daha arttığı açıkça gözükmektedir. Koni en boy oranı ve bunların serbestlik derecelerine göre değişimleri ise yaklaşık olarak tek koni modeli ile aynıdır.



Şekil 30. Yatay ve dönme serbestlikleri için çift koni modelleri

Çift koni modeline ait statik rijitlikler (2*K*) ile birçok deneysel ve teorik çalışmadan elde edilen rijitlikler arasında kurulan oransal ilişkiler aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilmektedir.

$$\frac{2K_H}{K_H^*} = \frac{7 - 8\nu}{4(2 - \nu)(1 - \nu)}$$
(70)

$$\frac{2K_V}{K_V^*} = \frac{3 - 4\nu}{4(1 - \nu)^2}$$
(71)

$$\frac{2K_{\theta}}{K_{\theta}^*} = \frac{3-4\nu}{4\left(1-4\nu\right)^2} \tag{72}$$

$$\frac{2K_T}{K_T^*} = 1 \tag{73}$$

Burada Poisson oranının 0.5'e eşit olması durumunda çift koni modelinin deneysel ve teorik çalışmadan elde edilen rijitliğe oranının 1 olduğu aşağıdaki ifadelerden gözükmektedir. Apsel ve Luco (1987) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntılar ise ancak $e/r_0 < 2$ olduğu durumlarda rijitliğin derinlikle değişimini de hesaba katabilmek amacıyla kullanılmaktadır.

$$K_{H} = \frac{8Gr_{0}}{2-\upsilon} \left(1 + \frac{e}{r_{0}}\right)$$
(74)

$$K_{V} = \frac{4Gr_{0}}{1 - \upsilon} \left(1 + 0.54 \frac{e}{r_{0}} \right)$$
(75)

$$K_{\theta} = \frac{8Gr_0^3}{3(1-\nu)} \left[1 + 2.3\frac{e}{r_0} + 0.58\left(\frac{e}{r_0}\right)^3 \right]$$
(76)

$$K_T = \frac{16Gr_0^3}{3} \left(1 + 2.67 \frac{e}{r_0} \right)$$
(77)

Bu şekilde elde edilebilecek mekanik model yüzeysel modele benzer şekilde Şekil 31'deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 31. Homojen bir zemin sistemi üzerindeki gömülü temel sistemine sahip yapı sistemi için yatay ve dönme serbestliklerinin dikkate alındığı alt sistem yaklaşımı

2.1.2.4. Doğrudan Çözüm Yöntemleri

Yapı zemin etkileşiminin dikkate alınması amacıyla literatürde önerilen diğer bir çözüm yaklaşımıdır. Burada zemin ve yapı sistemi doğrudan sayısal yöntemler yardımıyla modellenerek bir yapı-zemin sistemi modeli oluşturulmaktadır. Sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanlar gibi literatürde bilinen sayısal yöntemler yardımıyla oluşturulan modellere etkiyen dış yükler ve bu yüklere göre yapının davranışı ve sistemin bütün fiziksel özellikleri sayısal olarak ifade edilerek çözüm gerçekleştirilmektedir. Alt sistem yaklaşımlarının basit olmaları rağmen doğrudan çözüm yöntemleri bu yöntemlere göre birçok üstünlüğe sahiptir. Adı geçen sayısal yöntemler vasıtasıyla gerçekleştirilen modeller yapı-zemin davranışını yeterli bir duyarlılıkta temsil etmesinin yanında gerek zemin gerekse de yapının herhangi bir noktasında oluşan iç kuvvetlerin elde edilmesi ve bunların yüklemeye bağlı değişimlerinin gözlenebilmesi imkanını da sağlamaktadırlar. Doğrudan çözüm yöntemlerinin diğer bir üstünlüğü de gerek zemin gerekse de yapının doğrusal ve elastik olmayan davranışlarının dikkate alınabilmesine imkan sağlamasıdır.

Doğrudan çözüm yöntemlerini de kendi aralarında sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan sınır elemanlar yönteminde sistem için zemin ortamı ve sınırlarda süreklilik sağlayacak bir matematik modelle sonuca gitmek amaçlanmaktadır. Burada zemin sistemine ait sınır durumlar ve frekans bağımlı değişkenlerin ifadesi büyük bir duyarlılıkla yapılabilmektedir. Bu sebeple doğrudan çözüm yöntemleri sürekli yöntemler olarak da nitelendirilmektedir. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri ise zemin sisteminin modellenmesi ayrı ayrı tanımlanmış çeşitli tipte elemanlar ve bunlara ait malzeme özellikleriyle gerçekleştirmek hedeflendiğinden bu tür yöntemler ayrık yöntemler olarak da adlandırılmaktadır (Chao, 1996).

Yapı zemin etkilesiminde, modellenmesi hedeflenen zemin ortamı genel olarak yarı sonsuz bir ortamdır. Yarı-sonsuz bu ortam sayısal yöntemlerle modellenirken iki parçaya ayrılarak modellenmektedir. Burada yarı sonsuz ortamı, yapıya yakın bölgelerde zemininin doğrusal olmayan davranışının daha etkin olduğu, temel-zemin arasındaki sürtünme taban kalkması ve bunlar gibi birçok özel durumun oluşabildiği "yakın bölge" ve daha çok zemininin doğrusal bir davranış sergilediği "uzak bölge" olarak adlandırılan iki bölgeye ayırmak mümkündür (Wolf ve Song 1996.a; 1996.b). Genel olarak burada belirtilen yakın bölge zemini her durumda sayısal olarak modellenmektedir. Uzak bölge zemini için ise iki seçenek bulunmaktadır. Bunlardan ilki için etkileşim hareketin etkilediği bütün zemin parçasını içerecek kadar bir kısmı sonlu elemanlar ile modellemektir. Bu durumda oluşturulan zemin modelinin sınırında etkileşim sebebiyle oluşan yerdeğiştirmelerin şıfıra eşit olması ya da yakınsaması gerekmektedir. İkinci olarak yakın bölgeyle birlikte sanal sınırlar kullanmak literatürde sıkça karşılaşılan bir diğer yaklaşımdır. Bu durumda zemine ait yayılmaya bağlı sönüm ve yansıma gibi etkilerin dikkate alınabilmesi mümkün olmaktadır. Genel olarak sanal sınır yaklaşımlarının kullanılması, dikkate alınacak zemin boyutlarını küçülttüğünden işlem kolaylığı sağlamakta ve bu bölgedeki etkilerin daha gerçekçi bir şekilde dikkate alınması imkan tanımaktadır. Burada zemin modeli büyülterek zemin sınırındaki yerdeğiştirmeyi sıfırlamak suretiyle, her ne kadar doğru çözüme ulaşılacak olsa da gerçekleştirilen bu modelini pratik amaçlar için kullanmak oldukça güç olabilmektedir (Nofal, 1998).

Genel olarak doğrudan çözüm yöntemleri ile alt sistem yaklaşımları birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermektedir (Chao, 1996). Sonlu elemanlar gibi doğrudan çözüm yöntemleri kullanıldığında eleman tipi, sonlu eleman ağı, deprem etkisi için yükleme aralığı ve özel enterpolasyon tekniklerinde yapılacak hatalardan kurtulmak için sonuçların alt sistem yaklaşımlarındaki sonuçlarla karşılaştırılması faydalı olmaktadır. Bu sebeple bu çalışma kapsamında incelenecek olan ayaklı depo modelleri için bu husus dikkate alınmıştır.

2.1.2.4.1. Kütlesiz Temel Yaklaşımı

Yapı-zemin etkileşiminin sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemlerle incelendiği durumlarda yaygın olarak kullanılan yaklaşım "Kütlesiz Temel" ya da "Eklenmiş Hareket" olarak adlandırılan yaklaşımdır (Clough ve Penzien, 1993; Wilson, 2002). Bu yaklaşıma ait ifadeler matematiksel olarak basit, teorik olarak doğru ve genel amaçlı yapısal analiz programları içerisinde rahatlıkla kullanılabilecek formdadır. Bunlara ek olarak verilen bağıntılar sadece bir kaynağa bağlı yayılan deprem etkisi altında değil, her türlü kaynaktan yayılan deprem dalgaları için geçerli bir şekilde kullanılabilmektedir (Wilson, 2002). Bu yöntem için öncelikli olarak yapı-temel/zemin sisteminin temel seviyesinde meydana gelen yer hareketinin doğrudan serbest alan hareketi ya da kinematik etkileşimin de dikkate alındığı yer hareketinin belirlenmesi ile başlanmaktadır. Buradan Şekil 32'de gösterilen sistemin istenen doğrultu ve/veya doğrultularda hesaplanan bu hareket etkisinde olduğundan hareketle çözüme gidilmektedir.

Şekil 32'de gösterilen sistemin sayısal olarak eklenmiş hareket yaklaşımıyla modellenmesinde yapı-temel/zemin sistemi üç farklı ortam olarak ifade edilmektedir. Bu modelde yapıya ait noktalar "s" ile, temel/zemin sistemine ait noktalar, "f" ile ve yapı-temel/zemin sistemi etkileşim yüzeyinde bulunan noktalar ise "c" ile gösterilmektedir. Bu ifadelere bağlı olarak Şekil 31'de verilen sisteme ait sönümsüz hareket denklemi doğrudan rijitliklere bağlı olarak, (U) toplam yerdeğiştirmeleri göstermek üzere,

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0\\ 0 & M_{cc} & 0\\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{U}_s\\ \ddot{U}_c\\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0\\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf}\\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s\\ U_c\\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0 \end{bmatrix}$$
(78)

bağıntıları yardımıyla yazılabilir. Burada yapı-temel/zemin sistemi ara yüzey kütlesi (M_{cc}) ve rijitlikleri (K_{cc})

$$M_{cc} = M_{cc}^{(s)} + M_{cc}^{(f)} \qquad K_{cc} = K_{cc}^{(s)} + K_{cc}^{(f)}$$
(79)

bağıntılarıyla belirlenebilir. Burada "*s*" üst indisi etkileşim yüzeyinde bulunan ortak noktalar yapıya ait olanları, "*f*" üst indisi ise temel/zemine ait olanları göstermektedir. (78) bağıntısında toplam yerdeğiştirmeye göre hareket denkleminin elde edilmiş olması sebebiyle sistem üzerine etkiyen bir dış kuvvet yoktur. Burada kinematik etkileşimin dikkate alındığı yer hareketi, yapı sisteminin olmadığı sadece temel/zemin sistemine ait modelden serbest alan hareketi yardımıyla elde edilebilir. Kinematik etkileşimin çok büyük temel sistemleri veya derin temel sistemlerinde etkin olduğunun, diğer sistemler için ihmal edilebilecek bir düzeyde kaldığını belirtmekte yarar görülmektedir.



Şekil 32. Kütlesiz temel yaklaşımı için yapı-temel/zemin etkileşim modeli

Yukarıdaki bağıntılardan hareketle üç boyutlu ortama ait toplam hareket, serbest alan hareketine $(u^*, \dot{u}^*, \ddot{u}^*)$, ve temel/zemin siteminin serbest alan hareketine rölatif olarak meydana gelen harekete (u, \dot{u}, \ddot{u}) , bağlı olarak aşağıdaki bağıntılar yardımıyla ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_c \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_s^* \\ u_c^* \\ u_f^* \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \dot{U}_s \\ \dot{U}_c \\ \dot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{u}_s^* \\ \dot{u}_c^* \\ \dot{u}_f^* \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} \ddot{U}_s \\ \ddot{U}_c \\ \ddot{U}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{u}_s^* \\ \ddot{u}_c^* \\ \ddot{u}_f^* \end{bmatrix}$$
(80)

(80) bağıntısı (78) bağıntısında yerine yazılırsa

$$\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_c \\ \ddot{u}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_c \\ u_f \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & M_{cc} & 0 \\ 0 & 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s^* \\ \ddot{u}_c^* \\ \ddot{u}_f^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} & 0 \\ K_{cf} & K_{cc} & K_{cf} \\ 0 & K_{fc} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s^* \\ \dot{u}_c^* \\ \dot{u}_f^* \end{bmatrix} = R$$
(81)

bağıntısı elde edilir. Eğer serbest alan hareketine bağlı yerdeğiştirme (u_c^*) sabit ise veya diğer bir ifadeyle yükleme statik ise yapıda meydana gelen yerdeğiştirmeyi de eylemsizliğe bağlı olarak (u_c^*) ile ifade etmek mümkündür. Bu durumda basitleştirilmiş (81) bağıntısı statik hal için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} \\ K_{cs} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s^* \\ u_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(82)

Burada temel/zemin sistemine ait hareket denklemi ise

$$\begin{bmatrix} M_{cc}^{(f)} & 0\\ 0 & M_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_c^*\\ \ddot{u}_f^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{cc}^{(f)} & K_{cf}\\ K_{cf} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^*\\ u_f^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\\ 0 \end{bmatrix}$$
(83)

şeklindedir. Bu bağıntıda temel zemin sisteminde yapının olmadığı durum göz önüne alındığından hareket denkleminin sağ tarafı sıfıra eşittir. (81) bağıntısının sağ tarafı ve ya sisteme ait yük vektörü (R) yalnızca yapı ve yapı-temel/zemin etkileşim yüzeyinde yapı sistemine ait olan noktalardaki kütleler yardımıyla

$$R = \begin{bmatrix} M_{ss} & 0 & 0\\ 0 & M_{cc}^{(s)} & 0\\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{v}_s \\ \ddot{v}_c \\ 0 \end{bmatrix}$$
(85)

şekilde yazılabilir. Bu sebeple (81) eşitliğinin sağ tarafı zemin sistemine ait kütleleri içermediğinden, üç boyutlu yapı-temel/zemin sistemine ait hareket denklemi, sönümünde hesaba katıldığı şekliyle aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{M}\ddot{u} + \mathbf{C}\dot{u} + \mathbf{K}u = -\mathbf{m}_{\mathbf{x}}\ddot{u}_{gx}(t) - \mathbf{m}_{\mathbf{y}}\ddot{u}_{gy}(t) - \mathbf{m}_{\mathbf{z}}\ddot{u}_{gz}(t)$$
(86)

Burada M, C ve K yapı-temel/zemin sistemine ait kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini $\ddot{u}_{gx}(t)$, $\ddot{u}_{gy}(t)$ ve $\ddot{u}_{gx}(t)$ serbest alan hareketinin her bir boyut için ivme bileşenlerini göstermektedir. Uygun sonlu eleman modeline karar verebilmek için bu yaklaşımda temelzemin sistemi sınırlarında rölatif yerdeğiştirmelerin (*u*) sıfıra eşit olması gerekmektedir. Aksi durumda sistem sınırları adeta birer yansıtıcı olarak çalışmakta ve sonsuza yayılması gereken dalgalar bu sınırlardan yansıyarak yapıya geri dönmekte bu nedenle gerçekte olmayan etkiler doğmaktadır. Genel amaçlı yapısal analiz programlarında burada verilen yaklaşım rahatlıkla kullanılabilmektedir (Şekil 33). Bu programlar yapıya etkiyen dinamik yükleri tüm noktalara uyguladıklarından burada bu yaklaşımın uygulanabilmesi için zemin elemanlarına ait kütlelerin ihmal edilmesi gerekmektedir.



Şekil 33. Kütlesiz temel yaklaşımıyla elde edilmiş ayaklı depotemel/zemin etkileşimine ait sonlu eleman modeli

2.1.2.4.2. Sonlu Eleman Modelleriyle Sanal Sınırların Kullanılması

Yarı sonsuz ortamların çeşitli tipte deprem dalgalarına karşı dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için doğrudan çözüm yöntemleri ile modellemenin birçok üstünlüğünden daha önce de bahsedilmişti. Bir yapı için düşünüldüğünde yarı sonsuz ortamın yapıyı etkileyen kısmının boyutlarının oldukça büyük olması gerekmektedir. Bu durumda sonlu elemanlar yöntemiyle modellenecek zemin, çözümü hesap zamanı açısından güçleştirmekte, buna ek olarak doğrusal olmayan davranışının dikkate alınması da zorlaşmaktadır. Bu tür zorlukların üstesinden gelebilmek maksadıyla, zemin kısmını zeminin doğrusal davranmadığı ve doğrusal davrandığı iki bölümde incelemek daha önce de ifade edildiği gibi mümkündür. Doğrusal davranmayan (yakın bölge) kısmın yapıyla birlikte modellenmesi durumunda bu alan içersinde yayılan dalgaların gerçekte sonsuza yayılmalarından meydana gelen yayılmaya bağlı (radiational) sönüm etkilerinin ihmal edilmesine ve buna ek olarak sonsuz bir ortamda yayılmaları durumunda oluşmayacak yansıma etkilerinin doğmasına sebep olmaktadır. Yakın bölge zemini ile yapı modelinde sanal sınırların tanımlanması, bu tür etkilerin önlenmesine ve yayılmaya bağlı sönüm etkilerinin dikkate alınmasına olanak tanımaktadır. Genel olarak burada ifade edilen sanal sınırların yükleme frekansına bağlı olmaları, bu tür çözümlemelerin frekans ortamında gerçekleşmesini daha kolaylaştırmasına karşın zaman ortamında çözümlemede de bu tür sınırlar kullanılabilmektedir. Bu nedenle birçok sanal sınır modeli geliştirilmiştir. Bunlardan ilki gerek P gerekse de S dalgalarının yarı sonsuz ortam içerisindeki etkileri dikkate alınarak geliştirilen ve model zemin sınırlarında tanımlanan yansıtmayan sınırlardır (Lysmer ve Kuhlmeyer, 1969). Daha sonraları gerek zaman gerekse de frekans ortamında kullanılabilen Sönüm-Cözücü Yayılma metodu (Damping-Solvent Extraction Method) (Song ve Wolf, 1994; Wolf ve Song, 1996b), çift asimptotik çok yönlü geçirgen (Doubly-Asymptotic Multi Directional Transmiting Boundary) sınır yaklaşımı (Wolf ve Song, 1995; Wolf ve Song, 1996b), eksene yakın (Paraxial Boundary) sınır yaklaşımı (Wolf, 1988; Andrande, 1999) ve zaman ortamında kullanılabilen ve doygun zeminlerdeki boşluk suyu basıncının da dikkate alındığı direne edilmiş viskoz sınır (Drained Viscous Boundary) yaklaşımı (Zerfa ve Loret, 2004) gibi yaklaşımlar da literatürde bulunmaktadır.

• Yansıtmayan Sınırlar

Deprem dalgalarının yarısonsuz bir ortam içerisinde yayılmaları durumunda dalganın ortamda oluştuğu noktadan başlayarak sonsuza yayılması gerekmektedir. Bu nedenle yarı sonsuz ortamların modellenmesinde ya oldukça büyük sonlu eleman modelleri kullanılarak dalganın ortamın boyutuna bağlı sönümlenmesi sağlanmalı ya da belirli bir noktada varsayılan sınır için uygun sınır şartları dikkate alınmalıdır. Bu sınır şartlarının sınıra gelen dalga enerjisini tekrar ortam içerisine yansıtmayacak ve bu noktada dalgayı sönümleyecek bir nitelikte olması gerekmektedir. Bu durum aşağıdaki ifadeler yardımıyla özetlenebilir.

Yayılma durumunda, zamana bağlı kuvvetler Şekil 34'de görülen birim küp içerisinde dalga yayılımına sebep olmaktadır. Bu küp için denge bağıntısı kurulmak istenirse

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} - \frac{d\sigma_x}{dx} = 0 \tag{87}$$

ifadesi elde edilir. Burada σ_x gerilmesi, E_c hacimsel elastisite modülünü, ε_x x doğrultusundaki şekildeğiştirmeyi göstermek üzere $E_c \varepsilon_x$ ile belirlenebilir. Buradan hareketle bilinen dalga denklemi ifadesi $v_p = \sqrt{E_c/\rho}$ olmak üzere aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\frac{d^2u}{dt^2} - c_p^2 \frac{d^2u_x}{dx^2} = 0$$
(88)



Şekil 34. Yayılma durumunu ifade etmek için kullanılan birim küpe etkiyen kuvvetler

Burada x doğrultusunda hareket eden harmonik bir dalgaya ait yerdeğiştirme (u(t,x)) ve hız $(\dot{u}(t,x))$; fonksiyonları için

$$u(t,x) = U\left[\sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p}\right)\right]$$
(89)

$$\dot{u}(t,x) = U\omega \left[\cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) - \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) \right]$$
(90)

ifadeleri yazılabilir. Aynı doğrultudaki şekildeğiştirme ve gerilme zamana bağlı olarak

$$\varepsilon(t,x) = \frac{du}{dx} = -\frac{\dot{u}(x,t)}{v_p}$$
(91)

$$\sigma_x = E_c \varepsilon(t, x) = -\rho v_p \dot{u}(x, t) \tag{92}$$

bağıntılarıyla belirlenebilir. Böylece sınır ortamında birim alanda boyuna dalga hareketi ile oluşacak gerilme miktarı (92) bağıntısıyla elde edilebilir (Wilson, 2002).

Lysmer ve Kuhlmeyer (1969) sonsuz ortamda yayılan P ve S dalgalarının ortamın sınırlı bir ortam olarak modellenmesi durumunda sınırların nasıl modelleneceğine yönelik iki boyutlu dalga denklemini ele alarak, yukarıda elde edilen bağıntılara benzer bir yaklaşım izlemişlerdir. Her iki doğrultuda da bu dalgaların enerjilerinin sönümlenmesi ve bu yolla sınırdaki yansıma etkilerinin giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu sayede her bir doğrultu için sınır yüzeyde oluşan gerilmeler

$$\sigma_n + \rho v_p \dot{u}_n = 0 \quad \tau_{t1} + \rho v_s \dot{u}_n = 0 \qquad \tau_{t2} + \rho v_s \dot{u}_{t2} = 0 \tag{93}$$

bağıntılarıyla ifade edilmiştir. Burada ρ ve v_p ve v_s dikkate alınan ortama ait yoğunluğu ve boyuna dalga ve kayma dalgası hızını ifade etmektedir. *n* ve *t* indisleri ise sanal sınırdaki doğrultularını, σ ve τ sınırda oluşan normal ve kayma gerilmelerini, \dot{u} ise hız

vektörünü göstermektedir (Şekil 35). Burada A_n , A_{t1} ve A_{t2} sırasıyla Şekil 35'deki sonlu eleman ağında gösterilen taralı alanları göstermektedir.





Şekil 35'den de görüleceği gibi sistemde sanal sınırların kullanılmasıyla sistem hareket denklemine özel bir sönüm matrisi dahil edilmektedir. Bu sebeple genel hareket denklemi aşağıdaki şekli alacaktır.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{C}^*]\{\dot{u}(t)\} + [\mathbf{K}]\{u(t)\} = \{R(t)\}$$
(94)

Burada C^* sisteme ait özel sönüm matrisini ifade etmek üzere bir serbestlik derecesi için aşağıdaki bağıntıda olduğu gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n \rho v_p & 0 & 0 \\ 0 & A_{t1} \rho v_s & 0 \\ 0 & 0 & A_{t2} \rho v_s \end{bmatrix}$$
(95)

• Sanal sınırların yerlerinin belirlenmesi

Sanal sınır temel sisteminden ne kadar uzakta yerleştirilirse etkileşimde doğacak olan kusurlar o kadar giderilmiş dolayısıyla da model duyarlılığı artırılmış olacaktır (Wolf,

1988). Sanal sınırın yerinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalarda, sınırın yerinin zemin sistemin sönüm mekanizması, ortamdaki dalga frekansı ve hızı gibi birçok parametreye göre değiştiği görülmüştür. Bu çalışmalarda sınırın ³/₄ ila 1 tam Rayleigh dalga boyu kadar temel sisteminden uzakta olması gerektiği ifade edilmektedir (Lysmer ve Kuhlmeyer, 1969). Buna ek olarak Hadjian vd., (1974) zeminin doğrusal olmayan davranışını inceledikleri çalışmada sanal sınırlar kullanmaksızın zemin sınırlarını yapı temel sisteminin yarıçapının altı katı mesafede oluşturmuştur.

• Sonlu eleman ağının seçilmesi

Sonlu eleman ağının seçilmesinde ortamda yayılan dalgaların sonlu eleman içerisinde gerçeğe yakın bir şekilde yayılmasına olanak sağlayacak bir modelin oluşturulması gerekmektedir. Aksi taktirde sonlu eleman dalgayı filtre ederek dalga formatını bozacağı için büyük hatalar meydana gelebilmektedir (Kuhlmeyer ve Lysmer, 1973). Bu sebeple sonlu eleman ağında kullanılan en küçük eleman boyutunun dikkate alınan en büyük frekansa sahip dalga boyuna oranın uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalarda temel zemin sisteminin üç boyutlu olarak modellenmesi gerektiği ve iki boyutlu modellerle sistemin temsil edilemeyeceği ortaya konmustur (Luco ve Hadjian 1974). Bütün bunlar irdelendiğinde seçilen eleman boyutunun 3 boyutlu 8 noktalı izoparametrik olması durumunda elemanın en kısa boyutunun dalga boyutuna olan oranının dikkate alınmak istenen en büyük frekansındaki dalga boyuna oranın 1/10 dan küçük olması gerekmektedir. Bu oranın Kuhlameyer ve Lysmer (1973) tarafından tabakalı zeminlerde 1/8, tabakasız zeminlerde ise 1/5 den daha büyük alınmaması gerektiği, aksi takdirde hataların %15 in üzerine çıkacağı ifade edilmektedir. Bu oranın 1/12 civarında seçilmesi durumunda ise sonuçların doğruluğunun üst seviyelerde gerçekleşeceği hatanın ise %1 seviyelerine kadar çekilebileceği ifade edilmektedir (Lysmer ve Kuhlmeyer, 1969).

2.1.3. Zeminin Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranışı

Yapı mühendisliğinde, bir yapının analizini gerçekleştirirken, genellikle çeşitli etkiler altında sistemde oluşan şekildeğiştirmeler yapının boyutlarına oranla çok küçük bir değer olarak kabul edilir ve denge denklemleri şekildeğiştirmemiş sisteme göre yazılır.

Uygunluk denklemlerinde de, ikinci derece momentlerinin etkisi dikkate alınmamaktadır. Ancak bazı durumlarda, yapıda oluşan şekildeğiştirmeler, yapının boyutlarına oranla ihmal edilemeyecek değerlere ulaşabilir, bu durumda denge denklemleri yapının şekil değiştirmiş geometrisine göre yazılmalıdır. Bunlara ek olarak yapı malzemesi gerilme şekildeğiştirme ilişkisi ise farklı yükleme durumları için çeşitli davranışlar sergilemektedir. Bu nedenlerle teorik olarak artan yükler altında her sistem doğrusal davranıştan uzaklaşma eğilimindedir. Mühendislikte statik yükler etkisindeki bir sistemin davranışının elastik sınırlar içerisinde kalması beklenebilir. Ancak dinamik etkiler söz konusu olduğunda, geometrik ya da malzemeye bağlı doğrusal olmayan davranış göstermesi olasılığı artmaktadır. Durum böyle olunca sisteme ait elemanların doğrusal olmayan davranış göstermeleri ve plastikleşen kesitlerin oluşmasının sistem davranışını değiştireceği açıktır. Şekil 36'da tekrarlı yük etkisindeki bir katı cisim için yükleme (OA) ve boşaltma (BO) eğrileri şematik olarak görülmektedir. Burada malzeme, yükleme eğrisinde orantılılık sınırı içerisinde lineer bir davranış göstermekte bu noktadan sonra kesit akma sınırına (σ_v - ε_v) ulaşmaktadır. Akma olayının başlamasını takiben cisimde plastik şekildeğiştirmeler oluşmakta, cisme etkiyen yüklerin kaldırılması durumda ise elastik şekildeğiştirmeler (ε_e) geri dönerken (tersinir deformasyon) akmadan sonra meydana gelen plastik şekildeğiştirmeler (kalıcı deformasyon) geri dönmemektedir. Burada belirtilmesi gereken önemli bir husus ise genellikle orantılık sınırı ile akma sınırı arasındaki kısmın çok küçük olduğu, bu nedenle de her iki sınırın çoğu zaman çakıştığının kabul edildiğidir.



Şekil 36. Katı cisim için şematik gerilme şekildeğiştirme eğrisi

Yükleme ve boşaltma eğrileri çeşitli malzemeler için farklılıklar gösterebilmektedir. Örnek olarak Şekil 37a ve b'de görüldüğü gibi davranışı tamamen elastik sınırlar içerisinde kalan bir malzeme için yükleme ve boşaltma eğrileri çakışarak malzeme *elastik* davranış göstermektedir. Yine aynı şekillerden görüldüğü gibi gerilme ile şekildeğiştirme arasında *doğrusal* ya da *doğrusal olmayan* bir ilişki oluşabilmektedir. Şekil 37c'de *iç sürtünmeli elastik* malzemeyi temsil eden gerilme şekildeğiştirme ilişkisi görülmektedir. Burada yükleme ve boşaltma eğrileri çakışmamakla birlikte kalıcı şekildeğiştirmeler oluşmamaktadır. Yükleme ve boşaltma eğrilerinin aynı olmamasıyla birlikte şekildeğiştirmelerin tamamıyla geri dönmedikleri plastik malzemeler Şekil 37d'de, yüklemenin tamamıyla ortadan kalkmasına karşın geri dönmeyen şekildeğiştirmelerin zamanla tamamen geri döndüğü visko-elastik ya da kısmen geri döndüğü visko-plastik (kalıcı) şekildeğiştirmeyi ε^{v} ise viskoelastik şekildeğiştirmeyi temsil etmektedir.



Şekil 37. Çeşitli malzemeler için şekildeğiştirme türleri

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi malzeme davranışlarını çeşitli başlıklar altında toplamak mümkündür. Bunların matematik modellerle birlikte doğrudan kullanılmasının yarattığı çeşitli zorlukların üstesinden gelebilmek için, bazı idealleştirmeler yapılmaktadır. Yapı sistemlerinde kullanılan gerçek malzemelerin şekildeğiştirme özellikleri üzerinde bazı idealleştirmeler yaparak doğrusal, doğrusal olmayan elastik, ideal ve pekleşen elasto-plastik, rijit plastik gibi bazı idealleştirilmiş malzemeler elde edilmektedir. Bu ideal malzemelerin yük yerdeğiştirme eğrilerinden bazıları Şekil 38'de görülmektedir (Çakıroğlu ve Özer, 1980, Özer, 2005).



Şekil 38. Bazı ideal malzeme davranışları

Bir boyutlu durum için Şekil 38'deki gibi ifade edilen yük yerdeğiştirme ilişkileri, iki ve üç boyutlu gerilme durumda ise kırılma hipotezleri ile ifade edilebilmektedir. Kırılma hipotezleri ile malzemelerin hangi gerilme durumlarında kırılma ya da plastikleşme safhasına eriştiği bazı araştırmacılar tarafından çeşitli hipotezler ortaya atılarak tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu hipotezlerden başlıcaları gerilme, şekildeğiştirme ya da enerjiye bağlı olarak sınıflandırılabilirler. Genel halde bütün bu yaklaşımlar gerlemeye bağlı olarak da elde edilebilirler.

Literatürde sıkça kullanılan gerilemeye bağlı yaklaşımlardan başlıcaları maksimum normal ve kayma gerilemesi hipotezleri, Mohr-Coulomb kayma gerilemesi hipotezi ve Drucker-Prager hipotezidir (Şekil 39). Bunlardan elde edilen değerlerle çeşitli deneysel araştırmalardan elde edilenler karşılaştırıldığında bazı malzemeler için bu hipotezlerin gerçeğe yakın sonuçlar vedikleri görülmüştür (Koçak, 1999). Bu nedenle bütün malzemeler için her hipotezin aynı duyarlılıkta sonuç üretmesi beklenmemelidir. Bu noktadan hareketle malzeme türüne ve yükleme tipine bağlı olarak uygun akma kriterinin seçimi, doğru sonuca ulaşmak için son derece önemli olmaktadır.



Şekil 39. Farklı kırılma kriterleri için asal gerilme uzayında izotropik akma yüzeyleri

Kırılma ya da plastikleşme olayı en genel halde, σ bütün gerilme bileşenlerini içeren gerilme tansörünü, <u>k</u> kinematik pekleşmeyi, κ ise izotropik pekleşmeyi göstermek üzere aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$f\left(\mathbf{\sigma},\underline{\mathbf{\kappa}},\boldsymbol{\kappa}\right) = 0 \tag{96}$$

Çeşitli hipotezler için kırılma yüzeyi farklı kriterlere bağlı olarak elde edilmektedir. Örneğin izotropik pekleşmeye ve gerilmeye bağlı olarak akma yüzeyi genel halde iki boyutlu asal gerilme düzleminde Şekil 40'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 40. İki boyutlu asal gerilme düzleminde akma yüzeyi ve akma kuralı (diklik şartı)

Yukarıdaki şekilden de görülebileceği gibi elasto-plastik bir malzemede meydana gelen toplam şekildeğiştirme (ε_{ij}) elastik (ε^{e}) ve plastik şekildeğiştirme (ε^{p}) bileşenlerine sahiptir. Bu nedenle toplam şekildeğiştirme aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \tag{97}$$

Bu tür malzemelerde elastik sınırlar içerisinde Hooke kanunun geçerli olduğu ve şekildeğiştirmelerin buna bağlı elde edilebileceği bilinmektedir. Ancak elastik davranışın bittiği ve plastik davranışın başladığı noktada davranış daha farklı olmaktadır. Çeşitli araştırmacılar yaptıkları deneysel çalışmalarda akma olayının akma yüzeyine bağlı geliştiğini tespit etmişlerdir. Bu noktadan hareketle, çeşitli yaklaşımlarda sıklıkla plastik şekildeğiştirmenin akma yüzeyine dik olarak geliştiği kabulü kullanılmaktadır (Zienkiewicz ve Taylor, 2000.). Bu olay akma kuralı (diklik şartı) olarak bilinmekte ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{ij}^{p} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$$
(98)

Burada λ malzemeye bağlı skaler bir fonksiyonu (plastik çarpan) göstermektedir, pozitif olduğunda yükleme negatif olduğunda ise boşaltma durumunu ifade etmektedir, Fdeviatorik gerilme bileşeninin ikinci (J_2) ve üçüncü (J_3) invaryantlarına bağlı olarak gerilme ve pekleşme durumlarına da ifade edebilen plastik potansiyel fonksiyonunu göstermektedir. Bu fonksiyonun akma fonksiyonu (f)'e eşit olması durumunda çakışık tipte malzeme (birleşik akma kuralı), olmaması durumunda ise çakışık olmayan tipte malzeme davranışını göstermektedir. Çakışık tipte elasto-plastik bir malzeme için genel halde gerilme şekildeğiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir (Chen ve Mizuno, 1990).

$$d\sigma_{ij} = C^{ep}_{ijkl} \varepsilon^p_{kl} \tag{99}$$

Burada elasto-plastik rijitlik tansörü (C_{ijkl}^{ep})
$$C_{ijkl}^{ep} = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + (K - 2/3G)\delta_{ik}\delta_{jl} - \frac{1}{H}H_{ij}H_{kl}$$
(100)

şeklinde elde edilebilmektedir. H ve H_{ij}

$$H = 9KA^{2} + 4GJ_{2}B^{2} + 12GJ_{3}BC + 2G(s_{ik}s_{kj}s_{il}s_{lj} - 4/3J_{2}^{2})C^{2}$$
(101)

$$H_{ij} = 3KA\delta_{ij} + 2G(Bs_{ij} + Ct_{ij})$$

$$\tag{102}$$

ifadeleriyle, bu bağıntılardaki A, B, C ve t_{ij} ise

$$A = \frac{\partial f}{\partial I_1} ; \quad B = \frac{\partial f}{\partial J_2} ; \quad C = \frac{\partial f}{\partial J_3} ; \quad t_{ij} = s_{ik} s_{kj} - 2/3 J_2 \delta_{ij}$$
(103)

bağıntılarıyla belirlenmektedir. Burada, s_{ij} deviatorik gerilme bileşenini, δ_{ij} Kroncker deltasını, I_1 , I_2 , ve I_3 gerilme tansörünün inveryantlarını, J_1 , J_2 , ve J_3 ise deviatorik gerilme bileşeninin inveryantlarını göstermektedir.

Zeminin genellikle yapı sistemine nazaran daha hassas bir karaktere sahip olduğu, bu nedenle yapı-zemin etkileşimi açısından düşünüldüğünde doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasının oldukça önemli olabildiği bilinmektedir (Chen ve Mizuno, 1990). Zeminin diğer malzemelere göre davranışının farklı olması, gerilme düzeyine bağlı olarak kayma dayanımının artması, ve çekme gerilmelerine karşı gösterdiği davranışın basınç durumundan oldukça farklı olması, bu kriterleri kapsayacak bir akma kriterinin dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Literatürde gerek beton (Akköse, 2000; Celayır, 2004) gerekse de zemin için Drucker-Prager elastoplastik malzeme yaklaşımı sıklıkla kullanılmakta ve yukarıda ifade edilen koşullara cevap verebilmektedir (Chen ve Mizuno 1990; Bathe 1996). Bu nedenle bu çalışmada zeminin doğrusal olmayan davranışı bu yaklaşımla ifade edilmektedir (Şekil 41).



Şekil 41. İki ve üç boyutlu asal gerilme uzayında Drucker-Prager akma yüzeyi ve düzlemi

Drucker-Prager akma kriterine göre akma yüzeyi (f) aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$f(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{104}$$

Burada α ve *k* malzemeye bağlı katsayılar olup kohezyon (*c*) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı olarak aşağıdaki bağıntılar yarımıyla elde edilebilir.

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} veya \quad \alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \quad k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \tag{105}$$

2.2. Depolar İçin Sıvı-Yapı Etkileşiminin Değerlendirilmesi

Sıvı depolamak için ya da çeşitli nedenlerle inşa edilmelerine rağmen yapılarında büyük sıvı kütlelerini de bulunduran sistemler, gerek statik olarak gerekse de dinamik olarak sıvı sebebiyle ek yüklerin etkisinde kalmaktadır. Statik olarak durum yaygın olarak bilinen şekliyle hidrostatik basınçlardan ibaret iken, dinamik halde sıvının ve deponun geometrik ve mekanik özelliklerine bağlı olarak çeşitli şekillerde etkileşimin ortaya çıkması muhtemeldir. Örneğin sıvının geometrik olarak sınırlarına, sıkışabilirlik durumuna ve viskozite gibi özelliklerine bağlı olarak etkileşimde çeşitli farklılıklar oluşabilmektedir.

Depo-sıvı sistemlerinin dinamik bir etki altında kaldığı durumlarda davranışlarında başlıca iki hareketten söz edilebilir. Bunlardan ilki depo ile birlikte hareket eden sıvı

kütlesi (impuls kütlesi) ve bunlardan bağımsız olarak hareket eden ve impuls kütlesine nazaran değişik periyotlarla salınım yapan sıvı kütleleri (salınım kütleleri) olarak iki kısımda tanımlanabilmektedir. Genel olarak literatürde bulunan ilk çalışmalar, Westergaard (1931) tarafından yapılanlarda da olduğu gibi hazne duvarına etkiyen impuls kütlesine bağlı hidrodinamik basıncın belirlenmesine yönelik olarak başlatılmıştır. Daha sonra, Abramson (1966), Bauer (1971; 1972; 1992), Housner (1957; 1963) ve Veletsos (1976; 1984) tarafından geliştirilen analitik yöntemlerle salınım kütlesinin etkilerinin de hesaba katılabildiği farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak Dieterman ayaklı depoların hazne kısmındaki bacanın da hesaba katıldığı bir modeli Bauer'in kullandığı yaklaşımdan faydalanarak geliştirmiştir (Dieterman 1986; 1988; 1993). Bu sebeple temel olarak geliştirilen analitik yöntemler tek kütleli, iki kütleli ve çok kütleli sistemler olarak sınıflandırılabilirler. Bu tür analitik yaklaşımlar genelde pratik çözümlemelerde kullanılmıştır. Bu tez kapsamında bu yaklaşımların analitik olarak kullanılabilecekleri gibi sonlu elemanlar yaklaşımı ile birlikte de kullanılabilecekleri geliştirilen modellerle gösterilmektedir. Şekil 42'de bu tez kapsamında kullanılan yöntemlerden biri görülmektedir.



Şekil 42. Analitik yaklaşımlarla yapı sonlu elemanların birlikte kullanıldığı model

Modelde sıvı kütlesi salınım ve impuls kütlesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan impuls kütlesi hesaplanan yükseklikte hazne sonlu elemanına uygun şekilde eklenerek, salınım kütlesi ise hesaplanan salınım rijitliğiyle uygun yükseklikte depo haznesine bağlanarak sıvı analitik modeli yapı sonlu eleman modeli ile birleştirmektedir. Burada bu modelin zemin etkileşimini dikkate alarak, sıvı etkileşiminde kullanılan kütle ekleme yaklaşımından da yararlanmak için oluşturulan değişik modellerde kullanıldığını belirtmek uygun olmaktadır.

Analitik yöntemlere ek olarak literatürde bugüne kadar sayısal yöntemlerle birlikte kullanılabilen kütle ekleme yaklaşımlarının kullanıldığı (Borton ve Parker, 1987; Doğangün vd., 1996), Euler yaklaşımının kullanıldığı (Zienkiewicz, 1978) ve Langrange yaklaşımının (Wilson ve Khalvati, 1983; Olson ve Bathe 1983; Doğangün, 1995; Doğangün vd., 1996; Doğangün ve Livaoğlu, 2004) kullanıldığı çalışmalar ve Euler-Langrange yaklaşımının (Donea vd., 1982) kullanıldığı bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlar aşağıdaki başlıklar altında açıklanmaktadır.

2.2.1. Analitik Yaklaşımlar

2.2.1.1. Tek Kütleli Sistem

Ayaklı depoların deprem davranışlarına ilişkin ilk çalışmalar 1950'lerin başlarında gelistirilen tek kütleli sistem vaklasımı ile gerçeklestirilmiştir (Chandrasekaran ve Krishna, 1954). Bu yaklaşıma göre çeşitli taşıyıcı sistemlere sahip ayaklı depolar ve seçilen mekanik model Şekil 43'de verilmektedir. Burada temel olarak iki önemli konu ortaya çıkmaktadır. Bunlardan ilki sıvının davranışıyla ilgilidir. Eğer hazne tamamen su ile dolu ve sıvı hiçbir şekilde salınım yapmıyorsa sıvının tüm kütlesini hazne kütlesi ile beraber göz önüne alıp bütün sistemi tek kütleli bir sistem gibi düşünmek mümkün ve gerçekcidir. Buna karşın hazne içerisinde bulunan sıvı salınım yapıyorsa, bütün sıvı kütlesinin yapıyla birlikte hareket ettiği kabulü gerçekten uzak sonuçlar elde edilmesine neden olabilmektedir. İkinci önemli konu ise taşıyıcı sistemin şeklidir ki, bu durum rijitliğin sürekliliği, taşıyıcı sisteme ait sönüm ve süneklik karakteristikleri gibi parametreleri etkilendiğinden tüm sitemin davranışını olumlu ya da olumsuz sekilde değiştirebilmektedir. Genel olarak standartlarda kullanılan bu yaklaşım tarzı özellikle kabuk taşıyıcı sisteme ait rijitliğin bütün yükseklik boyunca sürekli olması durumunda, diğer taşıyıcı sistemlere göre daha etkili olarak uygulanabilir. Mekanik modellerde kullanılacak değişik türde ayak taşıyıcılarının rijitliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Dutta ve çalışma arkadaşları tarafından çerçeve taşıyıcı sisteme sahip ayak için düşey, yatay ve burulma rijitliklerini belirlenmiştir (Dutta vd., 2000a; 2000b; 2001). Bu rijitliklerden çerçeve taşıyıcı sisteme sahip ayak için yatay rijitlik aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilmektedir.

$$k_{s} = \frac{12 \cdot E_{cl} \cdot I_{cl} \cdot N_{cl}}{h_{cl}^{3}} \left[\frac{1}{\frac{2 \cdot I_{cl} N_{p} (4N_{p}^{2} - 1)}{A_{c} R_{s}^{2}} + N_{p} + 2(N_{p} - 1) \frac{E_{cl} I_{cl} / h_{cl}}{E_{b} I_{b} / L}} \right]$$
(106)

Burada E_{cl} , h_{cl} , I_{cl} ve N_{cl} sırasıyla taşıyıcı sistemde kolon malzemesine ait Elastisite modülünü, ayak sisteminin net yüksekliğini, bir kolona ait eylemsizlik momentlerini ve sayısını, E_b , L ve I_b ise her bir panelde bulunan sırasıyla kirişe ait Elastisite modülünü kiriş açıklığını ve kirişe ait eylemsizliği, N_p ayakta kullanılan panel sayısını ve R_s ise ortalama ayak yarıçapını göstermektedir.



Şekil 43. Ayaklı depolara ait tek kütleli mekanik model (a) betonarme silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip depo, (b) betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip depo, (c) çelik kafes ya da betonarme çaprazlı çerçeve taşıyıcı sistemli depo, (d) yığma taşıyıcı sisteme sahip depo, (e) tek kütleli mekanik model

Bu şekilde tek kütleli mekanik model yaklaşımı değişik standartlarda önerilmekle birlikte, bazı yönetmeliklerde kullanılabilmesi için kısıtlamalar mevcuttur. Örneğin Hindistan'a ait deprem yönetmeliğinde (IS:1893-1984) haznede bulunan bütün sıvı kütlesinin impuls kütlesi olarak yapıyla birlikte hareket edeceğinin her koşulda düşünebileceği ifade edilmektedir (Rai, 2002). Hazne derinliğinin yarıçapına oranının 4'ten küçük olduğu çok sığ depo haznesine sahip ayaklı depolar için salınım kütlesinin etkilerinin önemli olduğu düşünülürse, bu kabulün her durumda gerçekçi sonuçlar üretmeyeceği söylenebilir. Bu yönetmeliğe benzer şekilde American Concrete Institute (ACI 371R-98, 1998) tarafından önerilen ve halen uygulamada olan bir diğer yaklaşım tarzı daha mevcuttur. Bu yaklaşım tarzında su ağırlığının (W_w), yapı ağırlığı, su ağırlığı ve varsa hareketli yüklerin %25'inin toplamını ifade eden (W_G) ağırlığına oranın % 80 den fazla olduğu durumlarda tek kütleli yaklaşımın aşağıdaki verildiği şekliyle uygulanabileceği ifade edilmektedir (ACI 371R-98, 1998).

Bu yaklaşıma göre sistem yatayda (I_c) eylemsizliğine ve (k_c) rijitliğine sahip bir kiriş gibi düşünülmektedir. Bu sistemin yatay rijitliği (k_s) aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilir (ACI 371R-98, 1998).

$$k_s = \frac{3EI_c}{l_{cg}^3} \tag{107}$$

Burada l_{cg} haznede bulunan sıvının ağırlık merkezinden taşıyıcı sistemin mesnetlendiği temel sistemine olan mesafeyi, *E* ayağa ait Elastisite Modülünü, I_c ise betonarme taşıyıcı sistemler için donatının eylemsizliğinin ihmal edildiği kesit merkezine göre ayak taşıyıcı sisteminin eylemsizliğini göstermektedir. Kabuk türü ayak taşıyıcı sistemine sahip depolar için bu eylemsizliğin belirlenmesinde herhangi bir güçlük bulunmazken çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay rijitlik (k_s) birçok parametreye bağlı olarak (106) bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Bu sistemin doğal titreşim periyodu (T) için aşağıdaki bağıntı önerilmektedir.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_L}{g \cdot k_s}} \tag{108}$$

Burada g yer çekimi ivmesini, W_L göz önüne alınan tek kütleli sistemin; hazne ağırlığının tümünü, taşıyıcı sisteminin ağırlığının %66'sını ve sıvı toplam ağırlığını tümünü içeren ağırlık değerini göstermektedir.

2.2.1.2. Çok Kütleli Sistem

Silindirik bir hazne içerisinde bulunan sıvının dinamik davranışını ifade etmek (Şekil 44) için Bauer, Housner ve Veletsos gibi araştırmacılar salınımın da hesaba katılabildiği kütle-yay modellerini önermişlerdir. Sıvının dinamik davranışı düşünüldüğünde impuls kütlesine (m_i) ek olarak değişik frekans değerlerine sahip birden çok salınım kütlelerini de (m_{ci}) tanımlamak mümkündür. Bu sebeple impuls kütlesinin hazne ile beraber hareket etmesi, belirlenen kütlenin hazne duvarına rijit bir şekilde bağlı olduğunu düşündürmektedir. Salınım kütlelerinin her birinin ise salınım frekanslarına bağlı olarak (109) bağıntısından belirlenecek bir rijitlikle hazne duvarına, salınım yapan sıvı seviyesinde bağlı oldukları kabul edilmektedir (Şekil 44).

$$\omega_{c1}^2 = \frac{g}{R} 1.84 \text{ th} \frac{1.84 \cdot h}{R} \quad ; \quad k_{ci} = m_{ci} \omega_{ci}^2 \tag{109}$$

Burada m_{ci} , ω_{ci} k_{ci} sırasıyla i. salınım kütlesini, açısal frekansını ve rijitliğini göstermektedir.



Şekil 44. Kütle-yay modeli ile sıvı davranışının mekanik olarak tanımlanması

Yapılan araştırmaların bir kısmında pratik amaçlar için söz konusu salınım kütlelerinin bir tanesinin dikkate alınması, diğer kütlelerin ise ihmal edilebileceği belirtilmiştir (Housner, 1963; Shepherd, 1972). Burada belirtilen analitik modeller genellikle depoların pratik hesaplarında kullanıldıklarından ilk salınım kütlesinin hesaba katılmasının yeterli olduğu diğerlerinin yapı üzerinde önemli bir etkilerinin olmadığı literatürde yapılan çalışmalardan bilinmektedir (Haroun ve Ellaithy, 1985). Bu yöntemlere ek olarak Bauer ve Siekmann (1971) ve Haroun ve Housner (1981) silindirik yer üstü sıvı depoları için duvar esnekliğinin de hesaba katıldığı çalışmalar sonucu çok kütleli mekanik modeller de önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında betonarme ayaklı sıvı depolarında haznedeki duvar rijitliklerinin yeterli olması sebebiyle duvarın esnekliğinden kaynaklanan eşdeğer kütle dikkate alınmamıştır.

Bu çalışma kapsamında bulunan silindirik depolara ilişkin literatürde sıkça kullanılan başlıca yaklaşımlar aşağıda özetlenmektedir.

2.2.1.2.1. Housner'in İki Kütleli Sistem Yaklaşımı

Housner (1963) silindirik depolar için;

- 1. Hazne duvarının sıvıyla temasta bulunan yüzeyininin düşey ve düz olduğu,
- 2. Hazne duvarının rijit olduğu,
- 3. Sıvının sıkışmaz, viskositesiz olduğu,
- 4. Sıvının salınımından doğan yerdeğiştirmelerin küçük olduğu,
- 5. Sıvının dönmesiz olduğu,
- 6. Sıvının yatayda bir dinamik etkiye maruz kaldığında düşey membranlar arasında hareket ettiği,
- 7. Hareket esnasında düşey membranlar arasında olan su sıkışmayacağından yükselme eğilimi gösterdiği,

kabullerini yaparak pratik bir deprem hesabı önermektedir.

Bu yöntemle Tablo 13'de sunulan bağıntılar yardımıyla impuls ve salınım kütlelerinin toplam sıvı kütlesine olan oranları, salınım kütlesi frekansı ile bu kütlelerin etkime yükseklikleri ve bunlara bağlı hesaplanan hidrodinamik basınçlar, taban kesme ve taban eğilme momentleri belirlenebilmektedir. Bunları belirleyebilmek için basitleştirilmiş bir yaklaşım ortaya konmuştur. Bu mekanik modelde m_1 için impuls kütlesine ilave olarak boş hazne kütlesinin ve ayak kütlesinin belirli bir kısmı dikkate alınmaktadır. Dikkate alınacak ayak kütlesi için ACI 371R-98'de (1998) ayak kütlesinin %66'sının dikkate alınması önerilmektedir. Priestley vd., (1986) ayak kütlesinin tamamının dikkate alınmasını önermektedir. Modeldeki m_i kütlesi ise salınım kütlesinden oluşmaktadır (Şekil 45). Bu yöntem 1960'lardan bu güne kadar birçok uygulamada kullanılmış olup, Epstein (1976) tarafından bazı katkılar yapılarak tekrar düzenlenmiştir. Bu çalışma kapsamında da Housner yönteminin Epstein tarafından düzenlenmiş hali kullanılmaktadır.



Şekil 45. Ayaklı depo-sıvı sistemine ait eşdeğer mekanik modelle, iki kütleli model yaklaşımı

2.2.1.2.2. Bauer Çok Kütleli Sistem Yaklaşımı

Housner yaklaşımından farklı olarak birden fazla salınım kütlesinin de dikkate alınabildiği bir diğer yaklaşım da Bauer tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Bu yöntem 1964'den bu güne kadar birçok uygulamada kullanılmış olmakla beraber, Housner yaklaşımındaki 6.ve 7. kabuller dışındaki bütün kabulleri içermektedir. Farklı olarak 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. Bu yönteme ilişkin bağıntılar Housner yöntemiyle beraber Tablo 13'de verilmektedir. Bu tabloda m_w sıvı toplam kütlesini, λ_n birinci mertebeden birinci tipte Bessel fonksiyonun köklerini göstermektedir (λ_1 =1,8112; λ_2 =5,3314; λ_3 =8,5363). Eğer birden fazla salınım kütlesinin hesaba katılmak istenirse Tablo 13'de bulunan bağıntılar yardımıyla her bir salınım modu için uygun Bessel fonksiyonu bağıntılarda yerine konarak bu işlem gerçekleştirilebilir.

	Bauer modeli	Housner modeli (Epstein, 1976)			
Salınım frekansı (ω^2)	$\omega_n^2 = \frac{g}{R} \lambda_n \tanh\left(\lambda_n \frac{h}{R}\right)$	$\omega^2 = \frac{g}{R} 1.84 \tanh\left(1.84 \frac{h}{R}\right)$			
Salınım kütlesi rijitliği (k _{cn})	$k_{cn} = m_{cn} \frac{g}{R} \lambda_n \tanh\left(\lambda_n \frac{h}{R}\right)$	$k_c = m_c \frac{g}{R} 1.84 \tanh \frac{1.84 \cdot h}{R}$			
Salınım kütlesi (<i>m</i> _{cm})	$m_{cn} = m_w \frac{2 \tanh\left(\lambda_n \frac{h}{R}\right)}{\lambda_n (h/R) (\lambda_n^2 - 1)}$	$m_c = m_w \cdot 0.318 \frac{R}{h} \tanh\left(1.84 h/R\right)$			
İmpuls kütlesi (<i>m_i</i>)	$m_i = m_w \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{m_{cn}}{m_w} \right)$	$m_i = m_w \frac{\tanh\left(1.74R/h\right)}{\left(1.74R/h\right)}$			
Salınım kütlesi yüksekliği (h _{cm})	$h_{cn} = h \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{\lambda_n \left(h/R \right)} \tanh \left(\lambda_n \frac{h}{2R} \right) \right]$	$h_{c} = \left[1 - \frac{\cosh(1.84 h/R) - 1}{1.84 h/R \sinh(1.84 h/R)}\right]h$			
İmpuls kütlesi yüksekliği (h _i)	$h_i = h \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{(m_i/m_w)} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{m_m}{m_w} \right) \left(\frac{h_m}{h} \right) \right]$	$h_i = \frac{3}{8}h$			

Tablo 13. Housner ve Bauer yaklaşımlarına ait bağıntılar

2.2.1.2.3. Eurocode 8'de Önerilen Çok Kütleli Sistem Yaklaşımı

Benzer çok kütleli bir model çalışmaları da Veletsos ve ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir (Veletsos, 1984; Veletsos ve Tang, 1990). Bu çalışmada da öncelikli olarak kullanılan bu yaklaşım gerek Amerika'da gerekse Avrupa'da birçok yönetmelikte kullanılmaktadır (Malhotra, 2000; EC-8 Part-4, 2003). Temel olarak yöntem Bauer'in yaklaşımına benzer şekildeki kabullerle dikkate alınarak elde edilmiş bir analitik yöntemdir. Bu yaklaşım diğer yaklaşımlardan farklı olarak yapı-sıvı sisteminde yer hareketinin dönme etkileri de hesaba katacak şekilde tasarlanmış olup, Malhotra (1997) tarafından geliştirilerek pratik kullanıma sunulmuştur. Yöntemin kullanılabilmesi için gerekli katsayılar Tablo 14'de sunulmaktadır. Bu katsayıların (h/r) ile değişimleri ise Şekil 46'da verilmektedir. Burada C_i boyutsuz ve C_c boyutu (s/m^{1/2}) olan ve sıvı seviyesinin hazne yarıçapına oranına (h/R) bağlı olarak değişen katsayıları, h'_i ve h'_c ise temel tabanında meydana gelen devirici momentin hesabı için kullanılan sırasıyla impuls ve salınım kütlesinin hazne tabanına olan sanal mesafelerini göstermektedir. Kullanılan diğer semboller Bauer ve Housner yaklaşımındakilerle aynıdır.



Şekil 46. Eurocede-8'de verilen iki kütleli modele ait katsayıların ve oranlarının sıvı yüksekliğinin hazne yarıçapına oranına (h/R) bağlı olarak değişimleri

h/R	C_i	C_c	m_i/m_w	m_c/m_w	h_i/h	h_c / h	h_i '/h	h_c '/h
0.3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0.5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1,460	1,517
0.7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1.0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1.5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2.0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2.5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3.0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

Tablo 14. Eurocede-8'de verilen iki kütleli modele ait katsayılar ve oranlar

EC-8 de verilen bu yaklaşımla impuls moduna ait periyot değeri aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenebilir.

$$T_{imp} = C_i \frac{h\sqrt{\rho}}{\sqrt{s/R}\sqrt{E}}$$
(110)

Burada s, ρ ve E sırasıyla hazne duvarı eşdeğer kalınlığını, sıvı birim kütlesini ve depo malzemesine ait elastisite modülünü göstermektedir. Benzer şekilde salınım moduna ait periyot ise,

$$T_c = C_c \sqrt{R} \tag{111}$$

bağıntısıyla belirlenebilir. Buradan tabanda oluşan taban kesme kuvveti tepki spektrumu çözümlemesine bağlı olarak hesaplanmak istenirse aşağıdaki bağıntıdan yararlanılabilir (EC-8 Part-4, 2003).

$$Q = (m_1)S_e(T_{imp}) + (m_2)S_e(T_c)$$
(112)

Burada $S_e(T_{imp})$ betonarme depolara ait impuls modu için %5 ve $S_e(T_c)$ ise salınım modu için % 0,5 sönüm değerlerine bağlı olarak elde edilen tepki spektrumu değerlerini göstermektedir. Temel plağı üst seviyesinde bulunan devirici moment (M) ve temel plağı alt seviyesinde bulunan devirici moment (M') ise ayaklı depolar için Eurocode 8'de verilen yaklaşım uyarlanarak aşağıdaki ifadeler yardımıyla elde edilebilir (bkz Şekil 45).

$$M = m_1(h_i + h_T)S_e(T_{imp}) + m_2(h_c + h_T)S_e(T_c)$$
(113)

$$M' = m_1(h'_i + h_T)S_e(T_{imp}) + m_2(h'_c + h_T)S_e(T_c)$$
(114)

Burada, tekil temel ya da halka sisteminin kullanıldığı ayaklı depolar için depo tabanında göz önüne alınması gereken devirici momentin her durumda (M) olarak dikkate alınması gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır (EC-8 Part-4, 2003).

2.2.2. Sayısal Yöntemlerle Kullanılan Yaklaşımlar

2.2.2.1. Kütle Ekleme Yaklaşımı

İlk olarak Westergaard (1931) tarafından barajların deprem davranışlarının incelenmesi için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda temel felsefe, hidrodinamik basınç dağılımına göre sıvı kütlesinin uygun yüksekliklerde depo duvarına eklenerek çözüme gidilmesidir (Şekil 47). Bu maksatla sönümlü zorlanmış bir sistemin hareket denklemi, $\ddot{u}_{g}(t)$ yer hareketi ivmesini göstermek üzere aşağıdaki şekilde elde edilebilir

$$\boldsymbol{M} \cdot \ddot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{C} \cdot \dot{\boldsymbol{u}}(t) + \boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{u}(t) = -\boldsymbol{M} \cdot \ddot{\boldsymbol{u}}_{g}(t)$$
(115)

Kütle ekleme yaklaşımında bu hareket denklemi, M_a eklenmiş kütle matrisini ve M^{*} (=M+M_a) toplam kütle matrisini göstermek üzere;

$$\boldsymbol{M}^{*} \cdot \boldsymbol{\ddot{u}} + \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{\dot{u}} + \boldsymbol{K} \cdot \boldsymbol{u} = -\boldsymbol{M}^{*} \cdot \boldsymbol{\ddot{u}}_{g}$$
(116)

şeklini almaktadır. Bu yaklaşımda M_a kütlesinin yapıyla eşzamanlı olarak hareket ettiği ve sıvıdan dolayı sadece hareket denkleminde kütlenin arttığı rijitlik ve sönümün ise değişmediği öngörülmektedir.



Şekil 47. Eklenmiş kütle yaklaşımının ayaklı bir depoya uygulanması

Eklenmiş kütle yaklaşımının kullanılabilmesi için hidrodinamik basıncın değişimlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hidrodinamik basıncın belirlenmesine yönelik birçok metodun literatürde bulunduğunu belirtmek uygun olmaktadır. Eurocode 8'de hidrodinamik basıncın tabanda veya depo duvarı yüksekliği boyunca değişimin belirlenebilmesi için aşağıdaki yaklaşım önerilmektedir. Bu yönetmelikte impuls moduna ait hidrodinamik basınç (p_i)

$$p_i(\xi,\zeta,\theta,t) = C_i(\xi,\zeta) \cdot \rho \cdot h \cdot A_g(t) \cdot \cos\theta$$
(117)

bağıntısı yardımıyla belirlenebilir. Burada h sıvı yüksekliğini, ρ ve $A_g(t)$ ise sıvıya ait birim hacim kütlesini ve depoya ait yer hareketinin zamanla değişimini göstermektedir. $C_i(\xi,\zeta)$ ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla R depo yarıçapını göstermek üzere, hesaplanmaktadır.

$$C_i(\xi,\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{I_1'(v_n/(h/R))v_n^2} \cdot \cos(v_n\zeta) I_1\left(\frac{v_n}{(h/R)}\xi\right)$$
(118)

Burada $I_1()$ ve $I'_1()$ sırasıyla birinci mertebeden değiştirilmiş Bessel fonksiyonunu ve bunun türevini göstermektedir. v_n , ξ ve ζ katsayıları ise aşağıdaki bağıntılar yardımıyla belirlenmektedir.

$$v_n = \frac{2n+1}{2}\pi$$
; $\xi = \frac{r}{R}$; $\zeta = \frac{z}{h}$ (119)

Yukarıda verilen ifadeler kullanılarak üç farklı (h/R) oranı için impuls moduna ait hidrodinamik basıncın gerek duvar yüksekliği boyunca, gerekse de tabandaki yarıçapa bağlı olarak değişimleri Şekil 48'deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 48. İmpuls moduna ait normalleştirilmiş ($p_i/(\rho Ra_g)$) hidrodinamik basıncın h/R katsayısına bağlı olarak (a) hazne duvarında yükseklik boyunca (b) tabanda yarıçapa bağlı olarak değişimi (EC-8 Part-4, 2003).

Benzer şekilde salınım modlarına ait hidrodinamik basınç (p_c) ise aşağıdaki ifade yardımıyla belirlenmektedir.

$$p_{c}(\xi,\zeta,\theta,t) = \rho \sum_{n=1}^{\infty} \psi_{n} \cosh\left(\lambda_{n} \frac{h}{R}\zeta\right) J_{1}(\lambda_{n}\xi) \cos\left(\theta\right) A_{n}(t)$$
(120)

Burada ψ_n

$$\psi_n = \frac{2R}{\left(\lambda_n^2 - 1\right) J_1(\lambda_n) \cosh\left(\lambda_n \frac{h}{R}\right)}$$
(121)

ifadesiyle belirlenir. Burada $J_1()$ birinci mertebeden birinci türde Bessel fonksiyonu, λ_n ise bu fonksiyonun köklerini ifade etmektedir (λ_1 =1,8112; λ_2 =5,3314; λ_3 =8,5363). $A_n(t)$ ise n. salınım frekansına sahip ($\omega_{cn}^2 = (g/R)\lambda_n \tanh(\lambda_n h/R)$) moda ait tepki spektrumu değerini ifade etmektedir. Yukarıda verilen ifadeler kullanılarak üç farklı (h/R) oranı için

salınım moduna ait hidrodinamik basıncın gerek duvar yüksekliği boyunca değişimi gerekse de 1. ve 2. modlara ait frekansın depo (h/R) oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 49'da verildiği gibi elde edilmektedir.



Şekil 49. (a) İlk iki salınım moduna ait normalleştirilmiş hidrodinamik basınçların derinlikle değişimi ve (b). modlara ait salınım frekansların h/R oranına bağlı olarak değişimi

2.2.2.2. Euler Yaklaşımı

Sıvı gerçek hareketinin süreklilik ve Navier-Stokes denklemleriyle ifade edildiği bilinmektedir. Sıkışabilir bir sıvı için süreklilik denklemi v_x , v_y , ve v_z sırasıyla sıvının x, y ve z eksenleri doğrultularındaki hızlarını göstermek üzere,

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = -\frac{1}{E_y} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$$
(122)

şeklindedir. Navier-Stokes denklemleri kinematik viskozitenin sıfır olması halinde ($v_k=0$)

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_x}{\partial_y} + v_z \cdot \frac{\partial v_x}{\partial_z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + X$$
(123)

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + Y$$
(124)

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + Z$$
(125)

şeklindeki Euler denklemlerine dönüşmektedir. Doğrusal olmayan Euler kısmi diferansiyel denklem takımı çok hızlı değişen sıvı genliklerinin küçük olması halinde konvektif ivmeler ihmal edildiğinde doğrusal hale dönüşmektedir. Kütle kuvvetlerinin de ihmal edilmesi halinde Euler denklemleri aşağıdaki hali almaktadır.

$$\rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \qquad \rho \cdot \frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} \qquad \rho \cdot \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z}$$
(126)

Bu bağıntılar ve süreklilik denklemi arasında v_x , v_y ve v_z 'nin yok edilmesi suretiyle basınca bağlı dalga denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$
(127)

Dalga denkleminin sağ tarafının sıfıra eşit olması halinde ise $\nabla^2 p = 0$ Laplace denklemi elde edilmektedir.

Euler yaklaşımı sonlu elemanlar yöntemiyle yapı-sıvı etkileşiminin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda Zienkiewicz ve ekibinin Euler yaklaşımıyla gerçekleştirmiş oldukları çalışmalar sonucunda dikkate aldıkları hareket denklemi verilmektedir (Zienkiewicz ve Bettes, 1978).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{O} \\ \mathbf{Y}^{\mathsf{T}} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{Y} \\ \mathbf{O} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ h_0 \end{bmatrix}$$
(128)

Bu denklemde **H** sıvı için kullanılan rijitlik matrisini, **F** özel bir sönüm matrisini, **L** sıvı elemanların enterpolasyon fonksiyonlarına bağlı olarak sıvı ortamında ve yüzeyinde integral alınmak suretiyle belirlenen bir matrisi, **Y** ve **O** yapı–sıvı ara yüzey etkileşimi ile doğan kuvvetlerle ilgili matrisleri, f_0 ve h_0 ise söz konusu ara yüzeydeki dış kuvvetleri göstermektedir. Bu hareket denkleminden görüldüğü gibi bilinmeyenler yapıda yerdeğiştirmeler, sıvıda ise basınçlar olduğundan ortaya simetrik olmayan bir denklem takımı çıkmaktadır. Oysa Lagrange yaklaşımında böyle bir durum söz konusu değildir (Doğangün, 1995).

2.2.2.3. Langrange Yaklaşımı

Lagrange yaklaşımında çoğunlukla sıvının, sıkışabilir olduğu ve doğrusal elastik davrandığı, viskozite etkilerinin ihmal edilebilir olduğu, dönmesiz olduğu kabulleri yapılmaktadır (Wilson ve Khavati 1983). Sıkışabilir ve doğrusal elastik kabulüyle sıvıda meydana gelen şekildeğiştirmelerin Hooke kanununa uyduğu kabul edilmiş olmaktadır. Üç boyutlu bir model için ϵ_v birim hacim değişimini, u_x , u_y , u_z sırasıyla x, y, z eksenleri doğrultularındaki sıvı yerdeğiştirmelerini, ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z ise aynı doğrultudaki birim boy değişimini göstermek üzere hacimsel şekildeğiştirme

$$\varepsilon_{v} = \varepsilon_{x} + \varepsilon_{y} + \varepsilon_{z} = \frac{\partial u_{x}}{\partial x} + \frac{\partial u_{y}}{\partial y} + \frac{\partial u_{z}}{\partial z}$$
(129)

şeklinde ifade edilmektedir. Bu durumda basınçla şekildeğiştirme arasındaki kabule göre basınç şekildeğiştirme bağıntısı

$$p = E_v \cdot \varepsilon_v \tag{130}$$

şeklinde yazılmaktadır.

Sıvı tutucu yapılarda genellikle viskozite etkisi önemli olmadığından ihmal edilmektedir. Gerçekten 1 m çapında silindirik bir depo için yapılan sarsma tablası deneyinde sudan 2000 kez daha viskoz bir sıvı (kalorifer yakıtı) kullanılarak iki sıvının davranışları arasındaki farkın önemli olmadığı ve yüksek viskoziteli sıvının salınım

genliklerinin diğerininkinden çok az miktarda küçük kaldığı gözlenmiştir (Priestley vd., 1986). Diğer taraftan depo boyutları arttıkça viskozite etkileri de azalmaktadır. Sıvının dönmesiz olduğu üçüncü kabul ise akışkanlar mekaniği ile ilgili kaynaklarda ayrıntılı olarak irdelenmekte ve sıvı elemanlarının yapmış oldukları dönme hareketinin açısal hızı ise çevrinti olarak tanımlanmaktadır (Doğangün, 1995).

Üç boyutlu durumda, dönme kısıtlamalarının sağlanabilmesi için gerekli olan x, y ve z eksenleri etrafındaki dönmeler sırasıyla,

$$\varepsilon_{xr} = \frac{1}{2} \left[\frac{du_z}{dy} - \frac{du_y}{dz} \right]$$
(131)

$$\varepsilon_{yr} = \frac{1}{2} \left[\frac{du_x}{dz} - \frac{du_z}{dx} \right]$$
(132)

$$\varepsilon_{zr} = \frac{1}{2} \left[\frac{du_y}{dx} - \frac{du_x}{dy} \right]$$
(133)

şeklinde ifade edilmektedir. Bu dönmeler eleman şekildeğiştirmesi olarak düşünülürse p_{xr} , p_{yr} ve p_{zr} dönme basınçları; ψ_x , ψ_y ve ψ_z sırasıyla x, y ve z eksenleri doğrultuları için kısıtlama parametresi katsayılarını ve

$$E_{22} = \psi_x E_v \quad ; \quad E_{33} = \psi_y E_v \quad ; \quad E_{44} = \psi_z E_v \tag{134}$$

kısıtlama parametrelerini göstermek üzere;

$$p_{xr} = E_{22}\varepsilon_{xr} \quad ; \quad p_{zr} = E_{33}\varepsilon_{yr} \quad ; \quad p_{zr} = E_{44}\varepsilon_{zr} \tag{135}$$

bağıntıları yardımıyla elde edilmektedir. Buna göre sıvı sistemin şekildeğiştirme enerjisine (Π_{ε}) ait temel bağıntı; elastisite (gerilme-şekildeğiştirme) matrisi (*E*) ve şekildeğiştirme vektörüne (ε) bağlı olarak

$$\Pi_{\varepsilon} = \frac{1}{2} \int \varepsilon^T E \varepsilon dv \tag{136}$$

şeklinde sıvı serbest yüzeyinden doğan salınımlar sebebiyle doğan potansiyel enerji (Π_s) ise, u_s serbest yüzeydeki düşey sıvı yerdeğiştirmesini göstermek üzere,

$$\Pi_{s} = \frac{1}{2} \int u_{s} \rho g \left(h + u_{s} \right) dv \tag{137}$$

şeklinde ya da açık formda

$$\Pi_{s} = \frac{1}{2} \int u_{s} \rho g h dv + \frac{1}{2} \int u_{s} \rho g u_{s} dv$$
(138)

şeklinde ifade edilmektedir. Bu durumda sıvının toplam potansiyel enerjisi ise (U);

$$U = \Pi_{\varepsilon} + \Pi_{s} \quad \rightarrow U = \frac{1}{2} \int \varepsilon^{T} E \varepsilon dv + \frac{1}{2} \int u_{s} \rho g \left(h + u_{s} \right) dv \tag{139}$$

bağıntısıyla kinetik enerjisi ise, v kartezyen koordinat sistemindeki hız vektörünü göstermek üzere aşağıdaki bağıntıyla belirlenebilir.

$$T = \frac{1}{2} \int \rho \quad \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{v} \quad \mathrm{dv} \tag{140}$$

Yukarıdaki ifadeler yardımıyla Lagrange denklemi; u_i genelleştirilmiş *i* nolu yerdeğiştirme bileşenini, F_i bu bileşene karşılık gelen dış yükü ve *t* de zamanı göstermek üzere aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial u_i} + \frac{\partial U}{\partial u_i} = F_i$$
(141)

Davranışları doğrusal ya da doğrusal olmayan sistemler için bu bağıntı kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında da sıvı için Langrange Yaklaşımı kullanılmaktadır.

Sayısal modeller için salınımının dikkate alınmasında kullanılabilecek bir diğer yaklaşım ise sıvı yüzeyinde kullanılacak rijitliklerdir. Düşeyde meydana gelen salınım hareketi sıvının alt yüzeyi için tanımlanan negatif değere sahip rijitliklerle sıvı üst yüzeyinde ise pozitif rijitliklerle dengelenmektedir. Bu yaklaşımda sıvı yüzeyinde kullanılan her bir sonlu elemana ait noktada ayrı ayrı tanımlanan rijitlik değerleri (K_s): A_f yüzeydeki sonlu elemanın alanını, g_i i yönündeki ivmeyi, C_i yüzey normalinin i doğrultusundaki bileşenini göstermek üzere aşağıdaki şekilde belirlenebilir (Ansys, 1994).

$$K_s = \rho A_f \left(g_x C_x + g_y C_y + g_z C_z \right)$$
(142)

2.3. Depolar İçin Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşiminin Değerlendirilmesi

Sıvı-yapı etkileşimi bütün depoların dinamik davranışları üzerinde etkili olmaktadır. Ancak yapı-zemin etkileşimi özellikle ayaklı depoların dinamik davranışları üzerinde daha etkili olabilmektedir. Çünkü hazne doğrudan zemine oturmadığından hazne ile zemin arasında belirli rijitliğe sahip taşıyıcı bir sistem bulunmaktadır. Yükler bu sistemin temelleri vasıtasıyla nispeten küçük sayılabilecek bir alanda zemine aktarılmaktadır. Temel sisteminin gömülme oranı da söz konusu etkileşim üzerinde etkili olmaktadır. Dolayısıyla bu tez kapsamında dikkate alınan modellerde yüzeysel ve belirli bir derinliğe sahip radye temel sistemleri dikkate alınarak temel gömülme oranlarının ayaklı depoların dinamik davranışları üzerindeki etkileri de araştırılmaktadır. Literatür incelendiğinde daha önce de belirtildiği gibi, genel olarak depolar için sadece sıvı-yapı ya da sadece yapı-zemin etkileşiminin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır. Ancak ayaklı depolar için sıvı-yapızemin etkileşiminin birlikte dikkate alınarak bu tür yapıların depreme göre tasarımına esas teşkil edecek dinamik davranışın incelendiği çalışmalara rastlanmamıştır. Bu sebeple, gerek yapı-sıvı etkileşimi başlığında gerekse de yapı-zemin etkileşimi başlığı altında mekanik ve sayısal yöntemlerin birlikte kullanıldığı yâda sadece sayısal yöntemlerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin etkileşimi için yeni modeller oluşturulmaktadır. Sıvı-yapızemin etkileşimi için kullanılacak modellere esas teşkil edecek olan yaklaşımlar Şekil 50'deki şemada özetlenmektedir.



Şekil 50. Sıvı-ayaklı depo-zemin sisteminde yapısal kısım, temel/zemin kısmı ve sıvı için kullanılabilecek model yaklaşımlarından bazıları

Bu şekilden görüldüğü gibi sıvı, yapı ve zemin için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bunların tamamını dikkate alacak şekilde çok sayıda model üretmek mümkündür. Bunlara göre çalışma kapsamında dikkate alınan modeller takip eden başlık altında açıklanmaktadır.

2.4. Oluşturulan Modeller ve Bunların Örnek Depolara Uygulanması

Farklı fiziksel özelliklere sahip ortamlara ve bunların temasını sağlayan ara yüzeylere sahip bir sistemin modellenerek çözümlenmesi, oldukça karmaşık ifadelerin ve hesap yöntemlerinin kullanmasını gerekli kılmaktadır. Çalışma kapsamındaki ayaklı depoların modellenmesinde ve çözümlenmesinde de sıvı, yapı ve zemin gibi birbirinden çok farklı fiziksel ortamlar ve bunların ara yüzeyleri söz konusu olmaktadır. Dolayısıyla bu tür yapıların modellenmesinde ve çözümlenmesinde, etkileşimin söz konusu olmadığı yapılara göre, daha öncede ifade edildiği gibi, bir takım güçlüklerle karşılaşılmaktadır.

Modellerin uygulanması için Türkiye'de İller Bankası tarafından tip proje olarak uygulanmış 895 m³ hazne hacmine sahip ayaklı depo dikkate alınmaktadır (Şekil 51).



Şekil 52. Uygulamaya konu olan çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 895 m³ lük ayaklı depo

Bu başlık altında çalışma kapsamında dikkate alınan ayaklı depolar için sıvı ve zemin ortamlarına ilişkin olarak literatürde önerilen yaklaşımlardan da yararlanılarak toplam sekiz model oluşturulmaktadır. Her bir modelde dikkate alınabilecek sıvı, yapısal kısım temel-zemin sistemleri için kullanılan model ve yaklaşımlar tanıtılmakta ve bu modelin örnek depoya uygulanması sunulmaktadır. Burada modellerin tanıtımını yaparken temellerin zeminle birlikte "temel/zemin sistemi" olarak değerlendirilmesi nedeniyle yapısal kısım olarak boş haznenin ve bunun mesnetlendiği ayak taşıyıcı sisteminin dikkate alındığını belirtmek uygun olmaktadır.

Gerek zaman oramında gerekse de frekans ortamında gerçekleştirilen bütün çözümlemelerde deprem kaydı olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin Yarımca'da kaydedilen Kuzey-Güney bileşeni kullanılmaktadır (Şekil 52).



Şekil 53. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Yarımca ivme kaydı Kuzey-Güney bileşeni

Çalışma kapsamında altı farklı zemin sınıfı dikkate alınmaktadır. Temelin zemine göre konumu için gömülmenin olmadığı ($e/r_0 = 0$) ve gömülmenin dikkate alındığı ($e/r_0=1$) iki farklı çözümleme gerçekleştirilmektedir. Zemin sınıfların seçiminde Türk Deprem Yönetmeliğinde ve diğer ülkelerin ilgili yönetmeliklerinde tanımlanan zemin sınıfları ve bunlar için önerilen değerlerden yararlanılmıştır. Sözkonusu zeminler için kullanılan mekanik özelliklerin belirlenmesinde ise çeşitli kaynaklarda ifade edilen deneysel çalışma sonuçlarından faydalanılmıştır (Bardet, 1997; Barnes, 2000; Coduto, 2000). Dikkate alınan zemin sınıfları ve bunlara ilişkin özellikler Tablo 15'de verilmektedir. Bu tabloda ξ_0 , ξ_0^{mod1} ve ξ_0^{mod2} sistemin dikkate alınan moda göre eşdeğer sönümlerini γ , v, v_s ve v_p zemine ait birim ağırlığı, Poisson oranını, kayma dalgası hızını ve boyuna dalga hızına, K_U ve K_θ statik rijitliklere bağlı olarak belirlenmiş temel zemin sistemine ait değiştirilmiş yatay ötelenme ve dönme rijitliklerini, e ve r ise yapı temeline ait gömülme yüksekliğini ve yarı çapı göstermektedir.

	(e/r_0)	ξo	ξ_0^{mod1}	${\xi_0}^{\mathrm{mod2}}$	γ (kN/m ³)	υ	E (kN/m ²)	G (kN/m ²)	$\frac{E_c}{(\text{kN/m}^3)}$	<i>v</i> _s (m/s)	<i>v_p</i> (m/s)	K _U (kN/m)	K_{θ} (kNm)
S1	S1 0 0	0	0	0	20	0.20	700000	2602210	0402077	1140.1	2140.9	4,788E+7	3,139E+9
51 1	0	0	0	20	0,30	/000000	2092310	9423077	1149,1	2149,8	9,576E+7	1,21E+10	
52	0	0	0	0	20	0,30	2000000	769230	2692308	614,25	1149,1	1,367E+7	8,522E+8
52	1	0	0	0	20							2,730E+7	3,300E+9
62	0	1	0	0	19	0,35	500000	192310	673077	309,22	643,6	3,390E+6	1,950E+8
55	1	0	0	0								6,790E+6	7,560E+8
S.4	0	4	0	2,5	19	0,35	150000	57690	201923	169,36	352,5	1,014E+6	5,110E+7
54	1	2	0	0								2,027E+6	1,986E+8
Q.5	0	5	0	5	10	0.40	0,40 75000	26790	160714	120,82	295,9	4,990E+5	2,340E+7
55	1	2,5	0	2	18	0,40						9,980E+5	9,070E+7
S6 0 1	0	6	0	7	18	0,40	35000	12500	75000	82,54	202,1	2,390E+5	1,032E+7
	1	3,5	0	3								4,780E+5	4,004E+7

Tablo 15. Uygulamaya konu olan zemin sistemlerine ait mekanik özellikler

2.4.1. Model-1: Sıvı İçin Tek Kütlenin, Zemin İçin İki Farklı Rijitliğin, Yapı İçin İse Mekanik Modelin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

Ayaklı depo-zemin sistemi ve bunun için dikkate alınan *Model–1* Şekil 53'de görülmektedir. Bu model tek kütleli modellerden biridir. Söz konusu kütle; sıvı kütlesi, haznenin boş kütlesi ve ayak kütlesinin bir kısmından oluşmaktadır (dikkate alınacak ayak kütlesi için ACI 371R-98'de kütlenin 2/3'ünün; Yeni Zelanda yönetmeliğinde ise tamamının dikkat alınması öngörülmektedir). Bu çalışmada ACI tarafından öngörülen tek kütle dikkate alınmaktadır.



Şekil 54. *Model 1*: Sıvı için tek kütlenin, zemin için iki farklı rijitliğin, yapı için ise mekanik modelin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Sıvı: Burada ACI 371R-98 tarafından önerilen tek kütleli yaklaşım seçildiğinden bu yaklaşıma göre sıvının sadece toplam kütlesi işlemlere girmektedir. Bunun dışında sıvı için herhangi bir modelleme yapılmamaktadır.

> Yapısal kısım: Haznenin boş kütlesinin tamamı ve bunun mesnetlendiği taşıyıcı sistemin kütlesinin 2/3'ü modeldeki tek kütleye eklenmektedir. Söz konusu taşıyıcı sistemin eğilme rijitliği (k_1) çerçeve sistem için (106) bağıntısıyla, silindirik kabuk taşıyıcı sistem olması durumunda ise (107) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir.

Temel/zemin sistemi: Zeminin etkisini dikkate almak için ötelenme ve dönme rijitlikleri dikkate alınmaktadır. Bu rijitlikler taşıyıcı sistemin mesnetlendiği temel sisteminin merkezinde tanımlanan bir noktaya uygulanmaktadır. Bu modelde temel/zemin sistemi için yüzeysel ve gömülü temel durumları da ayrı ayrı incelenebilmektedir.

Modelin Uygulanması

Bu model için çözüm zaman ve frekans ortamlarında gerçekleştirilebilir. Çözüm yöntemi olarak, değiştirme yöntemleri ya da alt sistem yaklaşımlarından faydalanılabilmektedir. Bu yaklaşımlarla oluşturulan hareket denklemleri için tepki spektrumu ya da doğrudan çözüm tekniklerinden herhangi biri kullanılabilir. Burada dikkate alınan ayaklı depo zemin sistemi için hareket denklemi zaman ortamında doğrudan çözümlenmektedir. Bu model için hazırlanan bilgisayar programı EK-1 de sunulmaktadır.

Model-1 yardımıyla gömülmenin olduğu ve olmadığı ($e/r_0=0$ ve 1) durumların her biri için altı farklı zemin sistemi dikkate alınarak toplam oniki çözümleme gerçekleştirilmektedir. Bu çözümlemelerden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti ve tabanda bir kolonda meydana gelen eğilme momenti değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları gömülmenin olmadığı durum ($e/r_0=0$) için Tablo 16'da, gömülmenin söz konusu olması durumunda ($e/r_0=1$) ise Tablo 17'de sunulmaktadır.

	En büy yerdeği	rük yatay ştirme, U	En büyük t kuvv	aban kesme eti, V	En büyük eleman eğilme momenti, M_o		
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	Değer (kNm)	
S1	10,37	0,31	8,97	11497,00	8,97	-3880,25	
S2	10,40	0,32	8,97	11444,00	8,97	-3862,25	
S3	10,50	0,32	10,54	10140,00	10,54	-3422,38	
S4	8,62	0,25	10,54	7256,70	8,68	2449,13	
S5	5,67	0,23	6,55	6474,80	6,55	-2185,25	
S6	5,80	0,27	4,89	5986,80	4,89	-2020,50	

Tablo 16.*Model-1* için gömülmenin olmadığı ($e/r_o=0$) durumda elde edilen en büyük
yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

	En büy	ük yatay	En büyük t	aban kesme	En büyük eleman eğilme		
	yerdeği	știrme, U	kuvv	eti, V	momenti, M_o		
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	
S1	10,37	0,31	8,97	11498,00	8,97	-3880,38	
S2	10,37	0,31	8,97	11497,00	8,97	-3880,25	
S3	10,41	0,30	8,97	10918,00	8,97	-3685,00	
S4	10,55	0,29	8,97	9588,30	8,97	-3236,00	
S5	8,59	0,22	8,50	6954,60	8,50	2347,13	
S6	8,70	0,25	6,55	7167,90	6,55	2419,13	

Tablo 17. *Model 1* için gömülmenin olduğu ($e/r_o=1$) durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

Bu tablolarda verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B) ve eğilme momentinin (C) en büyük değerlerinin yanında bunların zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-1 dikkate alınarak gömülme olmadığı ve gömülme oranının bire eşit olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 54-59' da verilmektedir.



Şekil 55. *Model-1*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 56. *Model-1*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 57. *Model-1*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 58. *Model-1*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 59. *Model-1*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 60. *Model-1*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Burada *Model-1* için verilen yatay yerdeğiştirme grafiklerinden görüldüğü gibi yerdeğiştirmeler S1~S4 için ($e/r_0 = 0$) ve ($e/r_0 = 1$) gömülme durumlarında en büyük değerine 9~10 s civarında 0,25~0,32 m olarak ulaşmaktadır. Benzer durum S5 ve S6 için incelendiğinde ise en büyük yatay yerdeğiştirmenin gömülü olmayan sistem için 5~6 s civarında 0,22~0,27 m seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir. Oysa S5 ve S6 için gömülmenin dikkate alındığı durumda hesaplanan tepkiler S1~S4 için elde edilenlere benzemektedir. Diğer taraftan S5 ve S6 için gömülmenin dikkate alındığı durumda ($e/r_0 =$ 1) hesaplanan yerdeğiştirme değerlerinde, alınmadığı duruma göre ($e/r_0 = 0$) %14'lere varan azalmalar görülmüştür. Ayrıca bu zemin sistemleri için ($e/r_0 = 0$) ve ($e/r_0 = 1$) durumlarında yerdeğiştirmelerin zamanla değişim izleri de birbirinden uzaklaşmaktadır. Dolayısıyla zemin sistemi rijitliğinin azalması, gömülme etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yüksek rijitliğe sahip zemin sistemlerinde ise gömülmenin etkisi hemen hemen ortadan kalkmaktadır.

Farklı zemin sistemlerine göre yatay yerdeğiştirme açısından bir karşılaştırma yapıldığında S6 için elde edilen değer S1 için hesaplanana göre gömülmenin olduğu durumda %28, olmadığı durumda ise %22 daha küçük kalmıştır. Diğer taraftan S6 zemin sistemi için yerdeğiştirmenin zamanla değişim grafiğinde 20 s civarında da büyük genlikler meydana gelmiştir. Buradan da rijitlikleri birbirinde oldukça uzak olan zeminler için yerdeğiştirmelerin zamanla değişim izlerinin birbirinden farklı olabileceği belirtilebilir.

B-Kesme Kuvveti

Model-1 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 60~65'de verilmektedir.



Şekil 61. Model-1'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 62. Model-1'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 63. *Model-1*'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 64. Model-1'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 65. Model-1'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 66. Model-1'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi toplam kesme kuvveti S1~S4 zemin sistemleri için $(e/r_0 = 0)$ ve $(e/r_0 = 1)$ durumlarında en büyük değerlerine 9~10 s civarında 7256~11498 kN olarak ulaşmaktadır (Şekil 60~63). Benzer durumun S5 ve S6 için gömülü olmayan durumda 5~6 s de 5986~6474 kN seviyelerinde oluştuğu görülmektedir (Şekil 64, 65). Bu zemin sistemlerine ilişkin kesme kuvveti değerleri gömülme durumunda S1~S4 zemin sistemlerine benzer davranış göstermektedirler.

Şekil 60~63' de verilen grafikler incelendiğinde ilk üç zemin sınıfı için ($e/r_0 = 0$) ve ($e/r_0 = 1$) durumlarının her ikisi için de hesaplanan en büyük kesme kuvveti değerleri ve bunların oluşma zamanlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Ancak son üç zemin sistemi (S4~S6) için ise tepkilerin en büyük değerleri ve bunların oluşma zamanları birbirinden farklı olmaktadır. Rijit zeminden yumuşak zemine doğru gidildikçe ($e/r_0= 0$) durumunda kesme kuvvetlerinde genelde bir azalma gerçekleşmiş, ancak S5 ve S6 için bu azalma gerçekleşmemiştir. Gömülme durumunda ($e/r_0 = 1$) bütün zemin sınıfları için taban kesme kuvvetlerinde gömülmenin olmadığı duruma göre bir artış gözlenmiş ve bu artışın oranı yumuşak zeminlerde %29'lara ulaşmıştır. Diğer bir ifadeyle zemin sistemin rijitliğinin artması temel sisteminin gömülmesinin tabanda oluşan kesme kuvveti üzerindeki etkisini ortadan kaldırırken, bunun tam tersine zemin sistemindeki rijitlik azalmaları ise gömülmenin etkinliğini arttırmaktadır.

Kesme kuvveti için verilen grafiklerden görüldüğü gibi S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durum irdelenecek olursa her iki zemin sisteminde de birbirlerinden oldukça farklı tepkiler oluşmaktadır. Bu sebeple S1 zemin sistemi için elde edilen taban kesme kuvveti tepkisi ile S6 zemin sistemi arasında %48'e varan bir azalmanın olduğu, gömülme olmadığı durumda ise bu azalmanın %37'lerde kaldığı görülmektedir. Bu

noktadan hareketle iki zemin sistemi arasında ötelenme ve dönme rijitliklerindeki değişimlere ek olarak sistemin bütününün periyodundaki uzamanın da sistem davranışını değiştirdiği ve bu sayede deprem tepkilerinin değiştiği söylenebilir.

C-Eğilme Momenti

Model-1 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı farklı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan bir elemanda oluşan eğilme momentlerinin zamanla değişimleri Şekil 66~71 de verilmektedir.



Şekil 67. Model-1'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 68. Model-1'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 69. *Model-1*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 70. *Model-1*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 71. Model-1'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 72. *Model-1*'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Depo tabanındaki bir elemanda oluşan eğilme momenti bakımından yukarıda verilen grafikler incelendiğinde S1~S4 zemin sistemleri için en büyük eğilme momentlerinin 9~10 s civarında 3236~3880 kNm olarak gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 66~69). Benzer durum S5 ve S6'lar için incelendiğinde ise en büyük eğilme momentlerine ait tepkilerin gömülü olmayan temel sistemleri için 5~6 s de 2020~2419 kNm seviyelerine kadar düştüğü görülmektedir (Şekil 70, 71). S5 ve S6 sistemleri için gömülmenin olduğu durumda ise davranış S1~S4 zemin sistemlerine benzer şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 70, 71).

Kesme kuvvetindeki değişimlere benzer olarak eğilme momentleri için de son üç zemin sınıfında gömülme olmadığı ($e/r_0=0$) ve olduğu ($e/r_0=1$) durumları için hesaplanan en büyük eğilme momentinin değerleri ve oluşma zamanları birbirinden farklı olarak gerçekleşmektedir.

2.4.2. Model 2: Sıvı İçin Tek Kütlelinin Zemin İçin Frekans Bağımlı Rijitlik ve Sönümlerin Yapı İçin ise Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

Model 2 olarak adlandırılan sıvı-yapı-zemin sistemine ilişkin model Şekil 72'de görülmektedir. Bu model de tek kütleli olarak adlandırılan modellerden biri olup *Model-1* den farkı zemin için rijitliklere ilave olarak sönümlerin ve bunların frekans bağımlılıklarının da dikkate alınmasıdır.



Şekil 73. Model 2: Sıvı için tek kütlelinin, zemin için frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerin, yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Sıvı: Burada ACI 371R-98 tarafından önerilen tek kütleli yaklaşım seçildiğinden bu yaklaşıma göre sıvının sadece toplam kütlesi işlemlere girmektedir.

> Yapısal kısım: Haznenin boş kütlesinin tamamı ve bunun mesnetlendiği taşıyıcı sistemin kütlesinin 2/3'ü modeldeki tek kütleye eklenmektedir. Söz konusu taşıyıcı sistemin eğilme rijitliği (k_1) çerçeve sistem için (106) bağıntısı, silindirik kabuk taşıyıcı sistem olması durumunda ise (107) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir.

➢ Temel/zemin sistemi: Zeminin etkisini dikkate almak için frekans bağımlı ötelenme ve dönme rijitliklerine ilave olarak sönüm mekanizmaları da dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşım zemin sistemine ait gerek malzeme gerekse de yayılmaya bağlı sönüm değerlerinin göz önüne alınabilmesine imkan vermektedir. Bu modelde temel/zemin sistemi için yüzeysel ve gömülü temel durumları da ayrı ayrı incelenebilmektedir. Burada zemin sistemlerinin Poisson oranlarının 1/3 den küçük olması durumunda Şekil 72'de görünen ek kütlelerin dikkate alınmadığını belirtmek uygun olmaktadır.

Modelin Uygulanması

Bu model için çözüm frekans ortamında gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada da *Model-*2 ye ait çözüm frekans ortamında hareket denkleminin doğrudan çözümlenmesi ile elde
edilmektedir. Çözüm yöntemi olarak, alt sistem yaklaşımları kullanılabilir. Burada alt sistem yaklaşımlarından *Koni* modeli seçilmiştir. Zemine ait dinamik rijitliklerin frekans bağımlı olması nedeniyle bu modelin hareket denkleminin zaman ortamında çözümü oldukça zorlaşmaktadır. Zaman ortamında çözüm gerçekleştirilmek istenirse (13) bağıntısından faydalanılabilir. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus da, gerek yer hareketine ait zaman ortamındaki verinin frekans ortamına çevrilmesinde, gerekse de çözüm sonucu frekans ortamında elde edilen bulguların zaman ortamında ifadesi için Fourier gibi dönüşüm tekniklerinden birinin kullanılması gerekliliğidir. Bu model için hazırlanan bilgisayar programı EK-2 de sunulmaktadır.

Model-2 için gerçekleştirilen toplam 12 adet çözümlemeden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, tabanda bulunan elemanlardaki toplam kesme kuvveti ve tabanda bir elemanda oluşan eğilme momentine ait en büyük değerler ve bunların geçekleşme zamanları gömülmenin olduğu durum için Tablo 18'de, olmadığı durum için ise Tablo 19'da verilmektedir.

	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük kuvv	taban kesme veti, V	En büyük eleman eğilme momenti, M_o		
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	
S 1	10,41	0,1534	8,97	7894,80	8,97	2664,50	
S2	10,42	0,1534	8,97	7833,80	8,97	2643,88	
S3	10,50	0,1460	8,97	7105,40	8,97	2398,13	
S4	8,75	-0,1126	4,89	5652,90	4,89	1907,87	
S5	8,60	-0,1299	4,89	5853,00	4,89	1975,38	
S 6	8,62	-0,1251	4,89	5797,50	4,89	1956,63	

Tablo 18. *Model 2* için gömülmenin olmadığı $(e/r_0=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

Tablo 19. *Model 2* için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

	En büy	rük yatay	En büyük t	aban kesme	En büyük eleman eğilme		
zemin	yerdeği	ştirme, U	kuvv	eti, V	momenti, M_o		
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	
S 1	10,41	0,1530	8,97	7911,50	8,97	2670,13	
S2	10,41	0,1534	8,97	7895,90	8,97	2664,88	
S3	10,43	0,1530	8,97	7747,90	8,97	2614,88	
S4	10,48	0,1469	8,97	7197,50	8,97	2429,13	
S5	9,86	-0,1248	8,97	6209,10	8,97	2095,63	
S6	8,56	-0,1257	4,89	5860,10	4,89	1977,75	

Tablo 18 ve 19 da verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B) ve eğilme momentinin (C) en büyük değerlerinin yanında bunların zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-2 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve olmadığı durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 73~78' de verilmektedir.



Şekil 74.*Model-2*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 75.*Model-2*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri .



Şekil 76. *Model-2*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 77. *Model-2*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 78. *Model-2*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 79. *Model-2*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Yatay yerdeğiştirmeler için verilen şekiller (Şekil 67~72) gömülme durumları için irdelendiğinde bütün zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmeler yaklaşık 9~10 s de 0,11~0,15 m olarak gerçekleşmektedir. Gömülme durumuna göre irdelendiğinde ise S4 ve S5 dışındaki zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmenin değeri ve oluş zamanı üzerinde hemen hemen etkisinin olmadığı söylenebilir. Bu gömülme etkisiyle yatay yerdeğiştirmelerde azalmalardan en büyüğü S4 için %21'olarak gerçekleşmektedir.

Farklı zemin türleri için yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında, S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durum irdelendiğinde her iki durumun birbirinden farklı tepkiler verdiği görülmektedir. Bu durumda S1 zemin sistemi için elde edilen çatı yerdeğiştirmesinde S6 zemin sistemine göre %18'e varan bir azalma gerçekleşmektedir.

B-Kesme Kuvveti

Model-2 dikkate alınarak gömülmenin söz konusu olmadığı ve gömülmenin olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 79~84 verilmektedir.



Şekil 80. Model-2'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 81. *Model-2*'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 82. Model-2'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 83. Model-2'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 84. Model-2'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 85. Model-2'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvveti için çizilen grafikler incelendiğinde S1~S3 zemin sistemleri için en büyük taban kesme kuvvetlerinin yaklaşık 9 s de 6209~7911 kN olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durum S4~S6'lar için

incelendiğinde en büyük taban kesme kuvvetine ait tepkilerin ise gömülü olmayan temel sistemleri için 5 s de 5652~5853 kN seviyelerine kadar düşebildiği görülmektedir. S4 ve S5 sistemleri için gömülmenin olduğu durumda ise davranış zemin türlerine benzer olarak aynı zaman diliminde en büyük tepkileri verecek şekilde gerçekleşmektedir.

İncelenilen model gömülme durumu bakımından irdelendiğinde S1~S3 sistemleri için gömülmenin kayda değer etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin türleri için bu durum incelendiğinde ise gömülmenin taban kesme kuvvetlerinde %21 lere varan artımlara neden olabilemektedir. Diğer bir ifadeyle zemin sistemi rijitliğinin artması, temel sistemi gömülmesinin tabanda oluşan kesme kuvveti üzerindeki etkisini ortadan kaldırırken, bunun tam tersine zemin sistemindeki rijitlik azalmaları ise gömülmenin etkinliğini bu model için de artırmaktadır.

Farklı zemin sistemleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığında, S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durumda her iki zemin sisteminin de birbirinden oldukça farklı tepkiler verdikleri görülmektedir. Bu sebeple S6 zemin sistemi için elde edilen taban kesme kuvveti tepkisinde S1 zemin sisteminde elde edilene göre %26'ya varan bir azalma gerçekleşmiştir. Burada zemin sistemleri arasında ötelenme ve dönme rijitliklerindeki değişimlere ek olarak sistemin periyodundaki uzamanın da sistem davranışını değiştirdiğinden söz edilebilir.

C-Eğilme Momenti

Model-2 dikkate alınarak gömülme olmadığı ($e/r_0=0$) ve olduğu ($e/r_0=1$) durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan bir elemanda oluşan eğilme momentlerinin zamanla değişimleri Şekil 85~90'da verilmektedir.



Şekil 86. Model-2'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 87. Model-2'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 88. Model-2'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.



Şekil 89. Model-2'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 90. Model-2'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 91. Model-2'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Tabandaki bir elemanda oluşan eğilme momenti bakımından yukarıdaki şekiller incelendiğinde S1~S3 zemin sistemleri için en büyük eğilme momentlerinin yaklaşık 9 s civarında 1907~2670 kNm olarak gerçekleştikleri görülmektedir. Benzer durum S4~S6'lar için en büyük eğilme momentlerine tepkiler ise gömülü olmayan temel sistemleri için 5 s de 1956~2429 kNm seviyelerinde kadar düşebilmektedir. S4 ve S5 sistemleri için gömülmenin olduğu durumda ise davranışın diğer zemin türlerine benzer şekilde aynı zaman diliminde en büyük tepkileri verdikleri görülmektedir.

2.4.3. Model-3: Sıvı İçin İki Kütlenin, Zemin İçin İki Farklı Rijitliğin, Yapı İçin İse Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

İki kütleli sistem olarak adlandırılan ve burada *Model 3* olarak oluşturulan sıvı-depozemin sistemine ilişkin model Şekil 91'de görülmektedir.



Şekil 92. *Model 3:* Sıvı için iki kütlenin, zemin için iki farklı rijitliğin, yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Bu modelde:

Sıvı: Burada sıvı için sunulan matematik modelde, çok kütleli sistem yaklaşımıyla belirlenen (m_i) impuls kütlesi doğrudan ayak için belirlenen (k_1) rijitliği ile, (m_c) salınım kütlesi ise (k_2) ile gösterilen salınım rijitliği ile sisteme bağlanmaktadır. Burada m_1 ile gösterilen kütle sıvı için belirlenen impuls kütlesini içermektedir. Sıvı için literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından çok kütleli farklı modeller önerilmektedir. Sıvı-yapı etkileşimi için bu tez kapsamında verilen çok kütleli sistem yaklaşımları incelendiğinde kullanılabilecek üç yaklaşımdan bahsedilebilir. Sonuçların belirli bir akıcılıkta sunulabilmesi için bu yaklaşımlardan elde edilenler kendi aralarında karşılaştırarak uygulamalarda bu bunlardan hangisinin kullanılacağına karar verilmiştir. Bauer tarafından önerilen ve EC-8 de sunulan yaklaşımların kütle ve rijitlik ifadelerinde benzer sonuçlar üretmesi nedeniyle karşılaştırmalarda bunlardan sadece EC-8 kullanılmaktadır. Bu bağlamda yüzeysel temel sistemlerine sahip ayaklı depo için oluşturulan *Model 3*'le Housner ve EC-8 yaklaşımlarıyla gerçekleştirilen çözümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak Tablo 20'de sunulmaktadır.

	Housner modeli				Eurocode-8 modeli				% değişim			
Zemin sınıfı	А	В	D	Е	А	В	D	Е	А	В	D	Е
$T_{c}(\mathbf{s})$	3,690	3,690	3,690	3,690	3,674	3,674	3,674	3,674	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43
$T_i(\mathbf{s})$	1,166	1,166	1,166	1,166	1,172	1,172	1,172	1,172	0,51	0,51	0,51	0,51
V(kN)	2439	3670	6594	4273	2471	3688	6625	4291	1,33	0,49	0,48	0,47
M_o (kNm)	64730	97425	175080	113424	66003	98213	176406	114269	1,97	0,81	0,76	0,75

Tablo 20.Housner ve EC-8 çok kütleli sistem yaklaşımlarının kullanıldığı modellerden
dört farklı zemin sınıfı için elde edilen değerler ve bunların karşılaştırılması

Yukarıdaki tabloda, T_c ve T_i salınım ve impuls modlarına ait periyotları, V ve M_0 ise ayaklı depo taban kesme ve devirici momentleri göstermektedir. Görüldüğü gibi her iki yaklaşımın kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar arasındaki değişim en az %0,43 en çok ise %2 mertebesindedir. Bu nedenle bu yaklaşımların birine göre belirgin bir farklılığa sahip olduklarından bahsedebilmiz de mümkün olmamaktadır. Burada *Model 3* için EC-8 yaklaşımının kullanılması gerek yönetmeliğin güncel olması, gerekse de bu yaklaşımın ileride ifade edilecek modellerde kullanılan hidrodinamik basınçların belirlenmesinde temel teşkil etmesi nedeniyle uygun görülmüştür.

> Yapısal kısım: Haznenin boş kütlesinin tamamı ve bunun mesnetlendiği taşıyıcı sistemin kütlesinin uygun bir bölümünü (ACI 371R-98 ye göre 2/3'ü; Yeni Zelanda yönetmeliğine göre tamamı) modeldeki m_1 kütlesine eklenmektedir. Uygulamada ACI 318 tarafından önerilen oran dikkate alınmaktadır. Söz konusu taşıyıcı sistemin eğilme rijitliği (k_1) çerçeve sistem için (106) bağıntısıyla, silindirik kabuk taşıyıcı sistem olması durumunda ise (107) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir.

Temel/zemin sistemi: Bu modelde yapı-zemin etkileşimi için, *Model 1*'e benzer olarak, ötelenme ve dönme rijitlikleri dikkate alınmaktadır.

Modelin Uygulanması

Model-3 için çözüm zaman ve frekans ortamlarında gerçekleştirilebilir. Çözüm yöntemi olarak, değiştirme yöntemleri ya da alt sistem yaklaşımları kullanılabilir. Bu yaklaşımlarla oluşturulan hareket denklemleri için modal çözümleme yöntemlerinden tepki spektrumu ve zaman tanım alanında çözüm teknikleri veya doğrudan çözüm teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada *Model-3* için çözüm, zaman ortamında hareket denkleminin modal analiz tekniği ile ayrıklaştırılarak çözümlemesi ile elde edilmektedir. Bu modelle ayaklı depoların dinamik hesaplarını yapabilmek için kodlanan bilgisayar programı EK-3 de sunulmaktadır.

Model-3 için gerçekleştirilen toplam 12 adet çözümlemeden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, tabanda bulunan elemanlardaki toplam kesme kuvveti, tabandaki bir kolonda oluşan eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ve bunların geçekleşme zamanları gömülmenin olmadığı durum için Tablo 21'de, olduğu durum için ise Tablo 22'de verilmektedir.

En büyük taban En büyük eleman En büyük yatay En büyük salınım yerdeğiştirme, U kesme kuvveti, V eğilme momenti, M_o yerdeğiştirmesi, u_s zaman (s) değer (m) zaman (s) değer (kN) zaman (s) değer (kNm) zaman (s) değer (m) **S**1 12,64 8,97 8,97 10,06 -1,0219 0,17323 -6538,9 -2215,3 S2 12,64 0,17616 8,97 8,97 -2283,8 10,06 -1,0225 -6744,7 -1,0251 S3 10,29 0,23031 8,97 8,97 -2617.3 10,05 -7748,1 10,51 0,30937 8,97 10,07 -1,0338 S4 8,97 -7842,5 -2649,1S5 8,67 -0,24561 4,89 -5850,9 4,89 -1993,3 10,08 -1,0459 5,72 0,23648 8,97 8,97 -2048,5 10.13 -1.0674 **S6** -6032,5

Tablo 21. *Model 3* için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

Tablo 22. *Model 3* için gömülmenin olduğu ($e/r_o=1$) durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay verdeğistirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyük eleman eğilme momenti. $M_{ m o}$		En büyük salınım verdeğistirmesi. Us	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S 1	12,64	0,1725	8,97	-6485,9	8,97	-2197,6	10,05	-1,0218
S2	12,64	0,1732	8,97	-6537,0	8,97	-2214,6	10,05	-1,0219
S3	10,26	0,1776	8,97	-6771,8	8,97	-2292,8	10,07	-1,0226
S4	10,29	0,2295	8,97	-7423,5	8,97	-2612,6	10,05	-1,0251
S 5	10,38	0,2781	8,97	-8462,3	8,97	-2854,8	10,05	-1,0289
S6	10,59	0,2807	9,90	6667,1	9,90	2263,5	10,07	-1,0375

Bu tablolarda verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-3 dikkate alınarak gömülme olmadığı ve gömülmenin olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 92~97'de verilmektedir.



Şekil 93. *Model-3*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 94. *Model-3*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 95. *Model-3*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri.



Şekil 96. *Model-3*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 97.*Model-3*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri.



Şekil 98. *Model-3*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Model-3 için elde edilen yerdeğiştirme grafiklerinden görüldüğü gibi S1~S5 zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmeler 10~12.5 s civarında 0,17~0,31 m olarak

gerçekleşmektedir. Aynı durum S6 için incelendiğinde en büyük yatay yerdeğiştirmenin gömülü olmayan temel sisteminde 5,72 s de 0,24 m seviyelerinde meydana gelmektedir. S5 ve S6 sistemleri için gömülmenin olduğu durumda ise davranışın diğer zemin türlerine benzer şekilde aynı zaman diliminde en büyük tepkileri verdikleri görülmektedir.

Burada incelenilen model gömülme durumuna göre irdelendiğinde S1~S2 sistemleri için gömülmenin hemen hemen etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin türleri için bu durum incelendiğinde ise gömülmenin yatay yerdeğiştirmeler için %26'lara varan azalmalara neden olabildiği tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak diğer bütün zemin sistemlerinde aynı olmasına rağmen S5 ve S6 zemin sistemleri için gömülmenin sistemin tepkisinin zamanla değişimleri üzerindeki etkisi de Şekil 96 ve 97'den açıkça görülmektedir.

Farklı zemin türleri için yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1 zemin sistemi için elde edilen çatı yerdeğiştirmesinde S6 zemin sistemine göre %38'e varan bir azalmanın olduğu, gömülme olmadığı durumda ise değişimlerin %44'lere ulaştığı görülmektedir. Diğer taraftan birbirine rijitlik olarak yakın zemin sistemlerinde, gerek en büyük tepkilerin gerçekleşme zamanı gerekse de değerleri arasında kayda değer farklılıkların olmadığı çalışmaya konu olan en zayıf zeminler için dahi tespit edilmiştir.

B-Kesme Kuvveti

Model-3 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 98~103'de verilmektedir.



Şekil 99. Model-3'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 100. Model-3'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 101. Model-3'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 102. Model-3'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 103. Model-3'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 104. Model-3'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Yukarıda verilen grafiklerden tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetleri S5 haricindeki tüm sistemlerde en büyük değerini 9 s de 6032~8462 kN olarak almaktadır. S5 için gömülmenin olmadığı durumda 4,89 s de 5850 kN seviyelerine kadar düşmektedir.

Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus ise, gömülme ilk üç zemin türü için etkili olmazken diğer zemin sistemlerinde davranışı belirgin bir şekilde etkilemektedir. Özellikle S5 sistemi için gömülmenin etkisiyle taban kesme kuvvetinin %30'lara varan oranlarda değişmesi dikkat çekicidir. Burada sisteme ait kesme kuvvetinin değişiminde yalnızca gömülmenin tabanda oluşan ötelenmeleri önlemesi değil, sistemin yer hareketine olan tepkisinin de değişik karakter göstermesinin de etkin olduğu görülmektedir. Bu kadar belirgin olmamakla beraber benzer durum S6 için de söz konusudur.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1'de oluşan kesme kuvveti değerinin S6'da oluşana

nazaran $(e/r_0=0)$ için %8, $(e/r_0=1)$ için ise %2 daha fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın birbirine yakın karakterdeki zemin sistemleri arasında ötelenme ve dönme rijitliği yüksek olanlarda büyük farklılıkların olmadığı, davranışın da buna bağlı olarak benzer olduğu söylenebilir. Bununla beraber nispeten daha az rijitlik değerlerine sahip zemin sistemlerinin davranışlarında farklılıkların gözlenmesi mümkün olabilmektedir.

C-Eğilme Momenti

Model-3 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanda oluşan eğilme momentlerinin zamanla değişimleri Şekil 104~109'da verilmektedir.



Şekil 105. Model-3'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 106. Model-3'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 107. Model-3'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.



Şekil 108. Model-3'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 109. Model-3'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 110. Model-3'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

S1~S3 zemin sistemleri için tabandaki bir elemanda oluşan eğilme momentlerinin en büyük değerleri 9 s civarında 2197~2617 kNm olarak gerçekleşmektedir. Benzer durum S4~S6 zemin sistemleri için incelendiğinde en büyük eğilme momentlerine ait tepkilerin ise gömülü olmayan temel sistemleri için 5s de 1993~2854 kNm değerlerine düşmektedir.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-3 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için sıvıda oluşan salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri Şekil 110~115'de verilmektedir.



Şekil 111. *Model-3*'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 112. *Model-3*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 113. *Model-3*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 114. *Model-3*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 115. *Model-3*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 116. *Model-3*'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi S1~S6 zemin sistemleri için en büyük salınım yerdeğiştirmeleri yaklaşık 10 s'de 1,02~1,07 m olarak gerçekleşmektedir. Buradan çıkartılabilecek önemli neticelerden biri salınım yerdeğiştirmesinin gömülme durumundan önemli derecede etkilenmediğidir. En büyük fark S6 zemin sistemi için %2 mertebelerinde kalmaktadır. Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1 ve S6 zemin sistemleri arasındaki fark gömülmenin olduğu durum için %4, olmadığı durumda ise %2 mertebelerinde gerçekleşmektedir.

2.4.4. Model-4: Sıvının Çok Kütleli Zeminin Frekans Bağımlı Rijitlik ve Sönümlerle Tanımlandığı Yapı İçin ise Mekanik Modellerin Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli.

Bu başlık altında oluşturulan ve *Model-4* olarak adlandırılan sıvı-yapı-zemin sistemine ilişkin modelin şematik görünüşleri Şekil 116'da verilmektedir. Bu modelin *Model-3* den farkı zemin için frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerin de dikkate alınmasıdır.

SIVI: Bu modelde sıvı için *Model-3*'de olduğu gibi iki kütleli yaklaşım kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, çok kütleli sistem yaklaşımıyla belirlenen (m_i) impuls kütlesi doğrudan ayak için belirlenen (k_1) rijitliği ile, (m_c) salınım kütlesi ise (k_2) ile gösterilen salınım rijitliği ile sisteme bağlanmaktadırlar. Burada m_1 ile gösterilen kütle sıvı için belirlenen impuls kütlesini içermektedir. Sıvı için literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından çok kütleli farklı modeller önerilmekte olup, bu modelin uygulanmasında EC-8 tarafından önerilen yaklaşım kullanılmaktadır. Bunun seçilme nedenleri daha önce *Model-3* de açıklanmıştı.

> Yapısal kısım: Haznenin boş kütlesinin tamamı ve bunun mesnetlendiği taşıyıcı sistemin kütlesinin uygun bir bölümünü (ACI 371R-98 ye göre 2/3'ü; Yeni Zelanda yönetmeliğine göre tamamı) modeldeki m_1 kütlesine eklenmektedir. Uygulamada ACI tarafından önerilen oran dikkate alınmaktadır. Söz konusu taşıyıcı sistemin eğilme rijitliği (k_1) çerçeve sistem için (106) bağıntısıyla, silindirik kabuk taşıyıcı sistem olması durumunda ise (107) bağıntısı yardımıyla belirlenebilir.

Temel/zemin sistemi: Bu modelde yapı-zemin etkileşimi için frekans bağımlı temel/zemin rijitlik ve sönüm mekanizmalarını dikkate alan yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşım zemin sistemine ait gerek malzeme gerekse de yayılmaya bağlı radyasyon sönümünün dikkate alınabilmesine imkan tanımaktadır. Bu modelde temel/zemin sistemi için yüzeysel ve gömülü temel durumları ayrı ayrı incelenebilmektedir.



Şekil 117. *Model 4:*Sıvının çok kütleli, zeminin frekans bağımlı rijitlik ve sönümlerle tanımlandığı yapı için ise mekanik modellerin kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Modelin Uygulanması

Bu model için çözüm frekans ortamlarında gerçekleştirilebilir. Zemine ait dinamik rijitliklerin frekans bağımlı olması nedeniyle hareket denkleminin zaman ortamında çözümü oldukça zor olmaktadır. Zaman ortamında çözüm gerçekleştirilmek istenirse (13) bağıntısından faydalanılabilir. Çözüm yöntemi olarak, alt sistem yaklaşımları kullanılabilir. Bunlardan söz konusu modelin uygulamasında Koni modeli seçilmektedir. Bu yaklaşımlarla oluşturulan hareket denklemleri için modal çözümleme yöntemleri ya da doğrudan çözüm teknikleri kullanılabilir. Bu modelle ayaklı depoların dinamik hesaplarını yapabilmek için kodlanan bilgisayar programı EK-4 de sunulmaktadır.

Şekil 116'da verilen model dikkate alınarak 6 farklı zemin sistemi için elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, tabanda bulunan elemanlardaki toplam kesme kuvveti, tabanda bir elemanda oluşan eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ve bunların geçekleşme zamanları gömülme durumlarına bağlı olarak Tablo 23-24'de verilmektedir.

-										
	En büyük yatay		En büyük taban		En büyi	ik eleman	En büyük salınım			
	yerdeğiştirme, U		kesme kuvveti, V		eğilme momenti, M_o		yerdeğiştirmesi, U _s			
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	(s) değer (kN) zaman (s) değer (k		değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)		
S1	5,38	0,098	4,89	-4697,6	4,89	-1501,9	22,21	-1,108		
S2	9,49	0,116	4,89	-4692,7	4,89	-1500,1	22,21	-1,127		
S3	9,52	0,104	4,89	-4672,9	4,89	-1493,0	22,22	-1,153		
S4	9,60	0,127	4,89	-4605,3	4,89	-1469,0	22,26	-1,282		
S5	9,73	-0,148	4,89	-4510,5	4,89	-1435,6	22,33	-1,489		
S6	7,82	0,155	4,89	-4337,7	4,89	-1377,9	20,85	1,812		

Tablo 23. *Model 4* için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

Tablo 24. *Model 4* için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerceklesme zamanları

	En büyük yatay		En büyük taban		En büyi	ik eleman	En büyük salınım					
	yerdeğiştirme, U		kesme kuvveti, V		eğilme momenti, M_o		yerdeğiştirmesi, U _s					
	zaman (s) değer		zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)				
S1	5,37	0,094	4,89	-4691,9	4,89	-1499,9	22,21	-1,103				
S2	5,38	0,098	4,89	-4673,3	4,89	-1493,3	22,21	-1,107				
S3	9,50	0,095	4,89	-4594,3	4,89	-1465,1	22,21	-1,114				
S4	9,52	0,103	4,89	-4359,1	4,89	-1384,0	22,22	-1,147				
S5	9,55	0,113	4,89	-4182,6	4,89	-1347,4	22,24	-1,192				
S6	9,63	0,129	4,89	-4579,0	4,89	-1628,6	22,27	-1,308				

Yukarıdaki tablolarda verilen en büyük değerleri verilen, yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-4 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve söz konusu olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 117~122'de verilmektedir.



Şekil 118. *Model-4*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 119. *Model-4*' de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri.



Şekil 120. *Model-4*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 121. *Model-4*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 122. *Model-4*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 123. *Model-4*' de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Yukarıda sunulan şekillerden görüldüğü gibi en büyük yerdeğiştirmeler 5~10 s aralığında gerçekleşmektedir. Bunların değeri ise 0,09~0,16 m civarında elde edilmektedir. Burada incelenilen model gömülmeye göre irdelendiğinde ilk üç zemin sistemin için (S1~S3) gömülmenin kayda değer etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin sistemleri için bu durum incelendiğinde ise gömülmenin yatay yerdeğiştirmeler için %24'lere varan azalmalara neden olduğu görülmektedir. Diğer zeminlerde önemli bir etki açıkça gözükmemesine karşın S5 ve S6 zemin sistemleri için gömülmenin sistemin tepkisinin değişimi üzerinde nispeten etkin olduğu belirtilebilir.

Yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri farklı zemin türleri için karşılaştırıldığında, S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı ve olduğu her iki durumun da birbirinden oldukça farklı tepkiler verdiği açıkça görülebilir. Bu olay gömülmenin olduğu durumda da benzer şekilde gerçekleşmektedir.

S1 zemin sistemi için elde edilen çatı yerdeğiştirmesinde S6 zemin sistemine göre gömülmenin olduğu durumda %27'e varan oranda azaldığı, gömülme olmadığı durumda ise değişimlerin %37'lere ulaştığı görülmektedir. Birbirine rijitlik olarak yakın zemin sistemleri gerek en büyük tepkilerin gerçekleşme zamanı, gerekse de değerlerin büyüklükleri arasında kayda değer farklılıkların olmadığı, çalışmaya konu olan en zayıf zeminler (S5 ve S6) için dahi görülebilmektedir. Oransal olarak karşılaştırma yapıldığında ise nispeten rijit zemin sistemleri olarak adlandırılabilecek S2 ve S3 türü zemin sistemlerindeki karşılaştırmalarda bu oranın sıfıra yakın olduğu, daha zayıf zemin

sistemleri olarak adlandırılabilecek olan S5 ve S6 zemin sistemlerinde ise oran ancak %12 mertebesine yükselmektedir.

B-Kesme Kuvveti

Model-4 dikkate alınarak gömülme olmadığı ($e/r_0=0$) ve gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumlarda altı farklı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 123~128'de verilmektedir.



Şekil 124. Model-4'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 125. Model-4'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 126. Model-4'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 127. Model-4'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 128. Model-4'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 129. Model-4'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvveti elde edilen bulgular bakımından incelendiğinde tüm sistemlerde en büyük taban kesme kuvvetlerinin yaklaşık 4,89 s de 4182~4697 kN olarak gerçekleştiği görülmektedir. Gömülme ilk üç zemin türü için en büyük kesme kuvvetinin değerinde önemli değişikliklere sebep olmazken, diğer zemin sistemlerinde en büyük kesme kuvvetleri arasında nispeten farklılıkların doğmasına neden olmuştur. Özellikle S5 zemin sistemi için gömülme taban kesme kuvvetinde %8 oranında azalmaya, S6 türü zemin sisteminde ise bu oranın %5 oranında artmaya neden olması dikkat çekicidir.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığında, S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durum irdelendiğinde her iki zemin sisteminin taban kesme kuvvetinin zamanla değişimleri açısından birbirinden kısmen davranış olarak farklı oldukları, en büyük kesme kuvveti açısındab ise önemli bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Bu duruma ek olarak gerçekleşme zamanları aynı olmasını karşın gömülme durumunda S1 için oluşan kesme kuvveti değeri S6 için oluşana nazaran %2 daha fazladır. Bu durum gömülmenin olması halinde benzer özellikler göstermesine ek olarak, S1 ile S6 arasındaki kesme kuvvetleri açısından fark ise %8 mertebesine ulaşmaktadır. Burada zemin sisteminde radyasyonel sönümün ve dinamik rijitliklerdeki azalmanın, düşen zemin rijitliğine bağlı olarak toplam taban kesme kuvvetinin zamanla değişimini de etkilendiği görülmektedir. Bu nedenle zemin tepkisindeki düşen zemin rijitliğiyle beklenen taban kesme kuvvetindeki azalma gerçekleşmeyerek aksine artabilmektedir. Buna karşın birbirine yakın karakterdeki zemin sistemleri arasında ötelenme ve dönme rijitliği yüksek olanlarda büyük farklılıklar olmamakta davranışları da benzer olmaktadır.

C-Eğilme Momenti

Model-4 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabandaki kolonların bir tanesinde oluşan eğilme momentlerinin zamanla değişimleri Şekil 129~134'de verilmektedir.



Şekil 130. Model-4'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 131. Model-4'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 132. Model-4'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 133. Model-4'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 134. Model-4'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.



Şekil 135. Model-4'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Tabandaki bir elemanda oluşan eğilme momenti bakımından grafikler S1~S3 ler için en büyük eğilme momentleri yaklaşık 4,89 s de 1347~1628 kNm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Zemin sistemlerinde oluşan eğilme momenti üzerinde gömülmenin etkisi incelenecek olursa, ilk üç zemin sistemi için (S1~S3) etkinin kayda değer olmadığı, diğer zemin sistemlerinden S4 için gömülmenin %6, S5 için %7 oranında artıma, S6 için ise %15 lere varan azalmalara neden olduğu görülmektedir. Burada zemine ait sönümün ve dinamik rijitliklerdeki azalmanın düşen zemin rijitliğine bağlı olarak eğilme momentindeki zamanla değişimin de etkilendiği belirtilebilir. Bu nedenle zemin tepkisindeki düşen zemin rijitliğiyle beklenen eğilme momentindeki azalma gerçekleşmeyerek aksine artabilmektedir.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-4 dikkate alınarak gömülme olmadığı ($e/r_0=0$) ve olduğu ($e/r_0=1$) durumlarda altı sınıf zemin sistemi için sıvıda meydana gelen salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri Şekil 135~140'da verilmektedir.



Şekil 136. *Model-4*'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 137. *Model-4*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 138. *Model-4*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 139. *Model-4*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 140. *Model-4*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 141. *Model-4*'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri

Elde edilen bulgular salınım yerdeğiştirmeleri bakımından incelendiğinde S1~S3 zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmelerin yaklaşık 22 s de 1,10~1,15 m, S4~S6 için ise 20~22 s de 1,15~1,81 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Burada incelenilen modellerin bütünü gömülme oranlarına göre irdelendiğinde salınım yerdeğiştirmesinin ilk üç zemin sisteminin gömülmeden kayda değer bir şekilde etkilenmediği görülmektedir. S4~S6 türü zemin sistemleri için aynı durum düşünüldüğünde, zemin sistemindeki rijitlik azalmalarına bağlı olarak salınım yerdeğiştirmesinin önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Etkilenme oranı ise S4 türü zemin sistemi için %11 mertebesinde S6 türü zemin sistemi için işe %28 mertebesinde olmaktadır.

Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri açısından S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durum irdelendiğinde her iki durumda salınım yerdeğiştirmesinin gerek zamanla değişimi gerekse de büyüklüğü açısından %39 civarında farklılıklar olduğu görülmektedir. Gömülme halinde ise değişimin daha az farklılıklara neden olduğu ortaya çıkmaktadır. Diğer bir ifadeyle gömülme durumunda bu değişimin %16 mertebelerinde kaldığı görülmektedir.

2.4.5. Model-5: Sıvı İçin Çok Kütleli Eklenmiş Kütle Yaklaşımının; Zemin İçin Statik Rijitliklerin Kullanıldığı Ayaklı Deponun Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

Çalışma kapsamında sayısal yöntemler kullanılarak oluşturulan ilk model olan ve *Model 5* olarak adlandırılan sıvı-yapı-zemin sistemine ilişkin model Şekil 141'de görülmektedir. Bu modelde:

Sivi: Sivi için dikkate alınacak kütlelerin belirlenmesinde EC-8'de tanımlanan çok kütleli yaklaşım dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşımla belirlenen impuls (m_i) ve salınım (m_c) kütleleri sonlu eleman modeli içerisinde çeşitli şekillerde temsil edilebilmektedir. Salınım kütlesinin belirli bir rijitlikle yapı içerisinde hesaba katılması gerekmektedir. Bu yüzden salınım kütlesi hazne içerisinde EC-8 yaklaşımına göre belirlenen yükseklikteki sonlu elemanlara ait noktalarda birbirine dik iki doğrultuda salınım rijitliğine bağlı belirlenen yaylarla ya da yalnız eksenel rijitliğe sahip olan elemanlarla modellenebilir.



Şekil 142. *Model 5*; Sıvı için çok kütleli eklenmiş kütle yaklaşımının; zemin için statik rijitliklerin, kullanıldığı ayaklı deponun sıvı-yapı-zemin modeli

İmpuls kütlesinin sonlu eleman modeline dahil edilebilmesi için üç farklı yaklaşımdan bahsedilebilir. Bunlardan birinci yaklaşımda salınım kütlesine benzer olarak EC-8 yaklaşımına göre belirlenen yükseklikte hazne merkezinde tanımlanan rijit elemanlarla, ya da ek kütle olarak yapı sonlu eleman modeli içine eklenmesiyle gerçekleştirilebilir. İkinci yaklaşımda impuls kütlesi haznenin sonlu elemanlarına bunların birim ağırlıkları eşit olarak artırılmak suretiyle eklenmektedir (ikinci tür yaklaşım). Üçüncü yaklaşımda ise EC-8 de tanımlanan impuls moduna ait hidrodinamik basıncın hazne duvarındaki dağılımına bağlı olarak bu kütle depo duvarına eklenmektedir (üçüncü tür yaklaşım).
Yukarıda ifade edilen birinci yaklaşımın sonlu eleman modeli içerisinde tanımlanması çoğu zaman gerekmez. Çünkü impuls kütlesi depo haznesiyle beraber hareket ettiği kabul edilen, dolayısıyla kendi içerisinde salınım yapmayan sıvı kısmını temsil etmektedir. Bu nedenle ikinci ve üçüncü yaklaşımların kullanılması daha gerçekçi olmaktadır.

Burada ifade edilen ikinci ve üçüncü tür yaklaşımların *Model 5*'le birlikte kullanılmaları durumunda sonuçların nasıl değiştiği Tablo 25'de sunulmaktadır. Bunlardan birinin seçilmesiyle modellerin sunumunun daha kolay olması amaçlanmaktadır.

Tablo 25. *Model 5* için eklenmiş kütle yaklaşımının iki farklı şekilde kullanılmasıyla dört farklı zemin için elde edilen sonuçlar ve bunların karşılaştırılması

	İmpul: sonlu eklen	s kütlesii elemanl mesi (iki	nin tanın ara eşit c inci yakla	ılanan əlarak aşım)	İmpuls kütlesini hidrodinamik basınca bağlı olarak hazne duvarına eklenmesi (üçüncü yaklaşım)				% değişim			
EC-8 de verilen Zemin Sınıfı	А	В	D	Е	А	В	D	Е	А	В	D	Е
T_c (s)	3.668	3.668	3.668	3.668	3.663	3.663	3.663	3.663	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13
T_i (s)	1.061	1.061	1.061	1.061	1.036	1.036	1.036	1.036	-2.35	-2.35	-2.35	-2.35
V (kN)	2716	4052	4651	4723	2706	4038	4635	4708	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
M_o (kNm)	60850	90501	103777	105455	63370	94393	108276	110022	4.1	4.2	4.9	4.3
u_{max} (mm)	59	88	101	102	58	86	99	101	-1.7	-2.2	-1.9	-0.9

Burada T_c ve T_i salınım ve impuls modlarına ait periyotları, V ve M_0 ise ayaklı depo taban kesme ve devirici momentleri, u_{max} ise yatay yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Görüldüğü gibi her iki yaklaşımın kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar arasındaki değişim en az %0,13 en çok ise %4,9 dur. Sıvının davranışının hidrodinamik basınca bağlı olduğu bilindiğinden bu tez kapsamında *Model 5* için hidrodinamik basınca göre dağılımın dikkate alındığı üçüncü tür yaklaşım tercih edilmektedir. Yapı-Sıvı etkileşiminin dikkate alınmasında kullanılan impuls kütlesi Westergaard tarafından önerilen eklenmiş kütle yaklaşımı, EC-8'de verilen hidrodinamik basınç dağılımına göre, hazne duvarı yüksekliği boyunca tanımlamış elemanlara uygulanmaktadır. Diğer taraftan yine aynı yöntemle, belirlenen salınım kütlesi hesaplanan yükseklikte depo tabanına paralel düzlemde birbirine dik doğrultularda ötelenme serbestliklerine sahip olabilecek şekilde tanımlanan yaylarla hazne duvarına bağlanmaktadır. ➢ Yapısal kısım: Ayak taşıyıcı sisteminin modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Bu model için ayak taşıyıcı sistemi çerçeve sisteminin modellenmesinde ve her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi bulunan iki düğüm noktalı çerçeve (*Frame*) eleman, hazne ve radye temel sistemi için ise her noktasında altı serbestlik derecesi bulunan dört noktalı kabuk (*Shell*) eleman tipi kullanılmıştır

➤ Temel/zemin sistemi: Çalışmada dikkate alınan radye temel sistemi sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmektedir. Zemin sistemi için ötelenme ve dönme rijitliklerini dikkate alan yaklaşım kullanılmaktadır. Bu modelde temel/zemin sistemi için yüzeysel ve gömülü temel durumları da ayrı ayrı incelenebilmektedir. Bu modelde yapızemin etkileşiminin dikkate alınmasında değiştirme yöntemlerinden FEMA yaklaşımı ile elde edilen değiştirilmiş rijitlikler kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayısal modelde ötelenme ve dönme serbestliği dikkate alınarak Şekil 135'de gösterildiği gibi uygulanmaktadır.

Modelin Uygulanması

Bu model için çözüm frekans ya da zaman ortamlarında gerçekleştirilebilir. Çözüm yöntemi olarak, alt sistem yaklaşımlarıyla doğrudan çözüm teknikleri birlikte kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarla oluşturulan hareket denklemleri için modal çözümleme yöntemleriyle tepki spektrumu ya da zaman tanım alanında çözüm teknikleri ve ya doğrudan çözüm teknikleri kullanılabilir.Burada oluşturulan sayısal modele ait hareket denkleminin çözümünde zaman ortamında doğrudan integrasyon yöntemlerinden Newmark yaklaşımı (α =0,50, β =0,25) kullanılmaktadır. Bu çözümlemede dikkate alınacak sönüm matrisi için ise Rayleigh sönümü seçilmiştir. Bu nedenle dikkate alınan kütle matrisi çarpanı (α_r =0,04) rijitlik matrisi çarpanı ise (β_r =0,009) olarak hesaplanmaktadır. Bütün bu sistemlerin çözümünde SAP2000 paket programından faydalanılmaktadır.

Model-5 dikkate alınarak iki farklı gömülme oranının ($e/r_0=0$ ve 1) her biri için altı farklı zemin sistemi dikkate alınarak toplam on iki çözümleme gerçekleştirilmektedir. Bu çözümlemelerden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları gömülmenin olmadığı durum ($e/r_0=0$) için Tablo 26'da gömülmenin söz konusu olduğu durumda ($e/r_0=1$) ise Tablo 27'de sunulmaktadır.

	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyük eleman eğilme momenti, M_o		En büyük salınım yerdeğiştirmesi, u s	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S1	9,45	0,1660	9,45	-3351,33	9,45	3270,11	11,80	-1,3440
S2	12,45	0,1740	12,45	3413,67	13,00	3320,94	11,80	-1,3478
S3	12,50	-0,2026	12,50	3755,21	12,50	-3671,25	11,80	-1,3572
S4	11,55	-0,2854	9,55	-3977,68	9,55	-3914,18	10,10	1,4012
S5	9,95	0,4487	9,95	-4146,89	9,95	4086,40	11,80	-1,4628
S6	5,70	0,3052	5,70	-1689,01	5,70	1649,45	10,20	1,7077

Tablo 26. *Model 5* için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

Tablo 27. *Model 5* için gömülmenin olduğu ($e/r_o=1$) durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük çatı yer değistrimesi, U		En büyük Salınım verdeğistirmesi Us		En büyi Kesme K	ik Taban Juvveti V	En büyük eleman eğilme momenti. Ma	
	zaman (s) değer (m)		zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)
S1	9,45	0,1680	9,45	-3375,57	9,45	3293,74	11,80	-1,3442
S2	9,45	0,1662	9,45	-3350,93	9,45	3269,66	11,80	-1,3440
S3	13,00	0,1770	12,45	3466,98	13,00	3370,25	11,80	-1,3486
S4	12,50	-0,2064	12,50	3727,44	12,50	-3655,13	10,10	1,3604
S5	12,60	-0,2179	12,60	3469,86	13,20	3391,82	11,85	-1,3796
S6	9,70	0,3902	9,60	-4817,18	9,60	4694,74	10,15	1,4259

Bu tablolarda verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Analitik yöntemlerden farklı olarak sayısal yöntemlerde yapı taşıyıcı sistemine ait herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme değerini elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu sayede *Model-5* için yapılan bu çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin, depo yüksekliği boyunca değişimleri Şekil 142 ve 143'de verilmektedir. Buradan da görülebileceği gibi Şekil 142'de örnek olarak S1, S3 ve S6 zemin sistemleri için gömülmeye bağlı değişimler verilmektedir. Temel-zemin sistemi için rijitlik olarak en büyük değere sahip bulunan S1 zemin sistemi için gömülmenin yükseklik boyunca yerdeğiştirmenin değişiminde hemen hemen hiçbir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Rijitlik olarak orta düzeyde bir değere sahip olan S3 zemin sistemi için ise gömülme etkisi yerdeğiştirme %13 azalırken, S6 için söz konusu etki %22 azalmaktadır. Şekil 142 ve 143'den görülebileceği gibi temel-zemin rijitliklerindeki azalmalar en büyük yerdeğiştirmelerin gerçekleşme yüksekliklerini değiştirebilmektedir. Örnek olarak en büyük yerdeğiştirme gömülmenin olmadığı S1~S3 zemin sistemleri ile gömülmenin olduğu S1~S5 zemin sistemleri için 21 m seviyelerinde, diğer sistemlerde ise 32,5 m seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu tür bir yapı sisteminde kritik olan yerdeğiştirmenin sıvı kütlesinin toplandığı yükseklikte ya da daha yüksek bir seviyede gerçekleşmesi, taşıyıcı sistemde oluşabilecek ikinci mertebe etkileri üzerinde ve bu sayede yapının stabilitesinin bozulmasında önemli bir etken olabilecekdir. Bu nedenle yapıda oluşacak olan yerdeğiştirme değerlerinin mertebesinin yanında meydana geldiği nokta da önemli olmaktadır. Burada yapıda oluşan en büyük yerdeğiştirmelerin yapının uygulanabilirliği açısından irdelenmesinin daha sonraki başlıklarda bütün modeller için yapılacaktır.



Şekil 143. *Model-5*'e ait yatay yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülmeye bağlı olarak değişimleri

Yapı yüksekliği boyunca verilen yerdeğiştirmelerin en büyük tepkileri zemin sistemlerine göre karşılaştırıldığında en az, gömülmenin olmadığı durumda, %5 (S1 \leftrightarrow S2) olduğu durumda ise %1 (S1 \leftrightarrow S2) olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durum en büyük değerler bakımından irdelendiğinde ise, zemin sistemleri için gömülmenin olmadığı durumda %170 (S1 \leftrightarrow S5), olduğu durumda ise %132 (S1 \leftrightarrow S6) oranında farka ulaşmaktadır.



Şekil 144. *Model-5*'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin sistemleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları.

Model-5 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve söz konusu olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 144-149'da verilmektedir.



Şekil 145. *Model-5*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 146. *Model-5*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 147. *Model-5*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri.



Şekil 148. *Model-5*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 149. *Model-5*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 150. *Model-5*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Elde edilen bulgular yatay yerdeğiştirmeler bakımından incelendiğinde S1~S5 ler için en büyük yerdeğiştirmeler yaklaşık 10~12,5 s de 0,17~0,45 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durum gömülmenin olmadığı S6 zemin sistemi için incelendiğinde ise en büyük yatay yerdeğiştirmeye ait tepkilerin 5,70 s de 0,31 m seviyelerinde gerçekleştiği tespit edilmektedir. Burada incelenilen model için gömülme oranının etkisi irdelendiğinde, elde edilen bulgulardan S1~S3 zemin sistemleri için önemli bir etkinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin türleri için bu durum incelendiğinde ise özellikle S5 zemin sistemi için %50 lere varan azalmalar gerçekleşmektedir.

Diğer taraftan zemin sisteminde gerçekleşen rijitlik azalmalarına bağlı olarak davranışın gerek en büyük tepkinin gerçekleşme zamanı, gerekse de sistemin yer hareketine olan tepkisi açısından önemli farklılıklara neden olduğu da görülmektedir. Bu durum belirgin bir şekilde S6 zemin sistemi için açıkça gerçekleşmektedir.

B-Kesme Kuvveti

Model-5 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 150~155'de verilmektedir.



Şekil 151. Model-5'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 152. Model-5'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 153. Model-5'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 154. Model-5'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 155. Model-5'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 156. Model-5'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Yukarıda verilen şekillerden görüldüğü gibi tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvveti incelendiğinde S1~S5 zemin sistemleri için en büyük değerler yaklaşık 10~13 s de 3351~4817 kN olarak gerçekleşmektedir. Benzer durumda gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için en büyük taban kesme kuvveti 5,70 s de 1689 kN olarak gerçekleşmektedir. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus, gömülmenin ilk üç zemin sistemi için önemli derecede etkili olmazken diğer zemin sistemlerinde davranışı belirgin bir şekilde etkilemesidir. Özellikle S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı sistemdeki gerçekleşen kesme değeri, olduğu sisteme göre %65 oranında azalmıştır. Bu durumun nedeni olarak sadece gömülme etkisini görmek, sistemin diğer zemin sistemlerden oldukça farklı tepkisinin önemli ölçüde etkin olduğu gibi bir gerçeği göz ardı etmemize neden olabilir. Bu durum benzer şekilde gerek salınım gerekse de sistemdeki diğer iç kuvvet etkileri için de görülmektedir.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığı zaman S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olduğu durum irdelendiğinde her iki zemin sisteminin taban kesme kuvvetinin zamanla değişimleri açısından birbirinden farklı oldukları görülmektedir. Bu farklılıkların en büyük kesme kuvvetinin gerçekleşme zamanı ve her iki zemin sisteminin tepkisinden kaynaklandığı belirtilebilir. S6'da oluşan kesme kuvveti değeri S1'de oluşan kesme kuvvetine göre %30 daha büyüktür. Benzer karşılaştırma gömülmenin olmadığı durum için gerçekleştirilirse, S1'de oluşan kesme kuvveti değerinin S6'da oluşana nazaran %98 daha fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın birbirine yakın karakterdeki zemin sistemleri arasında ötelenme ve dönme rijitliği yüksek olanlarda büyük farklılıkların olmadığı davranışın da buna bağlı olarak benzer olduğu görülmektedir. Burada tabandaki elemanlarda oluşan

toplam kesme kuvvetlerinin azalan zemin rijitliğine bağlı olarak artan bir karaktere sahip olması dikkat çekici olan bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

C-Eğilme Momenti

Sayısal modellerin analitik modellere göre bazı üstünlüklerinin olduğundan daha önce de bahsedilmişti. Burada analitik modellerden elde edilen sonuçlardan farklı olarak herhangi bir iç kuvvetin hangi elemanda en büyük değerini aldığı ya da yerdeğiştirmenin hangi seviyede ne kadar gerçekleştiği gibi ayrıntıları da belirleyebilmek mümkün olmaktadır. Buradan hareketle elde edilen bulgular bakımından tabandaki elemanlarda oluşan eğilme momentlerinin en büyüğünün hangi elemanlarda oluştuğu Şekil 141'de verilmektedir. Bu elemanlara ait değerlerin zamanla değişimleri ise Şekil 156~161'de görüldüğü gibidir.



Şekil 157. *Model-5*'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 158. *Model-5*'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 159. *Model-5*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 160. *Model-5*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 161. *Model-5*'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.



Şekil 162. *Model-5*'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Oluşan en büyük eğilme momentleri incelendiğinde S1~S5 zemin sistemleri için en büyük değerler yaklaşık 10~13 s de 3270~4694 kNm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durumda gömülmenin olmadığı S6 zemin sistemi için en büyük taban kesme kuvveti 5,70 s de 1649,45 kNm olarak düşük seviyede gerçekleşmektedir. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus, gömülme ilk üç zemin türü için etkili olmazken, diğer zemin sistemleri için davranışı belirgin bir şekilde etkilemektedir. Buna örnek olarak özellikle S6 zemin sistemleri için gömülmenin olmadığı durumda gerçekleşen eğilme momenti değerinin, olduğu sisteme göre %65 oranında azalması verilebilir.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-5 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için sıvıda oluşan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 162~167 de verilmektedir.



Şekil 163. *Model-5*'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 164. *Model-5*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 165. *Model-5*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 166. *Model-5*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 167. *Model-5*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 168. *Model-5*'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri

Yukarıdaki şekillerden S6 zemin sistemi haricindeki S1~S5 sistemleri için en büyük salınım yerdeğiştirmelerinin yaklaşık 11,80 s de 1,34~1,71 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Diğer taraftan salınım yerdeğiştirmesinin gömülmeden kayda değer bir şekilde etkilenmediği de belirtilebilir. Örneğin S5 zemin sistemi için %6 mertebesinde bir etkilenme olmuştur. Ancak S6 zemin sistemi incelendiğinde gömülmenin çok daha önemli oranlarda etikisinin olabildiği görülmektedir. Burada S6 zemin sistemi için yapı davranışının olduğu kadar sıvı davranışının da diğer zemin sistemlerine nazaran farklılıklar sergilediği görülmektedir. Oransal olarak bu karşılaştırma gerçekleştirildiğinde ise S6 zemin sistemi için gömülmenin salınım yerdeğiştirmesinde %17'lere varan azalmalara neden olduğu söylenebilir.

Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1 ve S6 zemin sistemlerinde gerek salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri gerekse de en büyük değer açısından belirgin bir farklılığın olduğu açıkça görülmektedir. S6 zemin sistemi için elde edilen salınım yerdeğiştirmesi S1 zemin sistemine ilişkin salınım yerdeğiştirmesine göre %28 daha büyük gerçekleşmiştir.

2.4.6. Model-6: Sıvı İçin Eklenmiş Kütle Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının Kullanıldığı Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

Sayısal yöntemler kullanılarak oluşturulan ikinci model olan ve *Model 6* olarak adlandırılan sıvı-yapı-zemin sistemine ilişkin model Şekil 168'de görülmektedir. Bu modelin *Model 5*'den farkı zeminin de sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesidir. Bu modelde:

Sıvı: Yapı-Sıvı etkileşiminin dikkate alınmasında kullanılan impuls kütlesi Westergaard tarafından önerilen eklenmiş kütle yaklaşımı, EC-8'de verilen hidrodinamik basınç dağılımına göre, hazne duvarı yüksekliği boyunca tanımlamış elemanlara uygulamak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşımla ilgili bilgiler *Model*-5'de verilmişti.



Şekil 169. *Model 6*; Sıvı için eklenmiş kütle yaklaşımının; zemin için kütlesiz temel yaklaşımının (*solid* tipte sonlu elemanla), kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Yapısal kısım: Bu model için dikkate alınan yapısal kısım Model-5' dekine benzer olup haznenin sonlu eleman modelinde ise kabuk (shell) tipinde sonlu eleman kullanılmaktadır. Bu model için ayak taşıyıcı sistemi çerçeve sisteminin modellenmesinde her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi bulunan iki düğüm noktalı çerçeve (Frame) eleman, hazne ve radye temel sistemi için ise her noktasında altı serbestlik derecesi bulunan dört noktalı kabuk (Shell) eleman tipi kullanılmıştır

Temel/zemin sistemi: Bu model icin zemin ortamı Sekil 168'den de görülebileceği gibi yeterli genişlikte üç boyutlu katı eleman (solid), temel sistemi ise kabuk (shell) tipinde sonlu elemanla modellenmektedir. Yeterli genişlik almaktan amaç, burada dikkate alınan zeminin yarı sonsuz bir elastik ortam olması nedeniyle her üç doğrultuda da yayılan dalgaların zemin sınırlarında yansımalarının önüne geçmektir. Bu nedenle bu modelin uygun boyutlarına karar verirken parametrik çalışma gerçekleştirilmelidir. İlk olarak değişik sonlu eleman ağları arasından uygun olanına karar verilmeli daha sonrada bu sonlu eleman modeli boyutları zemin sınırında dinamik çözümlemelerden elde edilen yerdeğiştirmeler sıfıra eşitlenene kadar genişletilmelidir. Sonuç olarak elde edilen zemin sonlu eleman modeli için kütlesiz temel kabulüyle çözüme gidilebilir. Bu model için de yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla kütlesiz temel yaklaşımı sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte kullanılmaktadır. Kütlesiz temel yaklaşımın kullanılması için zemin sisteminin sınırlarının yapıya ait eylemsizlik etkilerinden etkilenmeyecek bir uzaklıkta olması gerektiği daha önce de bu konuyla ilgili olarak ifade edilmişti. Bu sebeple bu tez kapsamında temel-zemin sisteminin boyutlarına karar verebilmek için yapıya yakın bir sınırdan başlayıp adım adım zemin modelini genişletmek suretiyle parametrik bir çalışma gerçeklestirilmiştir. Sonuç olarak karar verilen sonlu eleman boyutlarında sonlu elemanlara ait ağın da sistem tepkilerini değiştirmediği yapılan üç farklı uygulamayla denetlenerek modelde kullanılan sonlu elemanlar ağına karar verilmiştir.

Modelin Uygulanması

Bu model için çözüm frekans ya da zaman ortamında gerçekleştirilebilir. Çözüm yöntemi olarak, doğrudan çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarla oluşturulan hareket denklemleri için modal çözümleme yöntemleriyle tepki spektrumu, zaman tanım alanında çözüm teknikleri ya da doğrudan çözüm teknikleri kullanılabilir.

Burada oluşturulan sayısal modele ait hareket denkleminin çözümünde zaman ortamında doğrudan integrasyon yöntemlerinden Newmark yaklaşımı (α =0,50, β =0,25) ve sönüm matrisi için ise Rayleigh sönümü kullanılmaktadır. Bu nedenle dikkate alınan kütle matrisi çarpanı (α_r =0,04) rijitlik matrisi çarpanı ise (β_r = 0,009) olarak hesaplanmaktadır. Bütün bu sistemlerin çözümünde SAP2000 paket programından faydalanılmaktadır.

Model-6 kullanılarak iki farklı gömülme oranının ($e/r_0=0$ ve 1) her biri için altı farklı zemin sistemiyle toplam oniki çözümleme gerçekleştirilmektedir. Bu çözümlemelerden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları gömülmenin olmadığı durum ($e/r_0=0$) için Tablo 28'de gömülmenin söz konusu olduğu durumunda ($e/r_0=1$) ise Tablo 29'da sunulmaktadır.

Tablo 28. *Model 6* için gömülmenin olmadığı ($e/r_o=0$) durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyük eleman eğilme momenti, M_o		En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	Değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S1	12,45	-0,1795	12,45	3523,13	12,45	3377,25	11,80	-1,3481
S2	12,45	-0,1862	12,45	3617,77	12,45	3466,29	11,80	-1,3490
S3	12,50	-0,2008	12,50	3755,21	12,50	3616,68	11,80	-1,3554
S4	12,55	-0,2086	12,55	3557,54	12,55	3451,68	11,80	-1,3670
S5	12,65	-0,2323	12,65	3612,07	12,65	3509,30	11,85	-1,3863
S 6	9.70	0,3932	9.70	-4872,05	9.70	-4718.10	11,85	1,4265

Tablo 29. *Model 6* için gömülmenin olduğu ($e/r_o=1$) durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay		En büyük taban		En büyi	ik eleman	En büyük salınım	
zemin	emin yerdeğiştirme, U		kesme kuvveti, V		egilme mo	omenti, M _o	yerdeğiştirmesi, U _s	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	Değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S 1	9,45	-0,1638	12,40	-3354,80	9,45	-3273,13	11,80	-1,3442
S2	12,40	-0,1658	12,40	-3338,78	9,45	-3257,40	11,80	-1,3448
S3	12,45	-0,1740	12,45	3442,83	12,45	3367,25	11,80	-1,3472
S4	12,50	-0,2068	12,50	3745,76	12,50	3652,90	11,80	-1,3598
S5	12,50	-0,2072	12,50	3760,42	12,50	3685,89	11,80	-1,3599
S 6	12,60	-0,2161	12,60	3508,45	12,60	3449,19	11,85	-1,3762

Tablo 28 ve 29'da enbüyük değerleri verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-6 için yapılan çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin depo yüksekliği boyunca en büyük değerlerine ait elde edilen değişimler Şekil 169 ve 170'de verilmektedir. Şekil 169'da örnek olarak seçilen S1, S3 ve S6 zemin sistemleri için gömülmeye bağlı değişimler görülmektedir. Bu şekilden temel-zemin sistemi için rijitlik olarak en büyük değere sahip bulunan S1 sistemi için gömülmenin yükseklik boyunca yerdeğiştirmenin değişiminde hemen hemen hiçbir etkisinin olmadığı açıkça tespit edilebilir. Rijitlik olarak orta düzeyde bir değere sahip olan S3 sistemi için ise gömülmenin %13 mertebesinde bir azalmaya sebep olabileceği, benzer durumun S6 zemin sistemi için incelenmesi durumunda ise bu oranın %47'lere ulaşabildiği görülebilmektedir.

Aşağıdaki şekilden görülebileceği gibi gerek gömülmenin olduğu gerekse de olmadığı durumlarda yükseklik boyunca en büyük yerdeğiştirmenin değişimi benzer karakter sergilemektedir. Buradan da görülebileceği gibi sistemlerde temel-zemin rijitliklerindeki azalmalar en büyük yerdeğiştirmelerin gerçekleşme yüksekliklerini değiştirebilmektedir. Örnek olarak en büyük yerdeğiştirme gömülmenin olmadığı S1~S4 sistemleri ile gömülmenin olduğu tüm sistemlerde 21 m seviyelerinde, diğer iki sistemde ise 32,5 m seviyesinde gerçekleşmektedir.



Şekil 170. *Model-6*'ya ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri



Şekil 171. *Model-6*'ya ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları

Yapı yüksekliği boyunca verilen yerdeğiştirmelerin en büyük tepkileri zemin sistemlerine göre karşılaştırıldığında en az, gömülmenin olmadığı durumda, %4 (S1 \leftrightarrow S2) olduğu durumda ise %1 (S1 \leftrightarrow S2) olarak gerçekleştiği tespit edilmektedir. Benzer durum en büyük değişimler bakımında irdelendiğinde ise, zemin sisteminin gömülmenin olmadığı durumda %119 (S1 \leftrightarrow S6) oranında, olduğu durumda ise %32 (S1 \leftrightarrow S6) oranında artıma sebep olabildiği görülmektedir. Bu karşılaştırmalar, yukarıdan da açıkça görülebileceği gibi, gömülmenin sistemin zemindeki rijitlik azalmalarından kaynaklanabilecek etkiler üzerinde ne ölçüde etkin olabileceği hakkında önemli bir fikir vermektedir.

Model-6 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve söz konusu olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 171~176' da verilmektedir.



Şekil 172. *Model-6*'da S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 173. *Model-6*'da S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 174. *Model-6*'da S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 175. *Model-6*'da S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 176. *Model-6*'da S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 177. *Model-6*'da S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Yukarıda verilen şekillerden de görülebileceği gibi S1~S5 zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmeler 10~12,5 s civarında 0,16~0,39 m olarak gerçekleşmektedir. Burada incelenilen model gömülmeye göre irdelendiğinde, S1~S3 sistemleri için gömülmenin kayda değer etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin türleri için bu durum incelendiğinde ise özellikle S6 zemin sistemi için gerek en büyük tepkinin gerçekleşme zamanı, gerekse de tepkinin zamanla değişimindeki farklılıklar dikkat çekicidir. Buradan hareketle S5 sistemi için gömülmenin yerdeğiştirmeyi %11, S6 sistemi için ise %45 oranında azaltabildiği belirtilebilir.

Diğer taraftan zemin sisteminde gerçekleşen rijilik azalmalarına bağlı olarak davranışın gerek en büyük tepkinin gerçekleşme zamanı gerekse de sistemin yer hareketine olan tepkisi açısından önemli farklılıklara neden olduğu belirtilebilir. Örnek olarak en büyük tepkinin değerinde önemli bir farklılık olmamasına karşın tepkinin zamanla değişimi arasındaki farklılıklar S4 zemin sistemi ve daha az rijit bütün zemin sistemlerinde görülmektedir. Gömülmeye bağlı olarak S6 sistemi için ise en büyük tepkinin gerçekleşme zamanı, değeri ve tepkinin zamanla değişiminin gömülmeden belirgin bir şekilde etkilendiği söylenebilir.

B-Kesme Kuvveti

Model-6 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 177~182'de verilmektedir.



Şekil 178. Model-6'da S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 179. Model-6'da S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 180. Model-6'da S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 181. Model-6'da S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 182. Model-6'da S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 183. *Model-6*'da S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi S1~S6 zemin sistemleri için en büyük kesme kuvveti değerlerinin yaklaşık 10~12,5 s de 3354~4872 kN olarak gerçekleştiği görülmektedir. Burada ifade edilen şekillerden, gömülme ilk üç zemin türü için (Şekil 177, 178, 179) etkili olmazken, S3 den sonra tanımlanan zemin sistemlerinde davranışı belirgin bir şekilde etkilemiştir. Özellikle S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı sistemdeki gerçekleşen kesme değerinin, olduğu sisteme göre %28 oranında azaldığı belirtilebilir.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olduğu durumda her iki zemin sistemi taban kesme kuvvetinin zamanla değişimleri açısından birbirinden farklı oldukları görülmektedir. Bu durumda S6'da oluşan kesme kuvveti değeri S1'de oluşana nazaran %5 daha fazla olmaktadır. Benzer karşılaştırma gömülmenin olmadığı durum için gerçekleştirilirse S6'da oluşan kesme kuvveti değerinin S1'de oluşana nazaran %38 daha fazla olduğu tespit edilebilir.

C-Eğilme Momenti

Eğilme momentinin en büyük değeri aldığı elemanda, zamanla değişimleri aşağıdaki şekillerde zemin sistemlerine göre sırasıyla verilmektedir (Şekil 183~188).



Şekil 184. *Model-6*'da S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 185. *Model-6*'da S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 186. *Model-6*'da S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 187. *Model-6*'da S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 188. *Model-6*'da S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 189. *Model-6*'da S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.

Oluşan en büyük eğilme momentleri incelendiğinde S1~S6 zemin sistemleri için değerler yaklaşık 10~12,5 s de 3257~4718 kNm olarak gerçekleşmektedir. Bu model için, gömülme ilk üç zemin sistemi için etkili olmazken, diğer zemin sistemlerinin davranışı belirgin bir şekilde etkilenmiştir. Özellikle S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı sistemdeki gerçekleşen eğilme momenti değeri, olduğu sisteme göre %27 oranında daha küçük olarak gerçekleşmiştir.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-6 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için sıvıda meydana gelen salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 189~194'de verilmektedir.



Şekil 190. *Model-6*'da S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 191. *Model-6*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 192. *Model-6*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 193. *Model-6*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 194. *Model-6*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 195. *Model-6*'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri

Elde edilen bulgular salınım yerdeğiştirmeleri bakımından incelendiğinde S1~S6 sistemleri için en büyük yerdeğiştirmeler yaklaşık 11,80 s de 1,34~1,43 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Buradaki model için elde edilen değerler gömülme oranlarına göre salınım yerdeğiştirmesinin genelde gömülmeden kayda değer bir şekilde etkilenmediği, en büyük oran S6 için %4 olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında en küçük salınım yerdeğiştirmesinin S1, en büyüğünün de S6 için oluşmasına rağmen bu iki sistem arasındaki değişimin küçüğüne göre % 7 oranında gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durum gömülmenin olması halinde ise zemin sistemlerine göre ancak %2 oranında kalmaktadır.

2.4.7. Model-7: Sıvı İçin Sonlu Eleman Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının Kullanıldığı Ayaklı Depo Sıvı-Yapı-Zemin Modeli

Sıvı için de sonlu elemanların kullanıldığı ve *Model* 7 olarak adlandırılan sıvı-yapızemin sistemine ilişkin görünüm Şekil 195'de verilmektedir.

SIVI: Bu modelde sıvı davranışını dikkate almada Langrange yaklaşımı kullanılmaktadır. Langrange yaklaşımına uygun şekilde sıvı ile hazne duvarı için aynı koordinatlara sahip noktaların radyal serbestlikleri bağımlı hale getirilmiştir. Bu ifadeden de anlaşılabileceği gibi sıvı elemanlar ile hazne elemanları herhangi bir ortak noktaya sahip değildir. Sıvının sonlu elemanla modellenmesinde her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip (u_{xy} , u_{yy} , u_{zy}) 8 düğüm noktalı sıvı eleman (*Fluid80*) kullanılmaktadır. Bu

elemana ait mekanik özellikler için ise birim hacim ağırlığı ρ =1000 kg/m³ hacimsel elastisite modülü E_c =2,07x10⁹ N/m², sönüm oranı ise ζ_s =%0,5 olarak dikkate alınmaktadır. Bunlara ek olarak sıvı eleman haznenin serbest yüzeyinde meydana gelen salınım etkilerini de dikkate alacak şekilde tasarlanmıştır.

➢ Yapısal kısım: Bu model için Ayak taşıyıcı sistemi çerçeve sisteminin modellenmesinde her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi bulunan iki düğüm noktalı çubuk (*Beam 4*) eleman, hazne ve radye temel sistemi için ise her noktasında altı serbestlik derecesi bulunan dört noktalı kabuk (*Shell 163*) elemanı seçilmiştir.

> Temel/zemin sistemi: Yapı-zemin etkileşimini dikkate alabilmek için kütlesiz temel yaklaşımı sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte kullanılmaktadır. Şekil 195'den de gözükeceği gibi zemin yeterli genişlikte üç boyutlu katı (*solid*), temel sistemi ise kabuk (*shell*) tipinde sonlu elemanla modellenmektedir. Zeminin modellenmesinde her bir noktasında üç adet serbestlik içeren (u_x , u_y , u_z ,) 6 noktalı pirizmatik solid eleman kullanılmıştır. Benzer şekilde gerek temel sisteminin modellenmesinde gerekse de haznenin modellenmesinde her noktada 6 serbestliğe sahip 4 noktalı kabuk eleman kullanılmıştır. Burada sonlu eleman tipi ve modelinin belirlenmesinde *Model-6*'de ifade edilen prosedür aynı şekilde takip edilmiştir.



Şekil 196. *Model 7*; Sıvı için sonlu eleman yaklaşımının, zemin için kütlesiz temel yaklaşımının (*solid* tipte sonlu elemanla), kullanıldığı ayaklı depo sıvı-yapı-zemin modeli

Modelin Uygulanması

Oluşturulan sayısal modele ait hareket denkleminin çözümünde zaman ortamında doğrudan integrasyon yöntemlerinden Newmark yaklaşımı sönüm için ise Rayleigh sönümü kullanılmaktadır. Bu nedenle dikkate alınan kütle matrisi çarpanı (α_r =0,04) rijitlik matrisi çarpanı ise ($\beta_r = 0,009$) olarak hesaplanmaktadır. Bütün bu modellerin gerçekleştirilmesinde ANSYS paket programından faydalanılmaktadır.

Model-7 için gerçekleştirilen toplam 12 adet çözümlemeden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları gömülmenin olmadığı durum ($e/r_0=0$) için Tablo 30'da gömülmenin söz konusu olduğu durumda ($e/r_0=1$) ise Tablo 31'de sunulmaktadır.

Tablo 30. *Model-7* için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük yerdeğiştirme ve iç kuvvet değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyi	ik eleman	En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s		
zemin					eğilme ma	omenti, M_o			
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	Zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)	
S1	9,45	0,1048	9,40	3999,56	9,40	1890,24	10,10	1,9702	
S2	9,45	0,1048	9,40	3999,50	9,40	1870,20	10,10	1,9700	
S3	9,45	0,1091	9,40	4001,09	9,40	1835,78	10,15	-1,9897	
S4	9,55	0,1203	9,45	4081,77	9,45	1829,51	10,15	2,0457	
S5	9,60	0,1363	9,55	4236,07	9,55	1870,99	10,15	2,1000	
S6	9,75	0,1847	9,65	4569,43	9,65	1997,21	10,25	2,1836	

Tablo 31. *Model-7* için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyi	ik eleman	En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s			
zemin					eğilme ma	omenti, M_o				
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	Zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)		
S 1	9,45	0,1021	9,40	3986,23	9,40	1909,36	10,10	-1,9576		
S2	9,45	0,1025	9,40	3988,66	9,40	1910,40	10,10	-1,9595		
S3	9,45	0,1037	9,40	3996,00	9,40	1913,61	10,10	-1,9662		
S4	9,50	0,1078	9,40	4005,51	9,40	1917,10	10,10	-1,9854		
S 5	9,50	0,1140	9,45	4050,24	9,45	1934,92	10,20	-2,0140		
S6	9,55	0,1296	10,15	4184,84	9,50	1993,73	9,50	-2,0769		

Yukarıda verilen tablolarda yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-7 için yapılan bu çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin depo yüksekliği boyunca değişimleri Şekil 196 ve 197'de verilmektedir.

Aşağıda verilen şekillerden görüldüğü gibi, temel-zemin sistemi için rijitlik olarak en büyük değere sahip bulunan S1 sistemi için gömülmenin, yükseklik boyunca yerdeğiştirmenin değişiminde hemen hemen hiçbir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Rijitlik olarak orta düzeyde bir değere sahip olan S3 sistemi için ise gömülmenin %5 mertebesinde bir azalmaya sebep olabileceği, benzer durumun S6 zemin sistemi için incelenmesi durumunda ise bu oranın tersine %30'lara ulaşabildiği görülmektedir. Burada S6 için yükseklik boyunca değişimin gömülmeden oldukça fazla etkilendiği söylenebilir. En büyük yerdeğiştirme diğer zemin sistemleri için hazne seviyesinden daha aşağıda gerçekleşmektedir. S6 zemin sisteminde ise gömülme olmaması durumunda en büyük yerdeğiştirme hazne kubbesi seviyesinde meydana gelmektedir. Bununla ilgili irdeleme bir önceki *Model-6*'da yapılmış olduğundan burada tekrarlanmayacaktır.



Şekil 197. *Model-7*'ye ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri



Şekil 198. *Model-7'*ye ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları

Yapı yüksekliği boyunca verilen yerdeğiştirmelerin en büyük tepkileri zemin sistemlerine göre karşılaştırıldığında gerek gömülmenin olmadığı durumda, gerekse de olduğu durumda en az S1↔S2 arasında gerçekleşmekte, bu sistemler için eğriler hemen hemen çakışmaktadır. Benzer durum en büyük değişimler bakımında irdelendiğinde ise, S1↔S6 arasında gömülmenin olmadığı durumda %76, olduğu durumda ise %27 oranında artımlar gerçekleşmektedir. Bu karşılaştırmalar, yukarıdan da açıkça görülebileceği gibi, gömülmenin sistemin zemindeki rijitlik azalmalardan kaynaklanabilecek etkilerin üzerinde ne ölçüde etkin olabileceği hakkında önemli bir fikir vermektedir.

*Model-*7 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve söz konusu olduğu durumlarda hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi Şekil 198~203'de verilmektedir.



Şekil 199. *Model-7*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 200. *Model-7*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 201. *Model-7*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 202. *Model-7*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 203. *Model-7*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 204. *Model-7*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi S1~S6 sistemleri için en büyük yatay yerdeğiştirmeler yaklaşık 9,5 s de 0,10~0,18 m olarak gerçekleşmektedir. Burada incelenilen model gömülme oranlarına göre irdelendiğinde, elde edilen bulgulardan S1~S3 sistemleri için gömülmenin kayda değer etkisinin olmadığı yorumu çıkartılabilir. Diğer zemin sistemleri için bu durum incelendiğinde özellikle S6 zemin sistemi için gerek en büyük tepkinin gerçekleşme zamanı, gerekse de büyüklüğünün %30 oranında azalması dikkat çekicidir. Bu grafiklerden de görülebileceği gibi sistemde oluşan yerdeğiştirmeler azalan temel-zemin rijitliğiyle önemli ölçüde artmaktadır.

B-Kesme Kuvveti

Model-7 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme
kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 204~209'de verilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvveti incelendiğinde S1~S6 zemin sistemleri için en büyük değerler yaklaşık 9,5 s de 3986~4569 kN olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 205. Model-7'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 206. Model-7'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 207. Model-7'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 208. Model-7'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 209. Model-7'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 210. Model-7'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus ise, gömülmenin hemen hemen bütün zemin sistemleri için önemli sayılabilecek derecede etkili olmadığıdır. S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı sistemde gerçekleşen kesme değerinin, olduğu sisteme göre %8 oranında azalmıştır.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri karşılaştırıldığında S1 ve S6 zemin sistemlerinde gömülmenin olmadığı durumda, her iki zemin sisteminin taban kesme kuvvetinin zamanla değişimleri açısından birbirinden önemli farklılıklarının olmadığı görülmektedir. Bu durumda S6 için oluşan kesme kuvveti değeri, S1 için oluşana nazaran gömülmenin olmadığı durumda %14, gömülmenin olduğu durumda ise %5 daha fazla olmaktadır. Buna karşın birbirine yakın karakterdeki zemin sistemlerinde, yüksek rijitliğe sahip olanları için farklılıkların daha da az, davranışın da buna bağlı olarak benzer olduğu, rijitliği daha az olanlarda ise (S5 ve S6) ise farklılığın %8 oranına kadar çıkabildiği görülmektedir.

C-Eğilme Momenti

Seçilen elemanda eğilme momentinin zamanla değişimleri aşağıdaki şekillerde zemin sistemlerine göre sırasıyla verilmektedir (Şekil 210~215).



Şekil 211. *Model-7*'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 212. *Model-7*'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 213. *Model-7*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 214. *Model-7*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 215. *Model-7*'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 216. *Model-7*'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Oluşan en büyük eğilme momentleri incelendiğinde S1~S6 zemin sistemleri için değerler yaklaşık 9,5 s de 1890~1997 kNm olarak gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 210-215). Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus ise, gömülmenin bütün zeminler için önemli bir değişime sebep olmadığıdır. Keza S6 zemin sistemi için dahi gömülmenin etkisi yaklaşık olarak sıfırdır.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-7 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 216~221'de verilmektedir.



Şekil 217. *Model-7*'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 218. *Model-7*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 219. *Model-7*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 220. *Model-7*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 221. *Model-7*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 222. *Model-7*'e ait salınım yer değiştirmenin S6 için zamanla değişimleri

Elde edilen bulgular salınım yerdeğiştirmeleri bakımından incelendiğinde S1~S6 sistemleri için en büyük yerdeğiştirmeler yaklaşık 10 s de 1,96~2,18 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Buradaki modeller gömülme oranlarına göre irdelendiğinde ise salınım yerdeğiştirmesinin gömülmeden kayda değer bir şekilde etkilenmediği söylenebilir. Etkilenme oranı bu sistemler için irdelenmek istendiğinde değişimin en fazla S6 zemin sistemi için %4 mertebelerinde kaldığı tespit edilebilmektedir.

Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında en küçük salınım yerdeğiştirmesinin S1, en büyüğünün de S6 için oluşmasına rağmen bu iki sistem arasındaki değişim gömülmenin olmadığı durum için % 11, gömülme durumunda ise %6 oranında gerçekleşmiştir. Bu oranlar yapıya ait

yerdeğiştirmelerin değişimleriyle karşılaştırıldığında küçük seviyelerde kaldığı görülmektedir.

2.4.8. Model-8: Sıvı İçin Sonlu Eleman Yaklaşımının Zemin İçin Kütlesiz Temel Yaklaşımının ve Sanal Sınırların Kullanıldığı Sıvı-Yapı -Zemin Modeli

Zemin modelinde sanal sınırların da kullanıldığı ve *Model 8* olarak adlandırılan sıvıyapı-zemin sistemine ilişkin model Şekil 222'de görülmektedir.

Sıvı: Bu modelde sıvı-yapı etkileşimi için dikkate alınan yaklaşım *Model-7*'de dikkate alınan yaklaşımın aynıdır.

Yapısal kısım: Yapısal kısmın modellenmesinde kullanılan yaklaşım da *Model* 7'de dikkate alınanla aynıdır.

➤ Temel/zemin sistemi: Temel/zemin sistemi için Şekil 222'den de gözükeceği gibi zemin yeterli genişlikte üç boyutlu katı eleman (*solid*), temel sistemi ise kabuk (*shell*) tipinde sonlu elemanla modellenmektedir. Zeminin modellenmesinde her bir noktasında üç adet serbestlik içeren (ux, uy, uz,) 6 noktalı pirizmatik katı eleman (*solid*) eleman kullanılmıştır. Benzer şekilde gerek temel sisteminin modellenmesinde, gerekse de haznenin modellenmesinde her noktada 6 serbestliğe sahip 4 noktalı kabul (*shell*) eleman kullanılmıştır. Bu modelde sonsuz zemin ortamının gerçekçi bir şekilde modellenebilmesi için sanal viskoz sınırlar kullanılmıştır. Sönümleyiciler model sınırlarına kartezyen koordinat sisteminde her bir doğrultuda yerleştirilmiştir. Sonlu eleman ağının genişliğinin belirlenmesinde ve eleman boyutlarının seçiminde Madde 2.1.2.4.2'de verilen kurallara uyulmaktadır.

Modelin Uygulanması

Sanal sınır yaklaşımı için, sınırların belirlenmesinde zemin sisteminin maruz kaldığı etkinin frekans içeriği elde edilerek (bu içerikte en büyük frekans 4,5 Hz dikkate alınarak) **Madde 2.1.2.4.2**'de açıklanan kriterlere uygun hareket edilmiştir. Sonuç olarak karar verilen sonlu eleman boyutlarında sonlu elemanlara ait ağın da sistem tepkilerini değiştirmediği yapılan üç farklı uygulamayla denetlenerek Şekil 222'deki modele karar verilmiştir. Bütün bu modellerin gerçekleştirilmesinde ANSYS paket programından faydalanılmaktadır.



Şekil 223. *Model 7*; Sıvı için sonlu eleman yaklaşımının, zemin için kütlesiz temel yaklaşımının ve sanal sınırların kullanıldığı sıvı-yapı-zemin modeli

Model-8 için gerçekleştirilen toplam 12 adet çözümlemeden elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri ile bunların gerçekleşme zamanları, gömülmenin olmadığı durum ($e/r_0=0$) için Tablo 32'de gömülmenin söz konusu olduğu durumunda ($e/r_0=1$) ise Tablo 33'de sunulmaktadır.

zemin	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük taban kesme kuvveti, V		En büyük eleman eğilme momenti, M_o		En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S 1	9,45	0,1040	9,40	4010,13	9,40	1904,80	10,10	-1,9642
S2	9,45	0,1066	9,40	4051,34	9,45	1954,88	10,10	-1,9766
S3	9,50	0,1157	9,45	4168,45	9,40	1918,15	10,15	-2,0182
S4	9,55	0,1414	9,50	4525,44	9,50	2087,85	10,15	-2,1433
S 5	9,60	0,1708	9,55	4846,50	9,55	2212,09	10,20	-2,2625
S6	9,80	0,2465	9,75	5309,26	9,75	2440,98	10,35	-2,4179

Tablo 32. *Model 8* için gömülmenin söz konusu olmadığı $(e/r_o=0)$ durumda elde edilen en büyük değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

Tablo 33.	<i>Model 8</i> için gömülmenin olduğu $(e/r_o=1)$ durumda elde edilen en büyük
	değerler ve bunların gerçekleşme zamanları

	En büyük yatay		En büyük taban		En büyük eleman		En büyük salınım	
Zemin	yerdeğiştirme, U		kesme kuvveti, V		eğilme momenti, M_o		yerdeğiştirmesi, U _s	
	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (kN)	zaman (s)	değer (kNm)	zaman (s)	değer (m)
S1	9,45	0,1025	9,40	3998,28	9,40	1915,83	10,10	-1,9589
S2	9,45	0,1041	9,40	4032,10	9,40	1932,15	10,10	-1,9663
S3	9,45	0,1096	9,40	4136,43	9,40	1982,77	10,10	-1,9925
S4	9,50	0,1260	9,45	4388,66	9,45	2101,51	10,15	-2,0742
S5	9,50	0,1427	9,50	4546,50	9,50	2172,96	10,15	-2,1549
S6	9,70	0,1771	9,50	4672,04	9,60	2224,06	10,25	-2,3071

Tablo 32 ve 33'de en büyük değerleri verilen yatay yerdeğiştirme (A), kesme kuvveti (B), eğilme momenti (C) ve salınım yerdeğiştirmesinin (D) zamanla değişimleri de belirlenmiş olup bunlara ilişkin grafik ve bulgular aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Model-8 için yapılan bu çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinin depo yüksekliği boyunca değişimleri Şekil 223 ve 224'de verilmektedir.



Şekil 224. *Model-8*'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, S1, S3 ve S6 zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca gömülme olup olmamasına göre değişimleri

Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi temel-zemin sistemi için rijitlik olarak en büyük değere sahip bulunan S1 sistemi için gömülmenin, yükseklik boyunca yerdeğiştirmenin değişiminde hemen hemen hiçbir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Rijitlik olarak orta düzeyde bir değere sahip olan S3 sistemi için ise gömülmenin %5 mertebesinde bir azalmaya sebep olabileceği, benzer durumun S6 zemin sistemi için incelenmesi durumunda ise bu oranın tersine %28'lere ulaşabildiği görülebilmektedir. Burada S6 zemin sistemi için yükseklik boyunca değişimi gömülmeden oldukça fazla etkilenmektedir.



Şekil 225. *Model-8*'e ait en büyük yerdeğiştirmelerin, bütün zemin türleri için ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimlerinin karşılaştırmaları

Yukarıdaki şekilden görülebileceği gibi temel-zemin rijitliklerindeki azalmalar en büyük yerdeğiştirmelerin gerçekleşme yüksekliklerini değiştirebilmektedir. Örnek olarak en büyük yerdeğiştirme gömülmenin olmadığı S1~S5 sistemleri ile gömülmenin olduğu tüm sistemlerde 21 m seviyelerinde, diğer sistemlerde ise 32,5 m seviyesinde gerçekleşmektedir. Bu tür bir yapı sisteminde kritik olan yerdeğiştirmenin sıvı kütlesinin toplandığı yükseklikte ya da daha yüksek bir seviyede gerçeklemesinin taşıyıcı sisteminde ne tür sakıncalar doğuracağı daha önce de ifade edilmişti.

Yapı yüksekliği boyunca verilen yerdeğiştirmelerin en büyük tepkileri zemin sistemlerine göre karşılaştırıldığında gerek gömülmenin olmadığı durumda, gerekse de olduğu durumda en az fark S1↔S2 sistemleri için gerçekleşmiş olup bunların eğrileri hemen hemen üst üste çakışmaktadır. Benzer durum en büyük değişimler için incelendiğinde ise, zemin sisteminin S1↔S6 arasında gömülme olmadığı durumda %137, olduğu durumda ise %73 oranıda yatay yerdeğiştirmelerin arttığı tesit edilmektedir.

Model-8 için zemine ait kütlenin de hesaba katılması zeminde kütleye bağlı ötelenmelerin de oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle sistemde zemine göre göreli ötelemelere bağlı karşılaştırmalar daha iyi fikir verecektir. Bu şekilde karşılaştırmalar yapılmak istendiğinde ilk durumdaki oran %93 ikincisinde ise %35 olarak hesaplanmaktadır.

Model-8 dikkate alınarak gömülmenin olmadığı ve söz konusu olduğu durumlarda hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri Şekil 225~230' da verilmektedir.



Şekil 226. *Model-8*'de S1 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 227. *Model-8*'de S2 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 228. *Model-8*'de S3 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 229. *Model-8*'de S4 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 230. *Model-8*'de S5 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri



Şekil 231. *Model-8*'de S6 için hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimleri

Bu model için elde edilen bulgular S1~S6 zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirmelerin 9,5s civarında 0,10~0,25 m olarak gerçekleştiğini göstermektedir. Gömülme oranlarına göre irdelendiğinde, elde edilen bulgulardan S1~S3 sistemleri için gömülmenin kayda değer etkisinin olmadığı görülmektedir. Diğer zemin türleri için bu durum incelendiğinde, özellikle S6 zemin sistemi için en büyük tepkinin gerek gerçekleşme zamanı gerekse de büyüklüğündeki farklılıklar dikkat çekicidir. Örneğin, S5 sistemi için gömülmenin yerdeğiştirmeyi %16 oranında, S6 sistemi için ise %28 oranında azaltabildiği görülmektedir. Bunlardan da görülebileceği gibi sistemde oluşan yerdeğiştirmeler azalan temel-zemin rijitliğiyle önemli ölçüde artmaktadır.

B-Kesme Kuvveti

Model–8 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için tabanda bulunan elemanlarda oluşan toplam kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 231~236'da verilmektedir.



Şekil 232. *Model-8*'de S1 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 233. *Model-8*'de S2 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 234. *Model-8*'de S3 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 235. *Model-8*'de S4 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 236. *Model-8*'de S5 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.



Şekil 237. *Model-8*'de S6 için hesaplanan kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri

Yukarıdaki şekillerden görüldüğü gibi S1~S6 zemin sistemleri için en büyük yerdeğiştirme değerleri 9,5 s civarında 3998~5309 kN olarak gerçekleşmektedir. Burada

ifade edilmesi gereken bir diğer husus ise, gömülmenin S6 zemin sistemi dışındaki sistemlerde en fazla %6 oranında kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olduğudur. S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı sistemdeki gerçekleşen kesme değerinin, olduğu sisteme göre %12 oranında azalabildiği görülmektedir.

Farklı zemin türleri için tabanda oluşan kesme kuvvetlerinin toplamının zamanla değişimleri, en fazla fark için, karşılaştırıldığında S6 için hesaplanan kesme kuvveti değerinin, S1 için hesaplanana göre gömülmenin olmadığı durumda %32, gömülme olduğunda durumda ise%17 daha fazla olduğu görülmektedir.

C-Eğilme Momenti

Ayaklı depo taşıyıcı sisteminde tabanda en büyük eğilme momentinin meydana geldiği elemanda eğilme momentinin zamanla değişimleri aşağıdaki şekillerde zemin sistemlerine göre sırasıyla verilmektedir (Şekil 237~242).



Şekil 238. *Model-8*'de S1 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 239. *Model-8*'de S2 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 240. *Model-8*'de S3 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri.



Şekil 241. *Model-8*'de S4 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 242. *Model-8*'de S5 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri



Şekil 243. *Model-8*'de S6 için hesaplanan eğilme momentinin zamanla değişimleri

Eğilme momentleri için yukarıdaki şekiller incelendiğinde S1~S6 zemin sistemleri için değerlerin yaklaşık 9,5 s de 1904~2440 kNm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus ise, gömülmenin bütün zeminler için önemli bir değişime sebep olmamasıdır. Keza kesme kuvvetindeki gömülmeye bağlı azalma S5 için %6, S6 zemin sistemi için ise %12 oranında kalmaktadır.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Model-8 dikkate alınarak gömülme oranının $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ olduğu durumlarda altı sınıf zemin sistemi için sıvıda meydana gelen salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri Şekil 243~248'de verilmektedir.



Şekil 244. *Model-8*'de S1 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 245. *Model-8*'de S2 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 246. *Model-8*'de S3 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 247. *Model-8*'de S4 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 248. *Model-8*'de S5 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri



Şekil 249. *Model-8*'de S6 için hesaplanan salınım yerdeğiştirmesinin zamanla değişimleri

Elde edilen bulgular salınım yerdeğiştirmeleri bakımından incelendiğinde S1~S6 sistemleri için en büyük salınım yerdeğiştirmeleri yaklaşık 10 s de 1,96~2,42 m olarak gerçekleşmektedir. Buradaki ilk dört model gömülme oranlarına göre irdelendiğinde ise salınım yerdeğiştirmesinin gömülmeden kayda değer bir şekilde etkilenmediği, gömülmeye göre etkinin en çok %3 mertebesinde kaldığı görülmektedir. Etkilenme oranı S5 ve S6 zemin sistemleri için ise %5 mertebelerinde kalmaktadır. Zemin sistemine bağlı olarak salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimleri karşılaştırıldığında en küçük salınım yerdeğiştirmesinin S1, en büyüğünün de S6 için oluşması nedeniyle bu iki zemin sistemi karşılaştırıldığında, temel-zemin sistemindeki rijitlik artmasına bağlı gömülmenin olmadığı durumda salınımın % 23, olduğu durumda ise %18 oranında değiştiği söylenebilir.

2.5. Bulguların Genel Değerlendirilmesi

Her bir model için elde edilen bulgular ilgili oldukları başlıklar altında daha önce Madde 2.4'de sunulmuş ve irdelenmiştir. Bu başlık altında ise modellerin tamamından elde edilen bulguların karşılaştırmalı olarak genel değerlendirmeleri yapılmaktadır. Bu genel değerlendirmeler modeller, zemin, sıvı, taşıyıcı sistem ve zeminin doğrusal olmayan davranışı gibi parametrelerin, depo dinamik davranışına etkileri bakımından aşağıdaki alt başlıklarda yapılmaktadır.

2.5.1. Modellerin Sistem Davranışını Temsilinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında toplam sekiz model dikkate alınmış olup, bunlardan ilk dördü analitik, son dördü ise ağırlıklı olarak sayısal yöntemlerin kullanıldığı modellerdir. Karşılaştırmalar Madde 2.2'de yapılanlara benzer olarak yatay yerdeğiştirmeler, taban kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve salınım yerdeğiştirmeleri üzerinden gerçekleştirilmektedir.

A-Yatay Yerdeğiştirme

Oluşturulan bütün modeller için elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri gömülme durumuna da bağlı olarak S1 zemin sistemi için Şekil 249'da, S6 zemin sistemi için ise Şekil 250'de karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 250. S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modeller için en büyük yatay yerdeğiştirmeler

Şekil 249'dan da görüldüğü gibi S1 zemin sistemi için en büyük yatay yerdeğiştirme değerini *Model-1*, en küçük değeri ise *Model-4* vermektedir. Değer olarak karşılaştırıldığında *Model-1*, *Model-4*'e göre %70 daha büyük bir değere sahiptir.



Şekil 251. S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durum da bütün modeller için en büyük yatay yerdeğiştirmeler

Şekil 250'den görüldüğü gibi S6 zemin sistemi için en büyük yerdeğiştirmenin modellere göre değişiminin karşılaştırılması S1 için olandan daha karmaşıktır. En büyük yerdeğiştirme değerini *Model-1* değil gömülme durumunda *Model-5*, gömülmenin olmadığı durumda ise *Model-6* vermektedir. Modeller arasında en büyük fark *Model-5* ile *Model-2* arasında %68 olarak gerçekleşmektedir. Buradaki modeller arasındaki farklılıkların temel-zemin ve yapı-sıvı sistemleri için kullanılan yaklaşımlardaki kabullerden kaynaklandığı söylenbilir. Burada analitik yöntemlerde kullanılan modellerle ilgili olarak frekans bağımlı modellerin S1 ve S2 gibi rijit sistemlerde aşırı sönüm üretemesine bağlı tepkilerin siddetlerinde azalmaların gerçekleştiğini belirtmek uygun olmaktadır. Bu durum azalan zemin rijitliği ve boyutsuz frekanstaki artmaya bağlı olarak ortadan kalkmaktadır.

Sayısal yöntemlerde yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimini belirleme imkanı bulunmaktadır. Şekil 251~253'de gömülmenin olmadığı ve olduğu durumda S1, S3 ve S6 zemin sistemleri için sayısal modellerden elde edilen değerler karşılaştırılmaktadır. Burada kullanılan dört modelden S1 sistemi için yapılan karşılaştırmalarda gömülmenin olduğu durumda, *Model-5* ile *Model-6*'nın benzer sonuçlar

verdiği, *Model-7* ile *Model-8*'in ise her iki durumda da sonuçlarının çakıştıkları görülmektedir. Gömülmenin olmadığı durumda ise S1~S3 zemin sistemleri için elde edilen değerlerin *Model-5* ve *Model-6* için elde edilen değerler birbirine oldukça yakın olmaktadır. Bu durum gömülmenin olduğu hemen hemen bütün sistemlerde de benzer şekilde gerçekleşmektedir. Gömülmenin olmadığı S4~S6 zemin sistemleri için ise *Model-5* ile *Model-6*'nın verdiği değerler arasındaki farklılıklar dikkat çekicidir. Burada *Model-5* için elde edilen ötelenme ve dönme rijitliklerinin *Model-6*'da zemin sonlu eleman modelinin ürettiğine göre çok daha az oldukları yargısı çıkmaktadır.



Şekil 252. S1 zemin sistemi için $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi

Model 7 ve 8 için durum irdelendiğinde ise S1 için elde edilen yerdeğiştirmelerin çakıştıkları, S3 için farklılıkların oluşmaya başladığı, S6 zemin sistemi için ise yerdeğiştirme tepkilerinin *Model-8* için daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durum temel seviyesine göre göreli yerdeğiştirmeler cinsinden irdelendiğinde ise durumun gerek

S3, gerekse de S6 için böyle olmadığı, *Model 7* ve *Model-8* için bütün sonuçların belirli bir yaklaşıkla çakıştıkları tespit edilmektedir. Buradan hareketle *Model-8*'de *Model-7*'den farklı olarak zemin sisteminin kütlesinin dikkate alınabiliyor olması, bu kütle sebebiyle temel sisteminde meydana gelen ötelenmelerin belirlemesine imkan verdiği görülmektedir. Ancak incelenilen temel sistemleri açısından düşünüldüğünde temel-zemin sisteminin eylemsizliğini dikkate alarak gerçekleştirilen kütlesiz temel yaklaşımının kullanıldığı *Model-7* nin *Model-8*'le çok yakın sonuçlar ürettiği görülmektedir. Örnek olarak *Model-7* ile *Model-8* arasında temel seviyesine nazaran göreli yerdeğiştirmeler, gömülmenin olmadığı durumda S1~S3 için yaklaşık olarak çakışmakta, S4 için %6, S5 ve S6 için ise en fazla %8 oranında değişmekte, gömülmenin olduğu durumda ise bu oran en fazla %6 olarak gerçekleşmektedir *Model-5* ve *Model-6* ile *Model-7* ve *Model-8* arasındaki yerdeğiştirme farkının bu denli olmasının sıvının sönümleyici etkisinden kaynaklandığı söylenebilir. Bu kısım **Madde** 2.5.3'de daha ayrıntılı irdelenmektedir.



Şekil 253. S3 zemin sistemi için $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi.



Şekil 254. S6 zemin sistemi için (e/r₀=0) ve (e/r₀=1) durumlarında hesaplanan yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimi

Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus, bu tür bir yapı sistemi için en büyük göreli ötelenmenin Türk Deprem Yönetmeliğine göre ($\Delta_{imax}/h \le 0, 0035$) şartını sağlaması gerektiğidir. Bu durumda söz konusu yapı için en büyük göreli ötelenmenin 0.114 m değerini aşmaması gerekmektedir. Bu açıdan modeller değerlendirildiğinde *Model-3*, 7 ve 8 dışındaki bütün modellerde hiçbir temel-zemin sistemi için bu şartın sağlanmadığı görülmektedir. Gömülmenin olmadığı durumda *Model 3, 7* ve 8 için S1, S2 ve S3 zemin sistemlerinde sınırın aşılmadığı, gömülmenin olduğu durumda ise *Model 3* ve 7 için S1~S5 zemin sistemlerinde, *Model 8* için ise ilk dört zemin sisteminde sınırın aşılmadığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak oluşturulan modellerin bazıları için yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimlerinin karşılaştırılmasında yarar bulunmaktadır. Bu bağlamda Şekil 254'de *Model-4* ve *Model-8* dikkate alınarak S1 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı ve Şekil 255'de *Model-4* ve *Model-7* dikkate alınarak S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı durumlarda elde edilen yerdeğiştirmelerin değişimleri karşılaştırılmaktadır. Bu şekillerden görüldüğü gibi her iki karşılaştırımada da model ve gömülme durumu için hesaplanan yerdeğiştirmenin en büyük değerleri ve zamanla değişimleri hemen hemen aynı olmaktadır.



Şekil 255. Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S1 zemin sistemi için *Model-4* ve *Model-8*'e ait yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri

Burada verilen değerler karşılaştırılmak istendiğinde, *Model-4*'te S1 türü zemin için gömülmenin olmadığı durumda elde edilen en büyük değerin 0,10 m, *Model-8* için ise 0,10 m olarak gerçekleştiği, gömülmenin olduğu durumda ise bu değerlerin sırasıyla 0.09 m ve 0,10 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum S6 türü zemin sistemi için yapılan karşılaştırmalarda ise *Model-4*'de gömülmenin olmadığı durumda elde edilen en büyük değerin 0,16 m, *Model-7* için ise 0,18 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu karşılaştırmalarda değerlerin de 0.13 m olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu karşılaştırmalardan da görülebileceği gibi elde edilen sonuçlar birbiriyle oldukça uyum içerisindedir.



Şekil 256. Gömülmenin olmadığı (*e*/*r*₀=0) durumda S6 zemin sistemi için *Model-4* ve *Model-7*'ye ait yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri

Sayısal ve analitik yöntemlerden olan *Model-3* ile *Model-6* karşılaştırıldığında ise durum yukarıda ifade edilenlerden farklıdır. Burada her iki modelde gerek S5 türü zemin sistemi için gömülmenin olduğu, gerekse de olmadığı durumda farklı karakter sergilemektedirler. *Model-2* için ise tek kütleli modelin dikkate alınmış olması *Model-4*, *Model-7* ve *Model-8* gibi modellere göre daha fazla bir etkinin doğmasına neden olmaktadır.

B-Kesme Kuvveti

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen modellerde S1 ve S6 zemin sistemleri için elde edilenen en büyük taban kesme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak Şekil 256 ve 257'de sunulmaktadır.



Şekil 257. S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük kesme kuvvetleri



Şekil 258. S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modeller elde edilen en en büyük kesme kuvvetleri

Şekillerden görüldüğü gibi taban kesme kuvveti, S1 zemin sistemi için analitik modellerden *Model-1*'de diğerlerine göre en büyük değeri vermektedir. Burada en büyük kesme kuvveti değerini ise *Model-1* gömülme durumu için vermektedir.

Sayısal yöntemlerden elde edilen taban kesme kuvvetleri bazı durumlar için karşılaştırmak istendiğinde, bunlara örnek olarak gömülmenin olmadığı S1 ve S6 zemin sistemleri için elde edilenlerin *Model-7* ile *Model-8* için benzer olduğu görülmektedir. *Model-5* ve *Model-6* ise temel-zemin rijitliğinin yüksek olduğu durumlarda benzer sonuçlar üretmektedir. Taban kesme kuvvetleri için gömülmenin olmadığı durum irdelendiğinde diğer karşılaştırmalara benzer şekilde *Model-5* ile *Model-6* arasındaki farklılaşmanın azalan temel-zemin rijitliğine bağlı olarak arttığı da bu karşılaştırmalardan elde edilen bir diğer bulgudur.

C-Eğilme Momenti

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen modellerde elde edilen en büyük eğilme momentinin S1 ve S6 zemin sistemleri için karşılaştırması Şekil 258 ve 259'da sunulmaktadır. Bu şekillerden görüldüğü gibi eğilme momenti, S1 zemin sistemi için analitik modellerden *Model-1*'de en büyük değerine ulaşmaktadır. S6 zemin sistemi için ise en büyük eğilme momentlerini *Model-5* ve *Model-6* verirken diğer bütün modeller biribirine benzer sonuçlar üretmektedir. Sayısal yöntemlerden elde edilen taban kesme kuvvetleri bazı durumlar için karşılaştırmak istendiğinde, eğilme momentleri için gömülmenin olmadığı durumda diğer karşılaştırmalara benzer şekilde *Model-5* ile 6 arasındaki farklılaşmanın azalan temel-zemin rijitliğine bağlı olarak arttığı da bu karşılaştırmalardan elde edilen bir diğer bulgudur.



Şekil 259. S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük eğilme momentleri



Şekil 260. S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda bütün modellerden elde edilen en büyük eğilme momentleri.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Modellerden elde edilen en büyük sıvı salınım yerdeğiştirmesinin S1 ve S6 zemin sistemleri için karşılaştırılması Şekil 260 ve 261'de verilmektedir. *Model-1* ve *Model-2*'de salınım dikkate alınmadığından bu modeller karşılaştırmalarda kullanılmamaktadır. Bu şekillerden görüldüğü gibi en büyük salınım yerdeğiştirmeleri S1 ve S6 zemin sistemlerinde her durumda *Model-7* ve *Model-8* de oluşmaktadır.



Şekil 261. S1 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda modellerden elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri



Şekil 262. S6 zemin sistemi için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumda modellerden elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri

Salınım yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimlerinin verilmesi yöntemler arasındaki farklılıkları ortaya koymak açısından da yararlı olacaktır. Şekil 262'de *Model-3* ve *4* için elde edilen salınım yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri verilmektedir. Buradan *Model 4*'e ait salınım yerdeğiştirmesinin değişiminin, *Model-3*'e göre oldukça farklı olması bu modellerin davranışlarının birbirlerinden uzak olduğunu göstermektedir. *Model-3* için en büyük salınım yerdeğiştirmesi, gömülmenin olmadığı S6 zemin sistemi için 10.15 s'de 1,07 m olarak, *Model-4*'te ise 20,85 s'de 1,81 m olarak gerçekleşmektedir. Diğer zemin sistemleri ve gömülme durumlarına göre yapılan karşılaştırmalarda da bu kadar belirgin olmamakla beraber, benzer sonuçlarla karşılaşılmaktadır



Şekil 263. Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için analitik yöntemlerin salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması

Sayısal modeller salınım yerdeğiştirmesi açısından karşılaştırıldıklarında bundan önce yapılan karşılaştırmalara benzer şekilde, burada da *Model-5* ile 6'nın ve *Model-7* ile 8'in birbirlerine yakın sonuçlar ürettikleri bununla beraber çoğu durumda da çakıştıkları görülmektedir (Şekil 263). Buna karşın en büyük yerdeğişirmelerin gerçekleşme zamanlarının son dört model için sırasıyla 10,20 s'de 1,71 m, 11,85 s'de 1,43 m, 10,25 s'de 2,18 m ve 10,35 s'de 2,42 m olarak belirlenmiş olması etkilerin gerçekleşme zamanlarının da oldukça yakın olduğunu göstermektedir. En büyük tepkilerin şiddetleri açısından bütün modeller karşılaştırıldığında *Model-5* ile *Model-6*'nın ve *Model-7* ile *Model-8'*in yakın değerler verdikleri, ancak bu değerlerin azalan temel-zemin rijitliği ile birbirinden uzaklaşma eğiliminde oldukları görülmektedir



Şekil 264. Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için sayısal yöntemlerin salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması.

Analitik yöntemlerlerle sayısal yöntemler arasındaki karşılaştırmalara örnek olarak Şekil 264'de *Model-4* ile *Model-7*'nin karşılaştırılması verilmektedir. Buradan analitik modellerden *Model-4*'ün belirli bir yaklaşıklıkla sayısal modellere benzer sonuç verdiği gerek zamanla değişim, gerekse de en büyük salınım değerleri açısından bu şekilden görülmektedir.



Şekil 265. Gömülmenin olmadığı S6 türü zemin sistemi için *Model-4* ile *Model-7* salınım yerdeğiştirmesi tepkilerinin zamanla değişimlerinin karşılaştırılması

2.5.2. Zeminin Sistem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi

Bu başlık altında çalışma kapsamında oluşturulan modellerden elde edilen değerler sadece zemin sistemlerine bağlı olarak irdelenmektedir. Bu nedenle burada her model için zemin sistemlerine göre verilen değişimler ve irdelemeler tekrarlanmayarak genel bir değerlendirme yapılmaktadır. Burada ifade edilmesi gereken bir diğer önemli husus ankastre çözümlerden elde edilen bulguların S1 zemin sistemi için elde edilenlerle örtüşmesi sebebiyle karşılaştırmalarda kullanılmamasıdır.

A- Yatay Yerdeğiştirme

Bütün modeller dikkate alınarak gömülme olmadığı (e/r_o) e olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine ve modellere bağlı olarak değişimleri Şekil 265 ve 266' da verilmektedir.

Aşağıdaki grafiklerden de görülebileceği gibi gerek gömülmenin olduğu gerekse de olmadığı durumda *Model-1 ve 2* dışında hemen hemen bütün modellerde azalan zemin rijitliğine bağlı olarak yatay yerdeğiştirmelerde artışlar gerçekleşmektedir. Bu artışlar gömülmenin olmadığı durumda daha belirgin bir şekilde gerçekleşirken, olduğu durumda ise geçişler daha yumuşak olmaktadır. Burada *Model-1 ve 2* için gömülmenin olduğu ve olmadığı durumların her ikisinde de yatay yerdeğiştirmelerin daha az rijiliğe sahip zemin sistemlerinde daha düşük değerler verdikleri görülmektedir. Bu tür bir davranışın zemin sistemi rijitliğine bağlı olarak gerçekleşmesi ancak dikkate alınan sistemlerin biribirinden

çok farklı dinamik karakteristiğe sahip olması ile mümkün olabilmektedir. Bu nedenle modellerin zemine bağlı olarak değişmesi beklenen davranışları yansıtmayacakları grafiklerden tespit edilebilmektedir. Yapılan bu karşılaştırmalardan söylenebilecek bir diğer husus ise, yapıya etkiyen söz konusu kuvvetin deprem olması durumunda, yapıda oluşacak etkilerin zemin sistemi rijitliyle birlikte yapının dinamik karakteristiklerine bağlı olarak deprem hareketine karşı gösterdikleri tepkinin de önemli olduğudur. Örneğin dikkate alınanan sıvı-ayaklı depo-zemin sistemine ait periyotta gerek temel-zemin, gerekse de sıvı sistemleri büyük artışlara neden olarak yapınının maruz kalacağı ivme tepkisinin oldukça azalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenlede azalan zemin rijitliğine bağlı olarak, yapıda oluşan yatay yerdeğiştirmelerin de beklenenden farklı bir şekilde azalabilmeleri teorik olarak mümkün gözükmektedir.



Şekil 266. Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri



Şekil 267. Gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda bütün modeller için yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri

Burada bütün modeller için ayrı ayrı yapılan değerlendirmelerden de görülebileceği gibi, ayaklı deponun davranışını zeminden dolayı ilk üç zemin sisteminde önemli derecede etkilenmemekte, buna karşın son üç zemin sisteminde ise önemli oranlarda etkilenmeler ortaya çıkmaktadır.

B- Taban Kesme Kuvveti

Gömülme oranının (e/r_o) sıfıra ve bire eşit olduğu bütün modeller dikkate alınarak altı zemin sistemi için hesaplanan taban kesme kuvvetlerinin zemin sistemine ve modellere bağlı olarak değişimleri Şekil 267 ve 268'de verilmektedir.



Şekil 268. Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için kesme kuvvetinin zemin sistemine bağlı değişimleri



Şekil 269. Gömülmenin olduğu durumda ($e/r_0=1$) bütün modeller için kesme kuvvetinin zemin sistemine bağlı değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi gerek gömülmenin olduğu gerekse de olmadığı durumda *Model-1* ve *Model-2* dışında hemen hemen bütün modellerde azalan zemin rijitliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerinde artışlar gözlenmektedir. Bu artışlar gömülmenin olmadığı durum için özellikle analitik modellerde daha belirgin gerçekleşirken sayısal modellerde durum böyle değildir. Bu modeller için gerçekleşen artışların zemin sistemine bağlı olarak gömülmenin olmadığı durumda önemli derece değişmediği, olduğu durumda ise analitik modellere nazaran daha az bir değişim gösterdikleri grafiklerden görülmektedir. Yatay yerdeğişitirmedekine benzer şekilde kesme kuvvetleri için de bütün modellerde ilk üç zemin için ayaklı deponun davranışında önemli ölçüde etkilenme olmadığı, son üç zemin sisteminde ise değişimin arttığı tespit edilmektedir.

C- Eğilme Momenti

Çalışma kapsamında eğilme momentleri için elde edilen değişimler kesme kuvvetine benzerlik gösterdiklerinden burada bir karşılaştırmaya gerek duyulmamıştır.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Bütün modeller dikkate alınarak gömülme oranının (e/r_o) sıfıra ve bire eşit olduğu durumlarda altı zemin sistemi için hesaplanan salınım yerdeğiştirmelerinin zemin sistemine ve modellere bağlı olarak değişimleri Şekil 269 ve 270'de verilmektedir.



Şekil 270. Gömülmenin olmadığı durumda ($e/r_0=0$) bütün modeller için salınım yerdeğiştirmesinin zemin sistemine bağlı değişimleri


Şekil 271. Gömülmenin olduğu durumda ($e/r_0=1$) bütün modeller için salınım yerdeğiştirmesinin zemin sistemine bağlı değişimleri

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi sıvı için iki kütleli analitik modellerin kullanıldığı *Model-3*, *Model-5*, ve *Model-6*'dan sıvı salınımının zemin sistemlerindeki değişimlerden önemli ölçüde etkilenmediği görülmektedir. Sıvının sonlu eleman modelinin kullanıldığı ve zeminin de sayısal olarak modellendiği *Model-7* ve *Model-8* için ise zemin sisteminde azalan rijitliğin sıvının salınımına etkisinin kayda değer ölçüde olduğu grafiklerden görülmektedir. Fakat bu durumun daha önceki karşılaştırmalarda olduğu gibi son üç zemin sistemi için daha belirgin olduğu da söylenebilir. Diğer taraftan $e/r_0=1$ olduğu durumda salınım yerdeğiştirmesinin $e/r_0=0$ durumuna göre daha az etkilendiği de belirtilebilir.

2.5.3. Sıvının Sistem Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi

Modellerin genel olarak irdelendiği başlık altında gerçekleştirilen karşılaştırmalarda sıvının salınım etkisinin yapının davranışı üzerinde etkin olduğu görülmüştü. Bu nedenle burada, sıvının iki kütleli analitik modelleri ile (*Model-5* ve 6) sayısal olarak modellendiği (*Model 7* ve 8) durumlar arasındaki bu farkı daha da açık bir şekilde ortaya koymak amaçlanmaktadır. Bu amaçla *Model-8*'de yalnızca sıvının Westergaard kütle ekleme yaklaşımı kullanılarak depo duvarına eklenmek suretiyle modellendiği ve bu sayede salınım etkilerinden tamamen arındırıldığı model kullanılmıştır.

Burada gömülmenin olmadığı S1 ve gömülme için her iki durumun da dikkate alındığı S6 zemin sistemi için salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı sistemlerden elde

edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri Şekil 271~273'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 272. Gömülmenin olmadığı (*e*/*r*₀=0) durumda S1 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı (*Model-8*) ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri

Gömülmenin olmadığı S1 zemin sistemi için yapılan karşılaştırmalardan sıvının gerçekçi bir şekilde dikkate alınmasının sistemde oluşacak yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimindeki farklılıklara ek olarak, sıvının yapı yatay yerdeğiştirmesini ne ölçüde azalttığı da görülmektedir (Şekil 271). Buradan haraketle sıvının dikkate alınmasının yapının yatay yerdeğiştirmesini %29 oranında azalttığı, buna ek olarak yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişiminde de sıvının adeta bir sönümleyici etkisi gösterdiği rahatlıkla tespit edilebilmektedir. Burada dikkate alınması gereken bir diğer husus ise daha önce de belirtildiği gibi yapıda oluşabilecek en büyük ötelenmenin (0,11 m) sıvı salınımın dikkate alınmadığı durumda aşılmasıdır.

S6 türü zemin sistemi için sıvının salınımnın yapı davranışı üzerindeki etkileri dikkate alındığında, S1 zemin sistemine göre tepkilerin şiddeti üzerindeki etkisinin daha az olduğu, buna karşın sistemin davranışının etkilendiği görülmektedir. Gömülmenin olmadığı ve olduğu durumlar karşılaştırıldığında ise sıvının temel-zemin sistemi rijitliğinin artmasına bağlı olarak yatay yerdeğiştirme tepkilerini daha fazla azalttığı, buna ek olarak zemin sistemindeki rijitliğin azalmasıyla sistemi etkileyen en önemli faktörün salınımdan ziyade zemin rijitliği olduğu görülmektedir.



Şekil 273. Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri



Şekil 274. Gömülmenin olduğu $(e/r_0=1)$ durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri

Gömülmenin her iki durumunda S6 zemin sistemi için salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı sistemlerden elde edilen kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri Şekil 274~275'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.



Şekil 275. Gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri



Şekil 276. Gömülmenin olduğu $(e/r_0=1)$ durumda S6 zemin sistemi için, salınımın dikkate alındığı ve alınmadığı çözümlemelerden elde edilen kesme kuvvetlerinin zamanla değişimleri.

Yukarıdaki grafiklerden görüldüğü gibi sıvının dikkate alındığı modellerle alınmadığı modeller arasında kesme kuvvetlerinin değişimleri açısından da yatay yerdeğiştirmeye benzer şekilde önemli farklılıkların ortaya çıkabildiği görülmektedir. Buradan haraketle sıvının davranışını ifade edebilmek için seçilmiş bu karşılaştırmalarda S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı durumda kesme kuvvetinin sıvının etkisine bağlı olarak %11 oranında azalabildiği, gömülmenin olduğu durumda ise bu oranın artarak %21 lere çıkabildiği tesbit edilmektedir. Bu oran gömülmenin olmadığı S1 zemin sistemi için ise %26 lara ulaşmaktadır. Bu durum yine bu başlık altında yatay yerdeğiştirmelere göre yapılan karşılaştırmalarda olduğu gibi, temel-zemin sisteminin rijiliğinin büyük değerler alması halinde sıvının davranışının yapı sistemi üzerinde daha etkili olduğu bulgulardan elde edilen bir diğer neticedir.

2.5.4. Taşıyıcı Sistem Etkilerinin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında dikkate alınan iki farklı taşıyıcı sistemi karşılaştırabilmek maksadıyla çerçeve sistemli depolara ilave olarak silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip ayaklı depo da dikkate alınmaktadır. Bu karşılaştırmalar Şekil 276'da görülen *Model-8* kullanılarak gerçekleştirlmiştir.



Şekil 277. Kabuk taşyıcı sisteme sahip ayaklı deponun sonlu eleman modeli

Kabuk taşıyıcı sisteme sahip bu model için çözümlemeler gömülmenin olduğu ($e/r_{\theta} = 1$) ve olmadığı ($e/r_{\theta} = 0$) durumlarda gerçekleştirilmiştir. Örnek olması için S1, S3 ve S6 zemin sistemlerine ait çözümlemelerden elde edilen en büyük yatay ve salınım yerdeğiştirmeleri ve bunların gerçekleşme zamanları kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistem için karşılaştrımalı olarak Tablo 34'de verilmektedir.

		Ç	erçeve Ta	şıyıcı Siste	m	Kabuk Taşıyıcı Sistem			
	emin	En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s		En büyük yatay yerdeğiştirme, U		En büyük salınım yerdeğiştirmesi, U _s	
	Z(zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (m)	zaman (s)	değer (m)
$e/r_0=0$	S 1	9.45	0.1040	10.10	-1.9642	5.00	0.0176	10.10	-1.7353
	S3	9.50	0.1157	10.15	-2.0182	9.20	0.0392	10.10	-1.7950
	S6	9.80	0.2465	10.35	-2.4179	9.60	0.1873	10.20	-2.3223
$e/r_0=1$	S 1	9.45	0.1025	10.10	-1.9589	5.00	0.0165	10.05	-1.7279
	S3	9.45	0.1096	10.10	-1.9925	9.10	0.0223	10.05	-1.7527
	<u>S</u> 6	9.70	0.1771	10.25	-2.3071	9.35	0.0908	10.15	-1.9772

Tablo 34.Farklı taşıyıcı sistemler için gömülmenin olmadığı ve olduğu durumlarda elde
edilen en büyük yerdeğiştirme değerleriyle bunların gerçekleşme zamanları

Kabuk taşıyıcı sisteme sahip depo için elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirme değerleri, gömülme durumuna ve zemin sistemlerine (S1, S3, S6) bağlı olarak çerçeve sistem değerleriyle karşılaştırmalı olarak Şekil 277'de verilmektedir. Benzer kaşılaştırma işlemi salınım yerdeğiştirmeleri için ise Şekil 278'de sunulmaktadır.



Şekil 278. Farklı taşıyıcı sistemlerde üç farklı zemin sistemi için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ ve olduğu $(e/r_o=1)$ durumlarda elde edilen en büyük yatay yerdeğiştirmeler



Şekil 279. Farklı taşıyıcı sistemlerde üç farklı zemin sistemi için gömülmenin olmadığı $(e/r_o=0)$ ve olduğu $(e/r_o=1)$ durumlarda elde edilen en büyük salınım yerdeğiştirmeleri

Yukarıdaki her iki şekilden de görülebileceği gibi iki taşıyıcı sistem için en büyük yerdeğiştirmeler S6 zemin sisteminde gerçekleşmek te olup artan zemin riitliğine bağlı olarak yerdeğiştirmelerde bir azalış görünmektedir. Bu azalmanın kabuk taşıyıcı sistemde diğer taşıyıcı sisteme göre yatay yerdeğiştirmenin karşılaştırılmasında daha belirgin, salınım yerdeğiştirmesi için ise daha az belirgin olduğu Şekil 277 ve 278'den görülmektedir. Keza salınım yerdeğiştirmesi seçilen taşıyıcı sistemlere bağlı olarak gömülmenin olduğu durumda 0,33 m, olmadığı durumda ise 0,10 m azalmaktadır. Bu durum oransal olarak incelendiğinde ise salınım yerdeğiştirmesinin en büyüğüne göre %14 azalabildiğini göstermektedir.

Kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri gömülmenin olmadığı ve olduğu durumda S1, S3 ve S6 zemin sistemleri için Şekil 279~281'de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 280. S1 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri



Şekil 281. S3 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri



Şekil 282. S6 zemin sisteminde $(e/r_0=0)$ ve $(e/r_0=1)$ durumlarında kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistemler için yatay yerdeğiştirmenin depo yüksekliği boyunca değişimleri

Kabuk ve çerçeve taşıyıcı sistem için elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin yüksekliğe bağlı değişimlerinden de görülebileceği gibi kabuk taşıyıcı sistem konsol davranışı sergilemektedir. Buraya kadar yapılan karşılaştırmalara benzer şekilde yüksek rijitliğe sahip S1 türü zemin sistemi için kabuk taşıyıcı sistemde elde edilen yerdeğiştirmelerin gömülmeye bağlı olarak değişmediği söylenebilir. Buna karşın zemin rijitliğindeki azalmalara bağlı olarak kabuk taşıyıcı sistem için elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin azaldığı yukarıdaki grafiklerden tespit edilebilen bir diğer husustur. Elde edilen yerdeğiştirmelerin en fazla S6 zemin sistemi için gömülmeye bağlı olarak %52 oranında azalabildiği, bu oranın diğer zemin sistemleri için ise sırasıyla %43 (S3) ve %6 (S1) olarak gerçekleştiği tespit edilmektedir.

Taşıyıcı sistem açısından meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimleri farklılıklar görülemktedir. Çerçeve taşıyıcı sistemde hazne seviyesinde meydana gelen yerdeğişitirmelerin kabuk sistemden farklı olarak taşıyıcıdan bağımsız bir hareket sergiledikleri görülmektedir. Burada dikkate alınan sistemler karşılaştırıldığında S1 türü zemin sisteminde yatay yerdeğiştirme gömülme olmadığı durumda %82, olduğu durumda ise %84 oranlarında azaldıkları tespit edilmiştir. Benzer durum S6 zemin sistemi için incelendiğinde ise bu oranların sırasıyla %25 ve %48 oldukları görülmüştür. Yapılan çözümlemelerden rijitliğin azalmasına bağlı olarak taşıyıcı sistemin gömülme durumunda daha etkin, gömülmenin olmadığı durumda ise bu denli etkin olmadığı görülmektedir.

Burada ifade edilmesi gereken bir diğer husus, kabuk taşıyıcı sistemi için en büyük göreli ötelenmenin Türk Deprem Yönetmeliğine göre ($\Delta_{imax}/h \le 0, 0035$) şartını sağlaması gerektiğidir. Bu durumda taşıyıcı sistemi kabuk olanların çerçeve olanlara göre bir üstünlüklerinden bahsedilebilir. Depo için en büyük göreli ötelenmenin S6 zemin sistemi haricindeki bütün durumlarda yeterli rijitlik şartını sağlaması (<0,114 m) dikkat çekicidir. Bu durum çerçeve sistem için değerlendirildiğinde ise birçok sistemin bu koşulu sağlamadıkları daha önce de ifade edilmişti.

2.5.5. Doğrusal Olmayan Davranış Etkilerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada daha önce gerçekleştirilen bütün çözümlemelerde zeminin doğrusal bir davranış gösterdiği kabul edilmişti. Tez kapsamında zeminin doğrusal olmayan davranışının dikkate alınmasının, depoların dinamik davranışlarına etkilerini incelemek amacıyla da çözümlemeler gerçekleştirilmektedir. Sözkonusu çözümlemeler için çalışma kapsamında oluşturulan *Model-8* seçilmiştir. Çözümlemelerde kullanılarak zemin için dikkate alınan elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı için Bardet (1997), Coduto (2000) ve Goodman (2003) referanslarında önerilen değerler dikkate alınmıştır (Tablo 35). Zemininin bu doğrusal olmayan davranışını dikkate almak için literatürde önerilen Drucker-Prager yaklaşımından (Chen ve Mizuno, 1990) faydalanılmıştır. Burada zemin için Tablo 35'de verilen kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısının (ϕ) zemine ait çeşitli değişkenlere bağlı olarak çok geniş bir aralıkta değişebildiği, dolayısıyla da ifade edilen değerlerin aynı zemin sistemleri için farklı değerler alabileceğini vurgulamak uygun olmaktadır.

Tablo 35. Zemin sistemleri için dikkate alınan elastisite modulü (*E*), Poisson oranı (v), birim ağırlığı (γ), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açıları (ϕ)

	E (kPa)	υ	$\gamma(kN/m^3)$	c (kPa)	ϕ
S1	7000000	0,30	20	1750	40,0
S2	2000000	0,30	20	1250	37,5
S3	500000	0,35	19	750	35,0
S4	150000	0,35	19	250	32,5
S5	75000	0,40	18	150	30,0
S 6	35000	0,40	18	100	25,0

Zeminin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınarak altı zemin sistemi için gömülme oranının sıfır ve bir olduğu durumlarda yapısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirme, kesme kuvveti, eğilme momenti ve salınım yerdeğiştirmesi değerleri doğrusal davranış durumuna göre elde edilenlerle karşılaştırılmalı olarak aşağıda sunulmaktadır.

A- Yatay Yerdeğiştirme

Zeminin doğrusal olmayan ve doğrusal olan davranışının dikkate alındığı durumlarda elde edilen yatay yerdeğiştirmeler farklı zemin sistemlerine bağlı olarak gömülmenin olmadığı durum da Şekil 282'de, olduğu durum için ise 283'de verilmektedir.



Şekil 283. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri



Şekil 284. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin zemin sistemine bağlı değişimleri

Bu şekillerden de görüldüğü gibi doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasının ilk dört zemin sistemi için depoda yatay yerdeğiştirmeler açısından herhangi bir değişime neden olmadıkları tespit edilmiştir. S5 ve S6 zemin sistemleri için ise sözkonusu yatay yerdeğiştirmelerin, plastik şekildeğiştirmelerin oluşmasına bağlı olarak, arttığı görülmüştür. Bir başka ifadeyle dikkate alınan zeminin mekanik özeliklerine bağlı olarak ilk dört zemin sistemi, yükleme etkisinde doğrusal davranmış, diğer iki zemin sistemi (S5,S6) ise doğrusal davranıştan uzaklaşmıştır.

S5 ve S6 zemin sistemleri dikkate alınarak gerçekleştirilen çözümlemelerden elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin depo yüksekliği boyunca değişimleri S5 için Şekil 284'de, S6 için ise Şekil 285'de verilmektedir. Şekillerde sunulan yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında gömülmenin olduğu durumda S5 zemin sistemi için doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasının, 32.5 m seviyesindeki yatay yerdeğiştirmenin % 8,5 artımına neden olduğu, bu oranın gömülmenin olduğu durumda ise 21 m seviyesinde sadece %1,2 olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum S6 zemin sistemi için irdelendiğinde ise sözkonusu artış, gömülmenin olmadığı durumda %4 olarak , olduğu durumda ise % 2,4 olarak gerçekleşmektedir. Buna göre gömülmenin olduğu durumda zeminin doğrusal olmayan davranışının etkisinin tez kapsamında dikkate alınan zemin sistemleri için ihmal edilebilecek düzeyde kaldığı söylenebilir.



Şekil 285. S5 zemin sistemi için doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı durumlarda yatay yerdeğiştirmenin ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimleri



Şekil 286. S6 zemin sistemi için doğrusal ve doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı durumlarda yatay yerdeğiştirmenin ayaklı depo yüksekliği boyunca değişimleri

B- Taban Kesme Kuvveti

Çalışma kapsamında farklı zemin sistemleri için doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlar dikkate alınarak gerçekleştirilen çözümlemelerden elde edilen kesme kuvvetleri, gömülmenin olmadığı durum için Şekil 285'de, olduğu durum için ise Şekil 286'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 287. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen kesme kuvvetlerinin zemin sistemine bağlı değişimleri



Şekil 288. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda elde edilen kesme kuvvetlerinin zemin sistemine bağlı değişimleri

Şekillerden görüldüğü ve yatay yerdeğiştirmeler için daha önce de ifade edildiği gibi kesme kuvvetleri için de ilk dört zemin sisteminde doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması, doğrusal duruma göre herhangi bir farklılığa yol açmamıştır. Ancak S5 ve S6 zemin sistemleri için doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olmaktadır. Azalmanın değeri gömülmenin olmadığı durumda S5 zemin sistemi için % 8, S6 zemin sistemi için ise %24 olarak gerçekleşmektedir. Gömülmenin olduğu durumda ise bu oran, S5 zemin sistemi için % 2,3 S6 zemin sistemi için ise %4 olarak gerçekleşmiştir. Gömülmenin artmasıyla kesme kuvveti üzerindeki değişimin doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasından daha az etkilendiğini ve burada dikkate alınan zemin sistemlerinde ise bunun göz ardı edilebilecek mertebede olduğu görülmektedir.

C- Eğilme Momenti

Ayaklı depo taşıyıcı sistemlerinde doğrusal davranışın dikkate alındığı durumlarda olduğu gibi, doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması da en büyük eğilme momentinin gerçekleştiği elemanın değişmesine neden olmamaktadır. Yapılan çözümlemer sonucunda eğilme momentleri için elde edilen değişimlerin kesme kuvveti değişimlerine benzerlik gösterdiklerinden bunlar için grafikleri vermeye gerek duyulmamıştır.

D-Salınım Yerdeğiştirmesi

Bu çalışmada doğrusal olan ve olmayan zemin davranışı dikkate alarak gerçekleştirilen çözümlemelerden elde edilen salınım yerdeğiştirmeleri farklı zemin

sistemlerine bağlı olarak Şekil 288 ve 289'da verilmektedir. Şekil 288'de gömülmenin olmadığı durum, Şekil 289'da ise gömülmenin olduğu durumdaki sonuçlar görülmektedir.



Şekil 289. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olmadığı ($e/r_0=0$) durumda elde edilen salınım yerdeğiştirmelerinin zemin sistemine bağlı değişimleri



Şekil 290. Doğrusal olmayan ve olan davranışın dikkate alındığı çözümlemelerden, gömülmenin olduğu ($e/r_0=1$) durumda elde edilen salınım yerdeğiştirmelerinin zemin sistemine bağlı değişimleri

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi salınım yerdeğiştirmesi değişimleri arasındaki farklılıklar, kesme kuvveti ve yatay yerdeğiştirmede oluşan farklılıklar kadar belirgin değildir. Bu şekillerden de anlaşılabileceği gibi, zemin için doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasının salınım yerdeğiştirmesinin S6 zemin sistemi için gömülmenin olmadığı durumda % 4,5, olduğu durumda ise %3 oranında azalmasına neden olmaktadır. S5 zemin sistemi için işe her iki durumda da salınım yerdeğiştirmesinin yaklaşık olarak değişmediği kabul edilebilir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilmiş olan bu çalışmanın tümünden çıkartılabilecek bazı sonuç ve öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Ayaklı depo sistemi için yapı-temel/zemin etkileşiminin dikkate alınması, yapının davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Söz konusu etkilenme yerdeğiştirmeler açısından değerlendirildiğinde en fazla depo yatay yerdeğiştirmesinde, en az ise sıvıdaki salınım yerdeğiştirmesinde gerçekleşmektedir.
- 2. Zemin sisteminde rijitliğin azalmasına bağlı olarak tepkinin maksimum değerlerinde önemli farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar çalışmada dikkate alınan S3'den daha küçük rijitliğe sahip zemin sistemlerinde bariz bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan çok farklı rijitlik değerlerine sahip zemin sistemleri için de birbirine oldukça yakın tepki değerleri elde edilebilmektedir. Bu nedenle sadece tepkilerin en büyük değerlerinin karşılaştırılmasının, depo davranışının yorumlanması açısından yeterli olmayacağı söylenebilir. Dolayısıyla deponun depremde gerçek davrnışını belirleyebilmek için, tepkinin zamanla değişiminin de dikkate alınmasında yarar bulunmaktadır.
- 3. Zemin sistemine bağlı olarak elde edilen iç kuvvet tepkileri değerlendirildiğinde, bu tepkiler azalan zemin rijitliği ile mutlaka azalma şeklinde ortaya çıkmamaktadır. Dolayısıyla da zemin rijitliği azaldıkça iç kuvvetlerin mutlaka azalacağı şeklinde bir yaklaşım ortaya koyan tasarım spektrumuyla çözümleme yanıltıcı sonuçlar üretebilmektedir.
- 4. Temel sistemindeki gömülmenin yapı davranışları üzerindeki etkileri incelendiğinde, bunun zemin sisteminin rijit olduğu durumlarda önemli bir etkiye sahip olmadığı, zeminin rijitliğinin azalmasına bağlı olarak etkisinin arttığı görülmüştür. Sözkonusu gömülme oranı iç kuvvetleri de etkilemekle birlikte en fazla yatay yerdeğiştirme üzerinde etkili olmaktadır.

- 5. Yapı-sıvı etkileşimi de zemin etkileşiminde olduğu gibi ayaklı deponun dinamik davranışını etkilemektedir. Ancak sıvı etkileşimi ayaklı depo sisteminin davranışını zemin etkileşiminin tersine bir şekilde rijit zeminlerde daha fazla etkilemekte, azalan temel/zemin rijitliği ile etkisi azalmaktadır. Diğer taraftan söz konusu etkileşim, temel sistemi için gömülü durumda, gömülü olmadığı duruma göre daha fazla etkili olmaktadır.
- 6. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan ilk üç zemin sisteminin yapının davranışını önemli ölçüde etkilemediği, diğer zemin sistemlerinin ise yapı davranışında kayda değer değişikliklere sebep olduğu görülmektedir. Bu nedenle çalışmaya konu olan depolar için, Türk Deprem Yönetmeliğinde tanımlanan Z1 ve Z2 türü zemin sistemlerinde yapı zemin etkileşiminin dikkate alınmayabileceği, Z3 ve Z4 türü zemin sistemleri için ise zemin etkileşiminin dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.
- 7. Sıvı etkileşiminin dikkate alınması yapıda sönümleyici etki oluşturarak yatay yerdeğiştirmeleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu etkileşim aynı oranda olmasa da iç kuvvetlerin de azalmasına neden olmaktadır. Ancak salınımın sönümleyici etkisinin sayısal modellerde meydana geldiği ölçüde iki kütleli yaklaşımda ortaya çıkmaması, gerek yatay yerdeğiştirmelerdeki gerekse de iç kuvvetlerdeki değerlerin daha büyük olarak belirlenmesi sonucunu ortaya koymaktadır.
- 8. Gerek sıvı gerekse de zemin etkileşiminin dikkate alınmasının yapı sisteminin periyodunu uzattığı, ayrıca zeminin dikkate alınmasının sistemin davranışındaki baskın karakterli hareketleri değiştirebildiği görülmektedir. Bu durum çalışma kapsamında gerçekleştirilen modal analiz çözümlemelerinde sisteme ait modların sıralarının, zemin sistemindeki rijitlik azalmalarına bağlı olarak değişmesiyle de görülmüştür.
- 9. Model-1 için yatay yerdeğiştirmelerde zemin sisteminin rijitliğinin azalmasına bağlı olarak, diğer modellerden farklı bir şekilde, herhangi bir azalma

gerçekleşmemiştir. Dolayısıyla bu durum, modelin sıvı-yapı-zemin etkileşimini dikkate almada yeterli olmadığını göstermektedir.

- 10. Model-1 ve 2'de sıvı için yürürlükteki bazı yönetmeliklerde tek kütleli model önerilmektedir. Çalışma kapsamında bu yaklaşımın dikkate alındığı Model 1 ve 2 için aşırı iç kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla sıvı için ayaklı depolarda tek kütleli yaklaşımın kullanılmasının ekonomik açıdan uygun olmayacağı söylenebilir. Diğer taraftan sıvı için tek kütleli modelin kullanılması deponun sıvı etkileşiminin yanında zemin etkileşiminin de gerçekçi bir şekilde dikkate alınmasını engellemektedir.
- 11. Model 2 ve 4 gibi frekans bağımlı yaklaşımların kullanıldığı modellerde rijit temel zemin sistemleri için yöntemin aşırı radyasyonel sönüm üretmesi nedeniyle, yerdeğiştirme ve iç kuvvet tepkilerinde azalmalar görülmektedir. Bu durumun temel zemin sistemindeki rijitliklerin azalmasına bağlı olarak ortadan kalktığı ve modelin etkileşimi daha gerçekçi bir şekilde yansıttığı tespit edilmiştir.
- 12. FEMA tarafından önerilen değiştirme yönteminin kullanıldığı durumlarda temelzemin rijitliğindeki önemli azalmalar sebebiyle yapı davranışlarında sayısal ve frekans bağımlı analitik modellere göre farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir. Buradan hareketle temel-zemin rijitliğinin düşük olduğu sistemlerde FEMA tarafından önerilen ötelenme ve dönme rijitliklerinde önemli ölçüde azalmalar gerçekleştiği söylenebilir. Nitekim Model 5 te kullanılan FEMA yöntemindeki aşırı rijitlik azalmasına bağlı olarak büyük yerdeğiştirmeler ortaya çıkmıştır. Bu durum emniyet açısından olumlu olarak karşılanabilir. Ancak bu durumda gerçekten daha küçük iç kuvvet değerlerinin elde edilebileceği hususunın da göz ardı edilmemesi gerekmektedir.
- 13. Yükseklik boyunca yatay yerdeğiştirmelerin değişimi sayısal modellerle incelendiğinde, sistemde azalan zemin rijitliği ile önemli etkilerin oluştuğu ve hazne seviyesindeki yerdeğiştirmelerin ayak taşıyıcı sistemdeki yerdeğiştirmeleri de aşarak kritik bir seviyeye ulaşabildikleri görülmektedir. Bu davranış çerçeve

taşıyıcı sisteme sahip bütün modellerde karşılaşılan bir olay olmakla birlikte, Model 7 ve 8 için genel olarak temel zemin rijitliğindeki önemli derecedeki azalmalara bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Benzer etkilerin kabuk taşıyıcı sistem için nadiren görülmemesi bu sistem için bir üstünlüktür. Burada bu tür etkilerin yapıda ikinci mertebe etkilerinin oluşmasına ve stabilitenin bozulmasına da neden olabileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

- 14. Temel-zemin sisteminin eylemsizliğini dikkate alarak gerçekleştirilen kütlesiz temel yaklaşımının kullanıldığı *Model-7* ile *Model-8* arasında temel seviyesine göre göreli yerdeğiştirmelerin hemen her durumda örtüştükleri ve iç kuvvetler için yeterli derecede birbirine yakın sonuçlar ürettikleri görülmüştür. Dolayısıyla dikkate alınan şekliyle kütlesiz temel yaklaşımının bu çalışmadaki zemin sistemleri için yeterli duyarlılıkta sonuç verebildiği söylenebilir.
- 15. İncelenen zemin sistemleri için zemin rijitliği azaldıkça zeminin bir kısım kütlesi de ek bir ötelenmenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu davranış sıkışmaz zemin kabulüyle zeminin bir kısmının yapıyla birlikte hareket ettiği varsayımı kullanan Model 4'de de dikkate alınmaktadır. Buna ek olarak zemin sistemi için frekans bağımlı rijitlik ve radyasyonel sönümlerin de dikkate alınıyor olması Model 4 ile 8 arasındaki sonuçların birbirine yakın elde edilmesini sağlamaktadır. Söz konusu tabandaki ötelenmelerin sayısal modellerde salınımı artırıcı yönde etkilediği, aynı etkilerin analitik modelde bu denli ortaya çıkmadığı görülmektedir.
- 16. Tasarım açsından düşünüldüğünde yatay ötelenmelerin (Δ_{imax} ≤ 0.114 m) şartını sağlaması gerekmektedir. Sıvı ve zemin etkileşimlerinin dikkate alınmadığı kabaca yapılan hesaplarda çerçeve sistemli ayaklı depolar için bu sınır kolaylıkla aşılabilmektedir. Ancak aşılan ötelenme değerinin sınır değere yakın olması durumunda sıvı ve zemin etkileşimlerini dikkate alarak gerçekleştirilen çözümlemeler sonucunda bu sınırın aşılmadığı durumlarla da karşılaşılmaktadır. Dolayısıyla depoların yatay ötelenmelerinin aşılıp aşılmadığına karar verilirken etkileşimlerini gerçekçi olarak dikkate alınması son derece önemli olmaktadır.

Çalışma kapsamında dikkate alınan kabuk taşıyıcı sisteme sahip ayaklı depolar için gerçekleştirilen çözümlemeler sonucunda sadece S6 zemin sistemi için söz konusu sınır aşılmıştır. Dolayısıyla da yatay yerdeğiştirmeler açısından silindirik kabuk taşıyıcı sisteme sahip depolar çerçeve sistemli depolara göre daha üstün durumdadır. Ancak bu tür sistemlerin yüksek rijitliğe sahip zemin sistemleri için, kabuk taşıyıcı sistem ve çerçeve taşıyıcı sistem arasında bir tercih yapabilmek için ekonomik açıdan değerlendirmekte yarar bulunmaktadır.

- 17. Zeminin doğrusal olmayan davranışın dikkate alınması, çalışmada kapsamındaki yükleme durumunda, ilk dört zemin sistemi için depo dinamik davranışı üzerinde etkili olmamıştır. Ancak son iki zemin sistemi (S5 ve S6) için ise zeminde meydana gelen plastik şekildeğiştirmelere bağlı söz konusu davranış da değişikler ortaya çıkmıştır. Bu davranış yerdeğiştirme tepkilerinde artışa, iç kuvvet değerlerinde ise azalma şeklinde ortaya çıkmıştır.
- 18. Azalan zemin rijitliğine bağlı olarak Model-7 ve 8 arasındaki farklılıkların artıp artmayacağını dolayısıyla kütlesiz temel yaklaşımının etkinliğini belirleyebilmek için, bu çalışma kapsamında olmayan daha düşük rijitlikteki zemin sistemleri için de benzer çözümlemelerin gerçekleştirilmesinde yarar bulunmaktadır.
- 19. Farklı temel sistemleri ve gömülme oranları dikkate alınarak bu tür yapı sistemleri üzerinde gömülme oranlarının etkisi daha ayrıntılı olarak araştırılabilir.
- 20. Ayaklı depo sisteminin özelliği nedeniyle bazı durumlarda stabilite probleminin ortaya çıkabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle P-∆ etkilerinin hesaba katılması gerekliliği ortaya çıkabilir. Buna ek olarak sıvının geometrik olarak doğrusal olmayan davranış gerek bu davranış gerekse de yapı sisteminin diğer davranışı üzerinde ne ölçüde etkili olduğu incelenebilir.
- 21. Bu çalışmada, zeminin doğrusal olmayan davranışın ilk dört zemin sistemi için depo dinamik davranışı üzerinde etkili olmaması, farklı deprem kayıtları için de böyle gerçekleşeceği anlamı taşımamaktadır. Dolayısıyla farklı yüklemeler ve

farklı mekanik özellikler için de doğrusal olmayan davranışın incelendiği benzer çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- 22. Farklı depremlerde ve farklı zemin ortamlarında alınmış kayıtlara göre de çözümler, çalışma kapsamı oldukça artacağından, burada gerçekleştirilmemiştir. Bunların gerçekleştirilmesi sonuçların genellenmesi açısından bu konuya katkıda bulanacaktır. Bunun için çalışmada oluşturulan modeller kullanılarak farklı kayıtlar için de çözümlemeler gerçekleştirilip sonuçlar daha da genelleştirilebilir.
- 23. Depoların deprem hesabına ilişkin henüz bir Türk standardı bulunmaktadır, burada sunulan Model-4 ayaklı depoların sıvı-yapı-zemin etkileşimlerini de dikkate alarak deprem hesabının yapılması için önerilebilir.

4. KAYNAKLAR

- ABYYHY, 1998. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İMO İzmir Şubesi Yayını, No:25.
- Abramson, N.N., The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers Report No:NASA-SP-106, 1966.
- AEDCHP, 1981. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Draft of Anti-Earthquake Design Code for High Pressure Manufacturing Facilities.
- ACI 371R-98, 1998. American Concrete Institute (ACI), Guide to the Analysis Design and Construction of Concrete-Pedestal Water Tower, MCP-2002.
- ACI 350.3-01, 2001. Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures (ACI 350.3-01) and Commentary (350.3R-01), MCP-2002.
- Akköse, M., 2003. Langrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Allen, L.R., Hutchinson, G.L., Stevens, L.K., 1990. Buckling considerations in the design of elevated steel water tanks, <u>Thin-Walled Structures</u>, v.9, No: 1-4, Special Volume, 389-406.
- Ambrosini, R.D., Riera, J.D., Danesi, R.F., 2000. On The Influence Of Foundation Flexibility On The Seismic Response Of Structures, <u>Computers and Geotechnics</u>, v.27 179-197.
- Anrade, W.P., 1999. Implementation of Second Order Absorbing Boundary Condition in Fruquency Domain Computations, PhD Thesis, The University of Texas of Austin, Texas.
- ANSYS, 1994. Theory Manuel; Edited by Peter Kohnke, Twelfth Edition . SAS IP, Inc, 1266.
- Apsel, R.J., Luco, J.E., 1987. Impedance Functions for Foundations Embedded in a Layered Medium: An Integral Equation Approach, <u>Earthquake Engineering &</u> <u>Structural Dynamic</u>, v.15, 213-231.
- Arros, J., Sogabe, K., 1984. Behavior of Liquid Storage Tanks Under Earthquake Loading, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v.8, 385-388, San Francisco.

- Aslam, M., Godden, W.G., 1979. Earthquake Sloshing in Annular and Cylindrical Tanks, Journal of Engineering Mechanics Division, 105, 371-379.
- Asthana, A., Sridhar, P, 1997. Earthquake Analysis of Elevated Water Tanks Using SESAM, 4th International Conference on civil Engineering, 449-457.
- Aviles, J., Perez-Rocha, E.L., 1998. Effect of Foundation Embedment During Building-Soil Structure Interaction, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, 27: 1523–1540.
- Aviles, J., Suarez, M., 2002. Effective Periods and Damping of Building-Foundation Systems Including Seismic Wave Effects, <u>Engineering Structures</u>, 24, 553-562.
- Aydınoğlu, N,M., 1977. Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, Doçentlik Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aytekin, M., 2000. Deneysel Zemin Mekaniği, Akademi Yayınevi, 264s.
- Bardet, P.J., 1997. Experimental Soil Mechanics, Prentice Hall, Upper Saddle River New Jersey 07458, ISBN: 0-13-374935-5, 583s.
- Barnes, E.G., 2000. Soil Mechanics: Principles and Practices, Second Edition, Macmillan Press Ltd, 493 s.
- Bathe, J.K, 1996. Finite Element Procedures, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1050 s.
- Baysal, H, Nash, A.W., 1984. Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3 223-229, San Francisco.
- Bauer, H.F., 1964. Fluid Oscillations in The Containers of a Space Vehicle and Their Influence upon Stability, Report NASA TR R-187.
- Bauer, H.F., Siekmann, J., 1971. Dynamic Interaction of a Liquid with the Elastic Structure of Circular Cylindrical Container, <u>Ingenieur Archiv</u> 49, 8 266-280.
- Bauer, H.F., 1972. On the Destabilizing Effect of Liquids in Various Vehicles (Part 1), <u>Vehicles System Dynamics</u>, 1, 227-260,
- Bauer, H.F., Eidel, W., 1987. Non-linear Hydroelastic Vibrations in Rectangular Containers, Institut für Raumfahrttechnik, Forschungsbericht: LRT-WE-9-FB-7.

- Bauer, H.F., 1992. Coupled Frequencies of A Liquid in Circular Cylindirical Container with Elastic Liquid Surface Cover, Report No:LRT-WE-9-FB-9, Universitat Der Bundeswehr Munchen.
- Bhattacharya, K., Dutta, S.C., 2004. Assessing Lateral Period of Building Frames Incorporating Soil-Flexibility, Journal of Sound and Vibration, 269, 795–821..
- Bhattacharya, K., Dutta, S.C., Dasgupta, S., 2004. Effect of Soil-Flexibility on Dynamic Behaviour of Building Frames on Raft Foundation, <u>Journal of Sound and Vibration</u> V.274, Issues 1-2, 111-135.
- Bielak, J., 1971. Earthquake Response of Building-Structure Systems, PhD. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Bielak, J., 1977. Modal Analysis for Building-Soil Interaction, <u>Journal of The Engineering</u> <u>Mechanics Division</u>, Vol.102, No:EM5, 771-786.
- Bolt, A.B., Naeim, F (ed.)., 2001. Chapter 1: The Nature Of Earthquake Ground Motion: The Seismic Design Handbook, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, .
- Borton, C.D., Parker, V.J., 1987. Finite Element Analysis of The Seismic Response of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, vol. 15, 299-322.
- Borja, I.R., Chao, Y.H., Monta, J.F., Lin, H.C., 1999. SSI Effects on Ground Motion at Lotung LSST Site, <u>Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering</u>, Vol. 125, 760-770.
- Celep, Z., Güler, K., 1990. Harmonic and Seismic Response of a Plate-Column Systems on a Tensionless Foundation, The 9th World Conference on Earthquake Engineering, vol. III, 13-22, Moscow.
- Celep, Z., Kumbasar, N., 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul, 596 s..
- Celayır, Y., Karaton, M., 2004, Kemer Barajların Drucker-Prager Yaklaşımı Kullanılarak Lineer Olmayan Dinamik Analizi, <u>İMO Teknik Dergi</u>, 3085-3103, Yazı 207.
- Chandrasekaran, A.R., Krishna, J.,1954. Water Towers in Seismic Zones, Proceedings of the Third World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, :IV, 161-171.
- Chatterjee-Basu, B., 2001. Nan-Stationary Seismic Response of Tanks with Soil Structure Interaction by Wavelets, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, 30,1419-1437.

- Chao, Y.H., 1996. Nonlinear Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis and Application to Lotung Problem, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Chen, C.P., Barber, R.B., 1976. Seismic Design of Liquid Storage Tanks on Earthquakes, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, St. Louis Missouri v.II 1231-1247.
- Chen, W.F., Mizuno, E., 1990. Nonlinear Analysis of Soil Mechanics, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 661 s.
- Cho, K.H., Kim, K.M., Lim, Y.M., Cho, S.Y., Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Considering Fluid–Structure–Soil Interaction in Time Domain, <u>Soil</u> <u>Dynamics and Earthquake Engineering</u>, v.24 839-852, 2004.
- Chopra, K.A., 2000. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall International Inc, 844 s.
- Chuanromance, O., 1995 The influence of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Structures with High Damping, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Michigan.
- Clough, R Penzien, J.,. Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07-011394-7, 1993.
- Coduto, P.D., 2001. Foundation Design: Principles and Practices, Second Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 883 s.
- Çakıroğlu, A., Özer, E., 1980. Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler I, Matbaa Teknisyenler Basımevi, İstanbul, 215s.
- Çakıroğlu, E., 2001. Zemine Kısmen Gömülü Ağır Yapıların Geçirgen Sınırlar Kullanılarak İki Boyutu Lineer Olmayan Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Ünivesitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Celebi, M., 1998. Turkish Earthquakes: Two Reports. Lessons from the Adana-Ceyhan Quake and the Dinar Aftershock EERI Newsletter 32(9), 8.
- Dias., W.P.S., Hattiarachchi., M.T.P., 1992. A cost Comparison Of Elevated Water Tank Forms, <u>Indian Concrete Journal</u>, 43-50.
- Dieterman, H.A. 1986. An Analytically Derived Lumped Impedance Model for Dynamic Behavior of a Water Tower, <u>Ingenieur Archiv</u>, Cilt: 56, 265-280.

- Dieterman, H.A., 1988. Dynamics of Tower, Liquid-Structure-Foundation Interaction, PhD. Thesis, TU Delft, Netherlands.
- Dieterman, H.A, 1993. Liquid-Structure Foundation Interaction of Slender Water Towers, Archive of Applied Mechanics, v: 63,, No: 3, 176-188.
- Dobry, R., Gazetas, G., 1984. Dynamic Response of Arbitrary Shaped Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, v.112, No:2, 109-135.
- Doğangün, A., 1989. Betonarme Sıvı Depoları ve Projelendirme İlkeleri, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Doğangün, A., 1995. Dikdörtgen Kesitli Su Depolarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Depo-Sıvı-Zemin Etkileşimini Dikkate Alarak Analitik Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Doktora .Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Dogangün, A., Durmus, A., Ayvaz, Y., 1996. Finite Element Analysis of Seismic Response of Rectangular Tanks Using Added Mass and Lagrangian Approach, Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering Computer Applications Research and Practice, Bahrain, I; 371-379. April 6-8.
- Doğangün, A., Durmuş, A., Ayvaz, Y., 1997. Earthquake Analysis of Flexible Rectangular Tanks Using the Lagrangian Fluid Finite Element, <u>European Journal of Mechanicsand Solids</u>, 16, 1,165 -182.
- Doğangün, A., Ayvaz, Y., Durmuş, A., 1997. Earthquake Analysis of Water Towers, 4th International Conference on Civil Engineering, May 4-6.
- Doğangün, A., Livaoğlu, R., 2004. Hydrodynamic Pressures Acting on The Walls of Rectangular Fluid Containers, <u>Structural Engineering and Mechanics</u>. An International Journal, vol.17, No. 2, 203-214.
- Donea, J., Giuliani, S., Halleux, J.P., 1982. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Transient Dynamic Fluid-Structure Interaction, <u>Computer</u> <u>Methods in Applied Mechanics and Engineering</u>, 33: 689-723.
- Dotson, W.K., Veletsos, S.A., 1987. Vertical And Torsional Impedances For Radially Inhomogeneous Viscoelastic Soil Layers, National Center For Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-87-0024.
- Duan, X., 1999. A Soil Structure-Interaction Analysis of Tall Buildings, PhD Dissertation, Faculty of the Graduate School, University of Southern California.
- Dumanoğlu, A.A., 1978. Ağır Yapıların Dinamik Hesabı, Doçentlik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.

- Dumanoğlu, A.A., 1979. Yansıtmayan Viskoz ve Geçrigen Sınırları Ağır Yapıların Dinamik Analize Uygulanışı, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 7 16-27.
- Duran, F.C., Miyajima, M., 2001. Lifelines and Critical Facilities: Earthquake Report of The January 13, 2001 Off the Coast of El Salvador Earthquake, Japan Society of Civil Engineering, 89-100.
- Durmuş, A., Doğangün, A., 1992. Türkiye'de İnşa Edilen Betonarme Ayaklı Su Depolarının Deprem Emniyeti, <u>Prefabrik Birliği Yayın Organı</u>, sayı:22, sayfa:17-24, Nisan.
- Dutta S.C., Jain S.K, Murty C.V.R., 2000a. Alternate Tank Staging Configurations With Reduced Torsional Vulnerability, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 19, 199–215.
- Dutta S,C., Jain S.K, Murty C.V.R., 2000b. Assessing The Seismic Torsional Vulnerability of Elevated Tanks with RC Frame-Type Staging, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 19, 183–197.
- Dutta, S.C., Jain S.K., Murty C.V.R., 2001. Inelastic Seismic Torsional Behavior of Elevated Tanks, Journal of Sound and Vibration, 242(1): 151-167.
- Dutta, S., Mandal, A., Dutta S.C., 2004. Soil–Structure Interaction In Dynamic Behaviour Of Elevated Tanks With Alternate Frame Staging Configurations, Journal of Sound and Vibration, v.277, Issues 7-8,654-664.
- Elaidi, M.B., Eissa, A.M., 1998. Soil Structure Interaction in Fuel Handling Building, Nuclear Engineering and Design, 181, 145-156.
- Eltaher, M.H.A., 1998. Hybrid FE-BE Formulation for Coupled Dynamic Poro-Elastoplastic Analyses of Soil-Structure Systems, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, Rice University, Houston, Texas.
- El-Damatty, A.A., Korol, M.R., Mirza, A.F., 1997. Stability of Elevated Liquid-Filled Conical Tanks under Seismic Loading, Part-1-Theory, <u>Earthquake Engineering &</u> <u>Structural Dynamics</u>, vol. 26, 1191-1208.
- El-Zeiny A., 1995. Nonlinear Time-Dependent Seismic Response of Unanchored Liquid Storage Tank, PhD Dissertation, Department of Civil Environmental Engineering University of California, Irvine.
- El-Zeiny, A., 2002. Study of Factors Affecting the Seismic Response of Unanchored Tanks 15th ASCE Engineering Mechanics Conference June 2-5, Colombia University, New York.

- Endres, A., Arnold, J.P., Roesset, J.M., 1984. Soil-Structure Response Using Fixed Base Structural Modes, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3 937-943, San Francisco.
- Epstein H.I., 1976. Seismic Design of Liquid-Storage Tanks, Journal of Structural Division, 102;1659-1673.
- Ermutlu, E. H., 1964. Dört Ayaklı Su Kulesi Taşıyıcı Sistemi Üzerine Model Denemeleri, <u>DSİ Teknik Bülteni</u>, 31-54.
- Eurocode-8., 2003. Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1, European Committee for Standardization 225s.
- Eurocode-8, 2003. Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 4: Silos, Tanks and Pipelines, European Committee for Standardization, 65 s,
- FEMA 368, 2001. The 2001 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 1: Provision, NEHRP, Washington DC.
- FEMA 369, 2001. The 2001 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 2: Commentary NEHRP, Washington DC.
- Filho, F.V., De Barros F.C.P., Almeida, M.C.F., Ferreira, W.G., 1997. Soil-Structure Interaction Analysis of NPP Containments: Substructures and Frequency Domain Methods, <u>Nuclear Engineering and Design</u>, 174, 165-176.
- Fischer, F.D., 1979. Dynamic Fluid Effects in Liquid –Filled Flexible Cylindrical Tanks Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 7, 587-601.
- Fischer, F.D., Rammerstorfer, F.G., 1980. Stability of Liquid Storage Tanks Under Earthquake Excitation Journal of Pressure Vessel Technology, 109, 374-380.
- Fischer, F.D., Rammerstorfer, F.G., Scharf, K., 1991. Earthquake Resistant Design of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks Under Three Dimensional Earthquake Excitation, Structural Dynamic-Recent Advances, Ed. :G.I. Schuellor, 317-370, Springer Verlag.
- Fujita, K., 1981. A Seismic Response Analysis of a Cylindrical Liquid Storage Tanks, <u>Bulletin of JSME</u>, 24, 1029-1036.
- Fujita, K., 1981. A Seismic Response Analysis of Cylindrical Liquid Storage Tanks Including Effects of Sloshing, <u>Bulletin of JSME</u>, 24, 1634-1641.
- Fujita, K., 1982. A Seismic Response Analysis of a Cylindrical Liquid Storage Tanks on Elastic Foundations, <u>Bulletin of JSME</u>, 25. 1977-1984.

- Galswarthy, K.T., El-Naggar, H.M., 2000. Effect of Foundation Flexibility on the Across Wind Response of Reinforced Concrete Chimneys with Free-Standing Liners, <u>Canadian Geotechnique J</u>, 4, 676-6880.
- Gamphir, M.L., 1986. Reinforced Concrete Water Tanks with Vertical Walls Subjected to Compression, Indian Concrete Journal, 103-108 April.
- Gazetas, G., Tassoulas, L.J., 1986a. Horizontal Damping of Arbitrarily Shaped Embedded Foundation, Journal of Geotechnical Engineering, V.113, No:5, 458-475.
- Gazetas, G., Tassoulas, L.J., 1986b. Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.113, No:5, 440-457.
- Gedikli, A., 1996. Silindirik Tanklarda Varyasyonel Sınır Eleman Sonlu Eleman Yöntemi ile Sıvı-Yapı Etkileşimi, Doktora .Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Graham, E.M., Rodriquez, A.M., 1952. Characteristics of Fuel Motion Which Affects Airplane Dynamics, Journal of Applied Mechanics, 19, 381-388.
- Goto, Y., Shirasuna, T., 1980. Studies on Earthquake Response of Grouped Underground Tanks in Soft Ground, The 7th World Conference on Earthquake Engineering, 173-180, Istanbul.
- Goodman, R.S., (çev Kayabalı, K)., 2003. Kaya Mekaniğine Giriş, 2.Baskı Gazi Kitapevi, Ankara.
- Güler, K., 1992. Kule Türü Yapıların Deprem Davranışlarının Zemin-Yapı Etkileşimi Göz Önüne Alınarak İncelenmesi, Doktora .Tezi, İTU Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hadjian, H.A., Luco, E.J., Tsai, C.N., 1974a. Soil-Structure Interaction: Continuum or Finite Element, <u>Nuclear Engineering and Design</u>, 31, 151-167.
- Hadjian, H.A., Niehoff, D., Guss, J., 1974b. Simplified Soil-Structure Interaction Analysis with Strain Dependent Soil Properties, <u>Nuclear Engineering and Design</u> v.31, 218-233.
- Halabian, M.A., 2001. Dynamic Behavior of Tall Slender Structures on Flexible Foundations Subjected to Extreme Events, PhD Dissertation, Faculty of Engineering Science Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontoria, London, Ontoria.
- Halabian, M.A., El-Naggar, H.M., 2002. Effect of Non-linear Soil-Structure Interaction on Seismic Response of Tall Slender Structures, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 22, 639-658.

- Halbritter, L.A., Krutzik, J.A., Boyadjiev, Z., Katona, T., 1998. Dynamic Analysis of VVER Type Nuclear Power Plants Using Different Procedures for Consideration of Soil-Structure Interaction Effects, <u>Nuclear Engineering and Design</u>, 182, 73–92.
- Hamada, M., Izumi, H., Omeri, K., 1975. Behavior of Underground Tanks During Earthquakes, The 5th European Conference on Earthquake Engineering, 1-5, Istanbul.
- Hamdan, H.F., 2000. Seismic Behavior of Cylindrical Steel Liquid Storage Tanks, <u>Journal</u> of Constructional Steel Resarch, 53, 307-333.
- Haroun, M.A., 1983. Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks, <u>Earthquake</u> <u>Engineering & Structural Dynamics</u>, vol. 11, 179-206.
- Haroun, M.A., 1984. Stress Analysis of Rectangular Walls Under Seismically Induced Hydrodynamic Loads, <u>Bull. Seism. Soc. Am</u>, 74, 1031-1041.
- Haroun, M.A., Ellaithy, M.H., 1985. Seismically Induced Fluid Forces on Elevated Tanks Journal of Technical Topics in Civil Engineering, 111 (1), 1-15.
- Haroun, M.A., Abdel-Hafiz, E.A., 1986. A Simplified Seismic Analysis of Rigid Base Liquid Storage Tanks under Vertical Excitations with Soil-Structure Interaction, <u>International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 5(4), 217-225, 1986,
- Haroun, M.A., Chen, W., 1989. Seismic Large Amplitude Liquid Sloshing Theory, Proceedings of the Sessions Related to Seismic Engng. Al Structures Congree 89, 418-427, 1989.
- Haroun, M.A., Abou-Izzeddine, W., 1992. Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction, Journal of Structural Engineering, 118(3), 783-812.
- Haroun, M.A., Temraz, M.K., 1992. Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Response Of Elevated Tanks, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 11(2), 73-86.
- Haroun, M.A., Housner, G.W., 1981. Seismic Design of Liquid Storage Tanks. J.Tech.Councils. ASCE, 107(1):191-207.
- Hoskins, L.M., Jacobsen, L., 1934. Water Pressure in a Tank Caused by Simulated Earthquake, <u>Bulletin of the Seismological Society of the America</u>, 24, 1-32.
- Hosseini, M., Mohojer, M., 2000. Effects of Foundation Geometry on the Natural Periods of Cylindrical Tank-Liquid-Soil Systems, <u>Journal of Seismology and Earthquake</u> Engineering (JSEE), v.2, No:4, 43-50.

- Housner, G.W., 1957. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, <u>Bulletin of the</u> <u>Seismological Society of the America</u>, 47, 15-35.
- Housner, G.W., 1963. Dynamic Behavior of Water Tanks, <u>Bulletin of the Seismological</u> <u>Society of the America</u>, 53, 381-387.
- Housner, W.G., Haroun, A.M., 1980. Dynamic Analysis of Liquid Storage Tanks, The 7th World Conference on Earthquake Engineering, v.8, 431-438, Istanbul.
- Inoue, Y., Kawano, M., 1984. Dynamic Response of an elastic Foundation Embedded in a Layered Medium, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3, 753-759, San Francisco.
- Iwatate, T., Kokusho, T., Oooku, S., 1980. Seismic Stability Embedded Tanks, The 7th World Conference on Earthquake Engineering, 173-180, Istanbul.
- Jain, S.K., Sameer, U.S., 1993. A Review Of Requirements In Indian Codes for a Seismic Design of Elevated Water Tanks, <u>Bridge and Struct. Engr.</u>, 23 (1), 1-16.
- Jennings, C.P., Bielak, J., 1972. Dynamics of Buildings-Soil Interaction, California Institute of Technology-Earthquake Engineering Research Laboratory, Report No:EERL 72-01.
- Jeremic, B., Kunnath, X.F., 2004. Influence of Soil–Foundation–Structure Interaction on Seismic Response of the I-880 Viaduct, <u>Engineering Structures</u>, 26, 391–402.
- Johnson, R.G., Epstein, I.H., Christiano, P., 1976. Some Comparisons of Dynamic Soil-Structure Analsysis, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, v.I 199-214, Missouri.
- Ouchi, H., Toshikazu, T., 1985. Analytical Study of Ultimate Behavior of Underground LNG Storage Tanks Subjected to Both Thermal and Seismic Earth Pressure Load, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Seminar Proceedings, 645-655 Tokyo, May 21-24.
- Resheidat, R.M., 1984. Soil Foundation Interaction of Framed Structures, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3.777-783, San Francisco.
- Kausel, E., Roesset, J.M., 1975. Dynamic Stiffness of Circular Foundations, Journal of the Engineering Mechanics Division, v.101;No:EM6, 771-785.
- Kim, J.K., Koh, H.M., Kwahk, I.J., 1996. Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid Containers, J. Engng. Mech. ASCE, 122, 807-817.

- Kim, J.K., Park, J.Y., Jin, B.M., 1998. The Effects of Soil Structure Interaction on The Dynamics of 3-D Flexible Rectangular Tanks, Proceedings of the 6th East Asia-Pacific Conf.on Struc. Engng. & Construction, January 14-16, Taipei, Taiwan.
- Kim, S., 2001. Calibration of Simple Models for Seismic Soil-Structure Interaction from Field Performance Data, PhD Dissertation, Civil Engineering, The University of California, Los Angeles.
- Knoy, C.E., 1995. Performance of Elevated Tanks During Recent California Seismic Events, AWWA Annual Conference & Exhibition.
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 653 s.
- Koh, H.M., Kim, J.K., Park, J.H., 1998. Fluid-Structure Interaction Analysis of 3-D Rectangular Tanks by A Variationally Coupled BEM-FEM and Comparison with Test Results, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 27, 109-124.
- Koçak, A., 1999. Tarihi Yapıların Statik ve Dinamik Yükler Altında Lineer ve Non-Lineer Analizi: Küçük Ayasofya Camii Örneği, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Ünivesitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kuhlameyer, L.R., Lysmer, J., 1973. Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the ASCE, v. 99, No:SM5 421-427.
- Kumar, S., 1996. Dynamic Response of Low-Rise Buildings Subjected to Ground Motion Considering Nonlinear Soil Properties and Frequency Dependent Foundation Parameters, PhD Dissertation, Faculty of Graduate of the University of Missouri-Rolla.
- Lee, W.V., 1980. Effect of Foundation Embedment on Soil-Structure Interaction, The 7th World Conference on Earthquake Engineering, 225-228, İstanbul.
- Lee, S.T.P., Dawe, L.J., 1996. Collapse of Single Pedestal Elevated Water Tank, Proceedings of the 2nd International Conference in Civil Engineering on Computer Applications, Research and Practice, 275-284, Bahrain, April.
- Lin, N.A., 1984. Measured Effect of Foundation Embedment on Response, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3, 841-847, San Francisco.
- Livaoğlu, R., 2001. Yapıların Deprem Hesabında Burulma Düzensizliğinin ve Hesap Yöntemlerinin Etkinliğinin İncelenmesi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Livaoğlu, R., Doğangün, A., 2003. Farklı Taşıyıcı Sisteme Sahip Ayaklı Depoların Zemin Sınıflarına Göre Dinamik Davranışlarının İrdelenmesi, <u>Sakarya Üniversitesi Fen</u> <u>Bilimleri Dergisi</u>, cilt:7 sayı:3, 70-77.
- Livaoğlu, R., Doğangün, A. 2004. A Simple Seismic Analysis Procedure for Fluid-Elevated Tank-Foundation/Soil Systems, 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, 6-8 October 2004 Bogazici University, Istanbul.
- Luco, E.J., Hadjian, H.A., 1974. Two Dimensional Approximations to the Three Dimensional Soil-Structure Interaction Problem, <u>Nuclear Engineering and Design</u>, 31, 195-203,
- Luco, E.J., Hadjian, H.A., Bos, D.H., 1974. The Dynamic Modeling of The Half-Plane by Finite Elements, <u>Nuclear Engineering and Design</u>, 31, 184-194.
- Luco, E.J., Wong, L.H., Trifunac, D.M., 1986. Soil-Structure Interaction Effects on Forced Vibration Tests, University of Southern California (USC), Report EERL-86-05.
- Luco, J.E., Wong, H.L., 1987. Seismic Response of Foundations Embedded in a Layered Half-Space, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamic</u>, v.15, 233-247.
- Lysmer, J., Kuhlmeyer R.L., 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, <u>ASCE</u>. <u>Engineering Mechanics Division Journal</u>, v.95, 859-877.
- Malhotra, P.K., Wenk, T., Weiland, M., 2000. Simple Procedure of Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, J. Struct. Eng. Int., IABSE, 10 (3), 197–201.
- Marashi, E.S., Shakib, H., 1997. Evaluations of Dynamic Characteristics of Elevated Water Tanks by Ambient Vibration Tests, 4th International Conference on civil Engineering, May 4-6.
- Marchaj, A.S., 1979. Importance of Vertical Acceleration in the Design of Liquid Containing Tanks, Proceedings of the 2nd US National Conference on Earthquake Engineering, Stanford, 146-155, 22-24, August.
- Meek, J.W., Wolf, J.P., 1994. Cone Models for Embedded Foundation, Journal of <u>Geotechnical Engineering, ASCE</u>, 120(1):60-80.
- Mendelson, E., Alpan, I., 1976. The Effect of Foundation Compliance on The Fundamental Periods of Multi-Storey Buildings, International Symposium on Earthquake Structural Engineering, v.I, 127-145, St.Louis, Missouri, USA, August.
- Meler, S., 2002. Upcoming Changes to Seismic Design Criteria, 2000, www. Tankindustry.com/paper, 15-11-2002.

- Minowa, C., 1980. Dynamic Analysis for Rectangular Water Tanks, Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering in Japan, 135-142.
- Minowa, C., 1984. Experimental Studies of A seismic Properties of Various Tanks, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, vol. VII, 945-952.
- Mizuno, H., 1980. Effects of Structure-Soil-Structure Interaction During Various Excitations The 7th World Conference on Earthquake Engineering, v.5, 149-156, Istanbul.
- Mylonakis, G., Gazetas, G., 2000. Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental, Journal of Earthquake Engineering, Vol.4 No:3, 277-301.
- Nofal, E.M.H., 1998. Analysis of Non-linear Soil-Pile Interaction under Dynamic Lateral Loading, PhD Thesis, University Of California Irvine.
- Novak, M., El-Hifnawy., 1984. Effect of Foundations Flexibility on Dynamic Behavior of Buildings, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3 721-727, San Francisco.
- Olson, L.G., Bathe, K.J., 1983. A Study of Displacement-Based Fluid Finite Elements for Calculating Frequencies of Fluid And Fluid-Structure Systems, <u>Nuclear</u> <u>Engineering and Design</u>; 76: 137-151.
- Oshaki, Y., (Çev, İpek, M.,) 1991. Deprem Dalgasının Spektral Analizine Giriş, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi.
- Özer, E., 2005 Yapı Sistemlerinin Lineer Olmayan Analizi, http://www.ins.itu.edu.tr/ eozer/ders_notlari.htm, 10.Şubat.2005.
- Park, J.H., Koh, H.M., Kim, J.K., 2000. Seismic Isolation of Pool-Type Tanks for the Storage of Nuclear Spent Fuel Assemblies, <u>Nuclear Engng. Design</u>, 199, 143-154.
- Pecker, A., Pender, M,J., 2000. Earthquake Resistant Design of Foundation: New Construction, GeoEng2000 Conference, vol.1, (invited lecturer), Melbourne.
- Pınar, R., Akçığ, Z., 1995. Jeofizikte Sinyal Kuramı ve Dönüşümler, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Eğitim Yayınları, 405s.
- Priestley, M.J.N., Davidson, B.J., Honey, G.D., Hopkins, D.C., Martin R.J., Ramsey, G., Vessey, J.V., Wood, J.H., 1986. Seismic Design of Storage Tanks, Recommendations of Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, New Zealand.

- Rai D.C., 2002. Seismic Retrofitting of R/C Shaft Support of Elevated Tanks, <u>Earthquake</u> <u>Spectra</u>, 18, 745-760.
- Ramey, E.G., Yoo, H.C., Moore, K.R., Bush, D.T., Stallings, M.J., 1984. Lumped Parameter Modeling and Dynamic Response Evaluations of Soil-Structure Systems, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v.3 977-984, San Francisco.
- Resheidat, R.M., Sunna, H., 1990. Behavior of Elevated Storage Tanks During Earthquakes, Proceedings of the 3 th World Conference on Earthquake Engineering vol. II, 13, 22, Moscow.
- Rodriguez, M,E., Montes, R., 2000. Seismic Response and Damage Analysis of Buildings Supported on Flexible Soils, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, v.29: 647-665.
- Saatçi, M., 1998. Sismik Yükler Etkisindeki Silindirik Tanklarda Mod Süper pozisyonu ile Sıvı-Yapı Etkileşimi Problemlerinin Çözümü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- SAP2000, Integrated Software for Structural Analysis & Design, Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
- Sasaki, F., Outa, T., Masuda, K., Miura, M., 1984. Response Analysis of an Elastic Flexible Base Mat Resting on the Surface of Multi Layered Strata, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3 785-792, San Francisco.
- Seeber, R., Fischer, F.D., Rammerstorfer, F.G., 1990. Analysis of Three Dimensional Tank-Liquid Soil Interaction Problem, <u>Journal of Pressure Vessel Technology</u>, 112, 28-33.
- Shakib, H., Fuladgar, A., 2004. Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Asymmetric Buildings, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 24, 379-388.
- Shakib, H., 2004. Evaluation of Dynamic Eccentricity by Considering Soil-Structure Interaction: A proposal for Seismic Design Codes, <u>Soil Dynamics and Earthqake</u> <u>Engineering</u>, 24, 379-388.
- Shenton, W.H., Hampton, P.F., 1999. Seismic Response of Isolated Elevated Water Tanks, Journal of Structural Engineering, 965-976, September.
- Shepherd, R., 1972. Two Mass Representation of a Water Tower Structure, Journal of Sound and Vibration, 24 (4), 391-396.

- Shrimali, J., Jangid, S.R., 2000. Earthquake Response of Liquid Storage Tanks with Sliding System, <u>JSEE</u>, vol. 4, No 283, 51-61.
- Shrimali, M.K., Jangid, R.S., 2003. The Seismic Response of Elevated Liquid Storage Tanks Isolated by Lead-Rubber Bearings, <u>Bulletin of the New Zealand Society for</u> <u>Earthquake Engineering</u>, 36(3), 141-164.
- Shirasuna, T., Goto, Y., 1984. Studies on Earthquake-Resistant Design of Groped Underground Tanks in Soft Ground, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, 413-420, San Francisco.
- Somaini, D.R., 1984. Parametric Study on Soil-Structure Interaction of Bridges with Shallow Foundations, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3.785-792, San Francisco.
- Song, C., Wolf, J.P., 1994. Dynamic Stiffness of unbounded medium based on solvent damping extraction method, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, v.23, 1073-1086.
- Sonobe, Y., Nishikawa, T., 1969. Study on the Earthquake Proof Design of Elevated Tanks, Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Chile, 11-24.
- Steinbrugge, K.V., Rodrigo, F.A., 1963. The Chilean Earthquakes of May 1960: A Structural Engineering Viewpoint, <u>Bulletin of the Seismological of America</u>, V.53 No. 2 225-307.
- Stewart, P, J., 1996. An Empirical Assessment of Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Structures, PhD Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Stewart, P,J., Seed, B,R., Fenves L,G., 1998. Empirical Evaluation of Inertial Soil-Structure Interaction Effects Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (PEER), Technical Report EERL-1998-07.
- Stewart, P,J., Fenves, G,L., Seed, R.B., 1999a. Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. I: Analytical Methods, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 125, No. 1, 26–37.
- Stewart, P.J., Seed, R.B., Fenves, G.L., 1999b. Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 125, No. 1, 38–48.
- Stewart, P.J., Kim, S., Bielak, J., Dobry, R., Power, S.M., 2003. Revisions to Soil-Structure Interaction Procedures in NEHRP Design Provisions, <u>Earthquake</u> <u>Spectra</u>, V.19, No. 3, 677–696.
- Spyrakos, C., Loannidis, G., 2003. Seismic Behavior of a Post-Tensioned Integral Bridge Including Soil–Structure Interaction (SSI), Soil <u>Dynamics and Earthquake</u> <u>Engineering</u>, v.23, 53-63.
- Takewaki, I., 1998a. Equivalent Linear Ductility Design of Soil-Structure Interaction, Engineering Structures, 20,655-662
- Takewaki, I., 1998b. Remarkable Response Amplification of Building Frames Due To Resonance with Surface Ground, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 17, 211-218
- Takewaki, I., Takeda, N., Uetani, K., 2003. Fast Practical Evaluation of Soil-Structure Interaction of Embedded Structure, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, 23,195-202.
- Tongaonkar, N.P., Jangid, R.S., 2003. Seismic Response of Isolated Bridges with Soil– Structure Interaction, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u> v.23 287–302.
- Trifunac, M.D., 2000. Discussion to Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. I: Analytical Methods and Seismic Soil-Structure Interaction in Buildings. II: Empirical Findings, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 668-669, July.
- Tsai, N.C., Niehoff, D., Swatta, M., Hadjian, A.H., 1974. The Use of Frequency-Independent Soil-Structure Interaction Parameters, <u>Nuclear Engineering and</u> <u>Design</u>, 31, 168-183.
- Tung, Y.T.A., 1989. Methods of Seismic Reliability Analysis for Elevated Spherical Tanks, Stanford University, PhD Thesis, March.
- UBC-97., 1997. International Conference of Building Officials, Uniform Building Code, Whittier, CA.
- Warburton, B, G., 1984. A Simple Model to Illustrate the Significance of Foundation Flexibility in Soil Structure Interaction Problem, The 8th World Conference on Earthquake Engineering, v.3 729-735, San Francisco.
- Werkle, H., 1984. Kinematic Interaction of Rigid Circular Foundations on Layered Soil under Surface Wave Excitations, 8th World Conference on Earthquake Engineering, v3, 945-951, San Francisco.
- Westergaard, H.M., 1931. Water pressures on dams during earthquakes, <u>Proceedings of the</u> <u>ASCE</u>,; v.57, 1303.

- Wilson E.L., Khalvati, M., 1983. Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, <u>International Journal of Numerical Methods in Engineering</u>; 19: 1657-1668.
- Wilson E.L., 2002. Three-dimensional static and dynamic analysis of structures- a physical approach with emphasis on earthquake engineering, Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, Third Edition, 423 s.
- Wolf, J.P., 1985. Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 466s.
- Wolf, J.P., 1991a. Consistent Lumped-Parameter Models for Unbounded Soil: Physical Representation, <u>Earthquake Engineering and Structural Dynamics</u>. v.20:11-32.
- Wolf, J.P., 1991b. Consistent Lumped-Parameter Models for Unbounded Soil: Frequency Independent Stiffness, Damping and Mass Matrices, <u>Earthquake Engineering and</u> <u>Structural Dynamics</u>. v.20:33-41.
- Wolf, J.P., 1994. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice-Hall, Englewood, .423 s.
- Wolf, J.P., 1997. Spring Dashpot-Mass Models For Foundation Vibrations, <u>Earthquake</u> <u>Engineering and Structural Dynamics</u>. v.26:931-949.
- Wolf, J.P., Meek, J.W., 1992. Cone Models for Homogeneous Soil, <u>Journal of Geotechnical Engineering, ASCE</u>, 118: 686-703.
- Wolf, J.P., Meek, J.W., 1993. Cone Models for a Soil Layer on a Flexible Rock Half-Space, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamic</u>, v.22:185-193.
- Wolf, J.P., Meek, J.W., 1994. Dynamic Stiffness of Foundation on Layered Soil Half-Space using Cone Frustum, <u>Earthquake Engineering and Structural Dynamics</u>. v.23:1079-1095.
- Wolf, J.P., Preisig, M., 2003. Dynamic Stiffness of Foundation Embedded in Layered Halfspace Based on Wave Propagation in Cones, <u>Earthquake Engineering &</u> <u>Structural Dynamics</u>, v.32:1075-1098.
- Wolf, J.P., Somaini, D.R., 1986. Approximate Dynamic Model of Embedded Foundation in Time Domain, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>. v.14: 683-703.
- Wolf, J.P., Song, C., 1995. Doubly Asymptotic Multi-Directional Transmitting Boundary for Dynamic Unbounded Medium-Structure-Interaction Analysis, <u>Earthquake</u> <u>Engineering & Structural Dynamics</u>, 24(2), 175–188.

- Wolf, J.P., Song, C., 1996. Consistent Infinitesimal Finite Element Cell Method a Boundary Finite-Element Procedure, Third Assian-Pasific Conference on Computational Mechanics, Soul, Korea, 16-18 September.
- Wolf J.P, Song C.H., 1996a. Finite-Element Modeling of Unbounded Media, Chichester: John Wiley & Sons, 331 s.
- Wolf, J.P., Song, C.H., 1996b. Finite Element Modeling Unbounded Media, the 11th World Conference on Earthquake Engineering, paper no: 70, 1-9, San Francisco.
- Wolf, J.P, Song C.H., 2002. Some Cornerstone of Dynamic Soil-Structure Interaction, <u>Engineering Structure</u>, 24, 13-28.
- Wong, L, Luco, E., 1978. Tables of Impedances Functions and Input Motion for Rectangular Foundations, University of Southern California Department Of Civil Engineering (USC), Report EERI-78-15.
- Wong, L., 1975. Dynamics Soil-Structure Interaction, PhD. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Wu, W.H., 1997. Equivalent Fixed Base Models for Soil-Structure Interaction Systems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v.16, 323-336.
- Wu, W.H., Smith, A., 1995. Efficient Modal Analysis for Structures with Soil-Structure Interaction, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamics</u>, 24:283–289.
- Wu, W.H., Chen, C.Y., 2001. An Effective Fixed-Base Model with Classical Normal Modes for Soil-Structure Interaction Systems, <u>Soil Dynamics and Earthquake</u> <u>Engineering</u>, 21, 689-698.
- Wu, W.H., Wang, J.W., 2001. Systematic Assessment of the Irregular Building Soil Interaction Using Efficient Modal Analysis, <u>Earthquake Engineering and Structural</u> <u>Dynamic</u>, 30; 573-594.
- Veletsos, A.S., 1984. Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE, New York, 255-461.
- Veletsos, A:S., Dotson, W.K., 1987. Vertical and Torsional Vibration of Foundation in Inhomogeneous Media, National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report NCEER-87-0010.
- Veletsos, A.S., Kumar, A., 1984. Dynamic Response of Vertically Excited Liquid Storage Tanks, the 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco v. VII 453-460.

- Veletsos, A.S. Meek, J.M., 1974. Dynamics of Behavior of Building -Foundation Systems Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 3:121–138.
- 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.
- Veletsos, A.S., Tang, Y., 1990. Soil-Structure Interaction Effects Laterally Excited Liquid Storage Tanks, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamic</u>, 19, 473-496.
- Veletsos, A.S., Wei, T.Y., 1971. Lateral and Rocking Vibration of Footings, <u>Journal of</u> <u>The Soil Mechanics and Foundations Division</u>, v.97, No:SM9, 1227-1248.
- Veletsos, A.S., Yang, J.Y., 1976. Dynamics of Fixed-Base Liquid Storage Tanks, Proceedings of USA-Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline System, 317-341, Tokyo.
- Yamamoto, S., Kawano, K., Shimizu, N., Umebayashi, S., Yamagata, M., 1984. Radiation Damping of Cylindrical Liquid Storage Tank Resting on Elastic Body, the 8th World Conference on Earthquake Engineering, v.5 231-238, San Francisco.
- Yang, Z., 1999. Numerical modeling of Earthquake Site Responce Including Dilatation and Liquefaction, PhD Thesis, Columbia University.
- Yasui, Y., 1980. A Simplified Analysis Method on Interaction System about Structure-Foundation-Soil Surface Layer, 7th World Conference on Earthquake Engineering, v5. 225-228, Istanbul.
- Yerli, R.H., 1998. İki ve Üç Boyutlu Dinamik Yapı Zemin Etkileşimi Problemlerinin Sonlu ve Sonsuz Elemanlar Kullanarak Analizi, Doktora .Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Youssef, A., 1998. Seismic Response of Inelastic Structures on Compliant Foundations, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Northeastern University Boston, Massachusetts.
- Zaman, M.M., Mahmood, I.E., 1988. Analysis of Cylindrical Storage Tanks-Foundations Interaction Using Finite Element Method, <u>Indian Geotechnical Journal</u>, 18, 4, 354-384.
- Zerfa, Z., Loret, B., 2004. A Viscous Boundary for Transient Analyses of Saturated Porous Media, <u>Earthquake Engineering & Structural Dynamic</u>, v.110, 33-89.
- Zhao, J.X., 1997. Effects of Frequency Dependent Foundation-Soil Compliance on Building Vertical Responses Identified from Earthquake Records, <u>Soil Dynamics</u> <u>and Earthquake Engineering</u>, v.16, 273-284.

- Zhao, J.Z., 1998. Estimating Kinematic Interaction of The Raft Foundations From Earthquake Records and Its Effects on Structural Response, <u>Soil Dynamics and Earthquake Engineering</u>, v.17, 73-88.
- Zienkiewicz O.C., Bettes, P., 1978. Fluid-Structure Dynamic Interaction and Wave Forces; an Introduction To Numerical Treatment, <u>International Journal of Numerical</u> <u>Methods in Engineering</u>, 13: 1-16.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., 2000. The Finite Element Method. Solid Mechanics v.2, Butterworth-Heinemann Publishing Ltd, Wildwood Avenue, Woburn, 450 s.

5. EKLER

EK-1 Model-1 İçın Geliştirilen Program Kodu

global hi hc mi mc ki kc e ro r0 son su son zem son yap pois vp vs ro=20/9.81; r0=9; e=9; %r temel yarıçapı ya da eşdeğer yarıçap (m) e temel gömülme derinliği pois=0.4; % poisson orani vs = 1149; son temzem = 0.0; % grafikten alınan ZEMINE AIT SONUM *h*=27: %salınım ve impuls kütlelerinin (m) yüksekliği *mw*=900; *ms*=282; *mh*=496; *ro s*=1 son yap = 0.05;agmax=0.35 % dikkate alınan deprem kaydındaki g cinsinden max yer ivmesi M=mw+ms*2/3+mh*k*=32900; % *kN/m* % ki impuls kütlesinin bağlı lfuğu rijitlik + ayak rijitliği pi=3.1453; vsmax=vs; Gmax=ro*vs^2 %G kayma modulu if (agmax <= 0.1)Gazalt = (1-0.81)/(0.1-0)*(0.1-agmax)+0.81;Vazalt = (1-0.81)/(0.1-0)*(0.1-agmax)+0.90;elseif(agmax <= 0.15)Gazalt = (0.81 - 0.64)/(0.15 - 0.1)*(0.15 - agmax) + 0.64;Vazalt = (0.81-0.64)/(0.15-0.1)*(0.15-agmax)+0.80;elseif (agmax<=0.20) Gazalt = (0.64-0.49)/(0.20-0.15)*(0.20-agmax)+0.49;Vazalt = (0.64-0.49)/(0.20-0.15)*(0.20-agmax)+0.70;elseif (agmax<=0.30) Gazalt = (0.49-0.42)/(0.30-0.20)*(0.30-agmax)+0.42;Vazalt = (0.49-0.42)/(0.30-0.20)*(0.30-agmax)+0.65;else Gazalt = 0.42;Vazalt = 0.65;end vs=Vazalt*vsmax G=Gazalt*GmaxEc=2*G*(1-pois)/(1-2*pois);%Ec bulk modülü E=2*G*(1+pois);%E elastisite modülü Kh = ((8*G*r0)/(2-pois))*(1+e/r0)%Kh yatay statik rijitliği

EK-1'in devamı

```
Kr = (8*G*r0^3)/(3*(1-pois))*(1+2.3*e/r0+0.58*(e/r0)^3) %Kr dönme statik rijitliği
W = sqrt(k/M); f = W/(2*pi); T = 1/f
kont = (r0/vs) *T
                                         % azaltma katsayısının belirlenmesi için gereklı katsayı
if (kont<0.05)
  gamaQ = 1;
elseif (kont<0.15)
  gamaQ = (1.0-0.85)/(0.15-0.05)*(0.15-kont)+0.85;
elseif (kont<0.35)
  gamaQ = (0.85 - 0.70)/(0.35 - 0.15)*(0.35 - kont) + 0.70;
elseif (kont<0.50)
  gamaQ = (0.70-0.60)/(0.50-0.35)*(0.50-kont)+0.60;
else
  gamaQ = 0.60;
end
Kr=gamaQ*Kr
                                         % AZALTILMIŞ DÖNME RİJİTLİĞİ
                             EŞDEĞER SİSTEMİN PERİYODU
%
TESD = T*sqrt(1+k/Kh*(1+Kh*h^2/Kr))
disp('Tesd/T Degerine Bagli Olarak Grafikten Deger Alinrak Son Temzem Yerine Yaz = ')
ORAN = TESD/T
esdson = son temzem + son yap/(TESD/T)^3;
if (esdson<0.05)
        esdson = 0.05:
else
        esdson = son temzem + son yap/(TESD/T)^3;
end
disp('ESEGER PERIYOT = '); TESD
disp('ESEGER SONUM = '); esdson
                [interval,ivme] = izmyarkay FEMA;
                ag=ivme/100;
                kesd=M*4*pi^2/TESD^2
                [U,hiz,a] = newmark FEMA(kesd,M,esdson,ag,interval);
VTABAN = M^*a;
                        %femaya gre burada hesaplanan taban kesme ve devirici kuvvetleri
                        %ankastre sisteminkinin %70 inden az olamaz
MTABAN = VTABAN*h;
figure(1)
   t = 0:interval:(length(ag)-1)*interval;
   plot(t, U)
```

EK-1'in devamı

ylabel('Yerdegistirme (m)'), xlabel('Zaman (s)'), grid on title('YERDEGISTIRMENIN ZAMANLA DEGISIMI'); figure(2) t = 0:interval:(length(ag)-1)*interval; plot(t,VTABAN) ylabel('TABAN KESME (kN)'), xlabel('Zaman (s)'), grid on title('TABAN KESME KUVVETININ ZAMANLA DEGISIMI'); figure(3) t = 0:interval:(length(ag)-1)*interval; plot(t,MTABAN) ylabel('DEVIRICI MOMENT (kNm)'), xlabel('Zaman (s)'), grid on title('DEVIRICI MOMENTIN ZAMANLA DEGISIMI');

%%%%%	AYAKLI DEPOLA İLGİLİ ÖZELLİKLER	%%%%%%%
global hi hc mi mc ki k	c e ro r0 son_su son_zem son_yap pois vp	D VS
ro=18/9.81; r0=9; e=9	9; %r_temel yarıçapı ya da eşdeğer yarı	çap (m) e temel gömülme derinliği
<i>pois</i> =0.4;	% poisson oranı	
vp=202.19;	%Boyuna dalga hızı	
vs=82.54;	% Kayma Dalgası Hızu	
<i>h</i> =27;	%Salınım ve impuls kütlelerinin (m) y	üksekliği
mw=900; ms=282; mb	h=496; ro_s=1 %R tank yarıçapı	%H sıvı yüksekliği %g yerçekimi ivmesi
mw= su kütlesi	%ms ayak kütlesi %mh hazne kütlesi i	ro_s:vi yoğunluğu
$son_yap = 0.05;$	% Yapiya ait sonum	
$son_{zem} = 0.05;$	% Zemine ait sonum	
agmax=0.35	% dikkate alınan deprem kaydındaki	g cinsinden max yer ivmesi
M=mw+ms*2/3+mh		
<i>k=32900;</i>		
w01=sqrt(k/M);	%Tek kütleli sistemin açisal frekansi	
format short g;		
[fftdata,interval,yerd,iv	vme] = izmyarkay;	
<i>for i=1:1</i>		
pi=3.1453;		
pois(i)=pois;		
vp(i)=vp;		
vs(i)=vs;		
$G(i) = ro *vs(:,i)^2$		%G kayma modulu
$E_{-}(i) = 2*C(i, i)*(1i)/(1 - 2*-$		0/E o hulls modülü

EK-2 Model-2 İçin Geliştirilen Program Kodu

$G(i) = ro*vs(:,i)^2$	%G kayma modulu
Ec(i) = 2*G(:,i)*(1-pois(:,i))/(1-2*pois(:,i))	%Ec_bulk modülü
E(i)=2*G(:,i)*(1+pois(:,i))	%E_elastisite modülü
Kh(i) = ((8 * G(:,i) * r0)/(2 - pois(:,i))) * (1 + e/r0)	%Kh yatay statik rijitliği
Kv(i) = (4*G(:,i)*r0)/(1-pois(:,i));	%Kv düşey statik rijitliği
$Kr(i) = (8 * G(:,i) * r0^3) / (3 * (1 - pois(:,i))) * (1 + 2.3 * e/r0 + 0.58 * (e/r0)^3)$	%Kr dönme statik
$Kt(i) = (16*G(:,i)*r0^3)/(3);$	%Kt burulma statik rijitliği

```
freq = (0:length(fftdata)-1)/(length(fftdata)*interval);

fftivme = fft((ivme/100));

for w=1:length(fftdata)

a(w) = r0*((2*pi*freq(:,w))/vs(:,i)); %boyutsuz frekans;

if(pois<=(1/3))

% YATAY RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
```

EK-2'nin devamı

	kh=1; $ch=((pi/8)*(2-pois(:,i)));$
%	DÜŞEY RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
	%kv=1; cv=((pi/4)*(1-pois(:,i)))*(vp(:,i)/vs(:,i));
%	
	$kr(w) = 1 - (1/3)*a(:,w)^2/((9*pi/32*(1-pois(:,i))*(vp(:,i)/vs(:,i))^3)^2 + (a(:,w))^2);$
cr(w)=(3*)	$pi/32$)* $(1-pois(:,i)$)* $(vp(:,i)/vs(:,i)$)* $(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))$
	$pois(:,i)$ *($vp(:,i)/vs(:,i)$)^3)^2+($a(:,w)$)^2);
%	BURULMA RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
	$kt(w) = 1 - \frac{1}{3} * a(:,w)^{2} / ((9 * \frac{pi}{32})^{2} + a(:,w)^{2});$
	$ct(w) = (3*pi/32)*a(:,w)^2/((9*pi/32)^2+a(:,w)^2);$
else	
т	u(i)=0.3*pi*(pois(:,i)-1/3);% dönme için
de	eltaM=mu(:,i)*ro*r0^5; % dönme için
end	
%	MATERYAL VE RADYASYONEL SONUMLER
<i>cirw (:,w)</i>	= 2*pi*freq(:,w);
son_rad_H	H(w)= a(:,w)*ch/(2*kh); %zeminin hareket şekline göre radyasyonel sönümleri
son_rad_R	R(w) = a(:,w) * cr(:,w) / (2 * kr(:,w));
%	DİNAMİK RİJİTLİKLER
Sh(:,w) = I	Kh*kh*(1+2i*son_zem)*(1+2*1i*son_rad_H(:,w)+2*1i*son_zem);
Sr(:,w) = I	Kr*kr(:,w)*(1+2i*son_zem)*(1+2*1i*son_rad_R(:,w)+2*1i*son_zem);
if	(pois <= (1/3))
%	
$Q_1(w,:) =$	$w01^2*(1+2i*son_yap)*((1/cirw(:,w)^2)-1/((w01^2)*(1+2i*son_yap))-M/Sh(:,w)-1/((w01^2)*(w01^2))-M/Sh(:,w)-1/((w01^2)*(w01^2))-M/Sh(:(w01^2)*((w01^2)*(w01^2))-M/Sh(:(w01^2)*(w01^2))-M/Sh(:(w01^2)*(w01^2))-M/Sh(:(w01^2)*(w01^2)))-M/Sh$
	$(M^{h^2})/Sr(:,w));$
<i>Q_1(1,:)</i> =	<i>• 0;</i>
A_1(w,:) =	$= k*(1+2i*son_yap)*(1/(M*cirw(:,w)^2)-1/(k*(1+2i*son_yap))-1/Sh(:,w)-(h^2)/Sr(:,w));$
<i>A_1(1,:)</i> =	0;
<i>Ak1(w,:)</i> =	= fftivme(w,:)/Q_1(w,:);
<i>Ab1(w,:)</i> =	$= Ak1(w,:)*k*(1+2i*son_yap)/Sh(:,w);$
hQAb1(:,w	$y) = Ak1(w,:)*k*h^{2}(1+2i*son_yap)/Sr(:,w);$
Uk1(:,w) =	= fftivme(w,:)/(cirw(:,w)^2*Q_1(w,:));
UB1(:,w) =	= Uk1(:,w)*w01^2*(1+2i*son_yap)*M/Sh(:,w);
hQb1(:,w)	$=Uk1(:,w)*w01^{2}*(1+2i*son_yap)*M*h^{2/Sr(:,w)};$
U1(:,w) =	Uk1(:,w);%+UB1(:,w)+hQb1(:,w);

EK-2'nin devamı

$$\begin{split} U1(:,l) &= 0; \\ A1(:,w) = Ak1(w,:); \% + Ab1(w,:) + h*hQAb1(:,w); \\ A1(:,l) = 0; \\ else \end{split}$$

```
\begin{split} Sr(:,w) &= Kr^*kr(:,w)^*(1+2i^*son\_zem)^*(1+2^*1i^*son\_rad\_R(:,w)+2^*1i^*son\_zem) + deltaM^*cirw(:,w)^2; \\ Q\_1(w,:) &= w01^2^*(1+2i^*son\_yap)^*((1/cirw(:,w)^2)-1/((w01^2)^*(1+2i^*son\_yap))-M/Sh(:,w)-1/((Sr(:,w)/((deltaM+M)^*h^2))+(deltaM/M)^*cirw(:,w)^2)); \end{split}
```

 $Q_1(1,:)=0;$

 $Uk1(:,w) = fftivme(w,:)/(cirw(:,w)^2*Q_1(w,:)); \% ivme ye baplı yerdeğiştirmeler ivme/w^2 ile ifade edildi UB1(:,w) = w01^2*(1+2i*son_yap)*M/Sh(:,w); \% temeldeki ötelenme sebebiyle çatıda oluşan yerdeğiştirme hQb1(:,w) = w01^2*(1+2i*son_yap)*M*h^2/Sr(:,w); \% temeldeki dönme sebiyle oluşan yerdeğiştirme$

```
U1(:,w) = Uk1(:,w)+UB1(:,w)+hQb1(:,w);
U1(:,1)=0;
```

```
\begin{split} A1(:,w) = &fftivme(w,:)/Q_1(w,:);\% + hQb1(:,w)*cirw(:,w)^2 + UB1(:,w)*cirw(:,w)^2; \\ A1(:,1) = 0; \\ &end \end{split}
```

end

for k = 1:*len;*

U(k,:)=real(hesapifft_U1(k)); VTABAN(k,:)=M*real(hesapifft_A1(k));

end

MTABAN=VTABAN*h; end

EK-3 Model-3 İçin Geliştirilen Program Kodu

global hi hc mi mc ki kc e ro r0 son su son zem son yap pois vp vs ro=20/9.81; r0=9; e=0; %pois poisson oranı ro zeminin birim kütlesi (kN/g/m3) r temel yarıçapı ya da eşdeğer yarıçap (m) e temel gömülme derinliği pois=0.3; % poisson orani vs=1150; % dikkate alınan deprem kaydındaki g cinsinden max yer ivmesi agmax=0.35*hi* = 27; *hc*=29.6; %salınım ve impuls kütlelerinin (m) yüksekliği H=8; R=6; g=9.81; ms=282; mh=496; ro s=1 %R tank yarıçapı %H sıvı yüksekliği %g yerçekimi ivmesi %ms AYAK KÜTLESİ %mh HAZNE KÜTLESİ ro s:vi yoğunluğu $son \ su = 0.005$; %0.5 suya ait sönüm % yapiya ait sonum son yap = 0.05;°/_---*mw*=900; mi = 614 + ms * 2/3 + mhmc = 281*ki=32900*; % kN/m ki impuls kütlesinin bağlı rijitlik + ayak rijitliği *kc*=846; %_____ [a 1, a 2, RN1, RN2, etkinm 1, etkinm 2, etkink 1, etkink 2, etkinh 1, etkinh 2, w01, w02] = modal anal(ki, kc,mi, mc, hi, hc) %_----son temzem1=0.0 % grafikten ORAN1 İÇİN alınan ZEMINE AIT SONUM son temzem2=0.0 % grafikten ORAN2 İÇİN alınan ZEMINE AIT SONUM %_____ [U1,hiz,A1,TESD1,ORAN1]=FEMA ikikutle(ro,r0,e,pois,vs,son temzem1,son yap,etkink 1,etkinm 1,etkinh 1,agmax); [U2, hiz, A2, TESD2, ORAN2]=FEMA_ikikutle(ro, r0, e, pois, vs, son_temzem2, son_su, etkink_2, etkinm_2, etkinh 2,agmax); for k = 1:length(U1); $U11(k,:)=RN1*a \ 1(1,1)*U1(k);$ $U21(k,:)=RN1*a \ 1(2,1)*U1(k);$ U12(k,:)=RN2*a 2(1,1)*U2(k);U22(k,:)=RN2*a 2(2,1)*U2(k);*V11(k,:*)=*etkinm_1*RN1*a 1(1,1)*A1(k);* $V21(k,:) = etkinm \ 1 * RN1 * a \ 1(2,1) * A1(k);$ $V12(k,:) = etkinm \ 2*RN2*a \ 2(1,1)*A2(k);$

*V22(k,:)=etkinm_2*RN2*a_2(2,1)*A2(k);*

end

u1=U11+U12; u2=U21+U22; V1=V11+V12; V2=V21+V22; VTABAN=V1+V2; MTABAN=V1*etkinh_1+V2*etkinh_2;

EK-4 Model-4 İçin Geliştirilen Program Kodu

%%%%%%	AYAKLI DEPOLA İLGİLİ ÖZELLİKLE.	R%%%%%%%
global hi hc mi r	mc ki kc e ro r0 son_su son_zem son_yap pois w	vp vs
ro=18/9.81 ; r0	=9; e=9 %pois_poisson oranı ro_zeminin bir	im kütlesi (kN/g/m3)
	%r_temel yarıçapı ya da eşdeğer ya	rıçap (m) e temel gömülme derinliği
hi = 27, hc = 29.	6; %salınım ve impuls kütlelerinin (m)	yüksekliği
H=8; R=6; g=9	9.81; ms=282; mh=496; ro_s=1	
	%R tank yarıçapı %H sıvı yüksekliği	
	%g yerçekimi ivmesi %ms ayak kütlesi %mh	hazne kütlesi ro_s:vı yoğunluğu
$son_su = 0.005$; %0.5 suya ait sönüm	
$son_zem = 0.05$; % zemine ait sonum	
$son_yap = 0.05;$: % yapiya ait sonum	
<i>pois=0.4;</i>	% poisson oranı	
vp=202.18;	% boyuna dalga hızı (m/s)	
vs=82.54;	% kayma dalgası hızı (m/s)	
%		
mw=900;		
mi=614+ms*2/2	3+mh;	
mc=281		
ki=32900;	% kN/m %ki impul	s kütlesinin bağlı rijitlik + ayak rijitliği
kc=846; %mc*g	g/R*1.84*tanh(1.84*H/R) %bu formul housn	er için, kullanılan veletsosdan hesaplanan
	%kc salınım kütles	inin bağlı olduğu ayak rijitliği
clc		
format short g;		
%%%%%	YAPIYLA İLGİLİ ÖZELLİKLER	%%%%%%%
%burada koni i	modeline ait statik rijitlikler ile bu modelin d	linamik davranişi enasinida daki rijiliğindeki
%değişimi nitele	endiren yatay düşey dönme ve burulma rijitlikle	eri belirlenmektedir. posisson oraninin 1/3 den
%büyük olduğu	durumlarda zeminin sikişmaz kabulu göz önün	e alinmaktadir.
%%%%%		%%%%%%
[a_1,a_2,RN1,1	RN2,etkinm_1,etkinm_2,etkink_1,etkink_2,etkin	h_1,etkinh_2,w01,w02] = modal_anal(ki, kc,
mi, mc, hi, hc)		
%%%%%	ZEMİNLE İLGİLİ ÖZELLİKLER	%%%%%%%
[fftdata,interval	l,yerd,ivme] = izmyarkay;	
<i>for i=1:1</i>		
<i>pi=3.1</i>	453:	
1	·	
pois(i)=	=pois;	

vs(i)=vs; $G(i)=ro^*vs(:,i)^2;$ %G kayma modulu

%-----

Ec(i)=2*G(:,i)*(1-pois(:,i))/(1-2*pois(:,i))	%Ec_bulk modülü
E(i) = 2*G(:,i)*(1+pois(:,i))	%E_elastisite modülü
Kh(i) = ((8*G(:,i)*r0)/(2-pois(:,i)))*(1+e/r0)	%Kh yatay statik rijitliği
Kv(i) = (4 * G(:,i) * r0) / (1 - pois(:,i));	%Kv düşey statik rijitliği
$Kr(i) = (8*G(:,i)*r0^3)/(3*(1-pois(:,i)))*(1+2.3)$	*e/r0+0.58*(e/r0)^3)%Kr dönme statik rijitliğ
$Kt(i) = (16*G(:,i)*r0^3)/(3);$	%Kt burulma statik rijitliği
0/	

freq = (0:length(fftdata)-1)/(length(fftdata)*interval);
fftivme = fft((ivme/100));

```
for w=2:length(fftdata)
            a(1) = 0;
             a(:,w) = r0*((2*pi*freq(:,w))/vs(:,i)); %boyutsuz frekans
if(pois<=(1/3))
                                YATAY DİNAMİK RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
    %
kh=1 ; ch=((pi/8)*(2-pois(:,i)));
% DÜŞEY DİNAMİK RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
%kv=1; cv=((pi/4)*(1-pois(:,i)))*(vp(:,i)/vs(:,i));
%
                             ROCKİNG DİNAMİK RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
kr(1)=1;
kr(:,w) = 1 - (1/3)*a(:,w)^2/((9*pi/32*(1-pois(:,i))*(vp(:,i)/vs(:,i))^3)^2 + (a(:,w))^2);
krbak(w,:) = kr(:,w);
cr(1)=0;
cr(:,w) = (3*pi/32)*(1-pois(:,i))*(vp(:,i)/vs(:,i))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i))))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i)))*(a(:,w)))*(a(:,w)))*(a(:,w))^2/(((9*pi/32)*(1-i))))*(a(:,w)))*(a(:,w)))*(a(:,w)))*(a(:,w)))*(a(:,w)))
                                                                               pois(:,i))*(vp(:,i)/vs(:,i))^3)^2+(a(:,w))^2);
crbak(w,:) = cr(:,w);
% BURULMA DİNAMİK RİJİTLİK VE SÖNÜM KATSAYISI
kt(:,w)=1-1/3*a(:,w)^2/((9*pi/32)^2+a(:,w)^2);
ct(:,w) = (3*pi/32)*a(:,w)^2/((9*pi/32)^2+a(:,w)^2);
else
mu(i)=0.3*pi*(pois(:,i)-1/3);% dönme için
deltaM = mu(:,i)*ro*r0^{5}; % dönme için
```

273

end

if(pois<=(1/3))

 $\begin{aligned} & fftyerd(w,:) = fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2; \\ & fftyerd(1,:) = 0; \\ & mat11 = (w01^2/cirw(:,w)^2)^*(1+2i^*son_yap)-1; \\ & mat22 = Sh(:,w)/(etkinm_1^*cirw(:,w)^2)-1; \\ & mat33 = Sr(:,w)/(etkinh_1^2^*cirw(:,w)^2^*etkinm_1)-1; \\ & mat=[mat11,-1,-1 \\ & -1,mat22,-1 \\ & -1,-1,mat33]; \end{aligned}$

```
ag=fftivme(w,:)*[1 \\ 1 \\ 1]; \\ AA=inv(mat)*ag; \\ Ak1(w,:) = AA(1,:); \\ Ab1(w,:) = AA(2,:); \\ hQAb1(w,:) = AA(2,:); \\ Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1 \\ 1 \\ 1]; \\ UU=inv(mat)*Ug; \\ Uk1(:,w) = UU(1,:); \\ Ub1(:,w) = UU(2,:); \\ hQb1(:,w) = UU(3,:); \\ \end{cases}
```

°/_____ $mat11 = (w02^2/cirw(:,w)^2)^*(1+2i^*son su)-1;$ $mat22 = Sh(:,w)/(etkinm 2*cirw(:,w)^2)-1;$ $mat33 = Sr(:,w)/(etkinh 2^2*cirw(:,w)^2*etkinm 2)-1;$ *mat=[mat11,-1,-1]* -1,mat22,-1 -1,-1,mat33]; ag=fftivme(w,:)*[1 1 1]; AA=inv(mat)*ag; Ak2(w,:) = AA(1,:);Ab2(w,:) = AA(2,:);hQAb2(w,:) = AA(3,:); $Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1]$ 1 1]; UU=inv(mat)*Ug ; Uk2(:,w) = UU(1,:);Ub2(:,w) = UU(2,:);hQb2(:,w) = UU(3,:);°/_-----Uk1(:,1) = 0; Ub1(:,1) = 0; hQb1(:,1) = 0; U1(:,1) = 0;U1(:,w) = Uk1(:,w) + Ub1(:,w) + etkinh 1 * hQb1(:,w);*Ak1(1,:)* = 0; *Ab1(1,:)* = 0; *hQAb1(1,:)* = 0; *A1(:,1)*=0; *A1(:,w)=Ak1(w,:);%+Ab1(w,:)+hQAb1(w,:);* Uk2(:,1) = 0; Ub2(:,1) = 0; hQb2(:,1) = 0; U2(:,1)=0; $U2(:,w) = Uk2(:,w) + Ub2(:,w) + etkinh_2*hQb2(:,w);$ *Ak1(1,:)* = 0; *Ab1(1,:)* = 0; *hQAb1(1,:)* = 0; *A2(:,1)*=0; A2(:,w) = Ak2(w,:); % + Ab2(w,:) + hQAb2(w,:);*vb1(w,:)=Sh(:,w)*(Ub1(:,w)); mb1(w,:)=Sr(:,w)*(hQb1(:,w)); vb2(w,:)=Sh(:,w)*(Ub2(:,w)); mb2(w,:)=Sr(:,w)*(hQb2(:,w));*

else

fftyerd(w,:)=fftivme(w,:)/cirw(:,w); fftyerd(1,:) = 0; %-----

 $mat11 = (w01^2/cirw(:,w)^2)^*(1+2i^*son_yap)-1;$

```
mat22 = Sh(:,w)/(etkinm \ 1*cirw(:,w)^2)-1;
mat33 = (Sr(:,w)-etkinm 1*etkinh 1^2*cirw(:,w)^2-deltaM*cirw(:,w)^2)/(etkinm 1*etkinh 1^2*cirw(:,w)^2);
                              mat=[mat11,-1,-1]
                                   -1,mat22,-1
                                   -1,-1,mat33];
                              ag=fftivme(w,:)*[1
                                              1
                                             1];
                             AA=inv(mat)*ag;
                             Akl(w,:) = AA(l,:);
                             Ab1(w,:) = AA(2,:);
                             hQAb1(w,:) = AA(3,:);
                              Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1]
                                                            1
                                                           1];
                              UU=inv(mat)*Ug;
                              Ukl(:,w) = UU(l,:);
                              Ub1(:,w) = UU(2,:);
                              hQb1(:,w) = UU(3,:);
                              %-----
                             mat11 = (w02^2/cirw(:,w)^2)^*(1+2i^*son su)-1;
                             mat22 = Sh(:,w)/(etkinm_2*cirw(:,w)^2)-1;
mat33 = (Sr(:,w)-etkinm 2*etkinh 2^2*cirw(:,w)^2-eltaM*cirw(:,w)^2)/(etkinm 2*etkinh 2^2*cirw(:,w)^2);
                              mat=[mat11,-1,-1
                                   -1,mat22,-1
                                   -1,-1,mat33];
                              ag=fftivme(w,:)*[1
                                              1
                                              1];
                             AA=inv(mat)*ag;
                             Ak2(w,:) = AA(1,:);
                             Ab2(w,:) = AA(2,:);
                             hQAb2(w,:) = AA(3,:);
                              Ug=(fftivme(w,:)/cirw(:,w)^2)*[1]
                                                            1
                                                           1];
                              UU=inv(mat)*Ug;
                              Uk2(:,w) = UU(1,:);
```

Ub2(:,w) = UU(2,:);
hQb2(:,w) = UU(3,:);
%
Uk1(:,1) = 0; Ub1(:,1) = 0; hQb1(:,1) = 0; U1(:,1) = 0;
U1(:,w) = Uk1(:,w) + Ub1(:,w) + hQb1(:,w);
Ak1(1,:) = 0; Ab1(1,:) = 0; hQAb1(1,:) = 0; A1(:,1)=0;
A1(:,w) = Ak1(w,:); % + Ab1(w,:) + hQAb1(w,:);
Uk2(:,1) = 0; Ub2(:,1) = 0; hQb2(:,1) = 0; U2(:,1)=0;
U2(:,w) = Uk2(:,w) + Ub2(:,w) + hQb2(:,w);
Ak1(1,:) = 0; Ab1(1,:) = 0; hQAb1(1,:) = 0; A2(:,1)=0;
A2(:,w)=Ak2(w,:);%+Ab2(w,:)+hQAb2(w,:);
vb1(w,:)=Sh(:,w)*(Ub1(:,w));
<i>mb1(w,:)=Sr(:,w)*(hQb1(:,w))-deltaM*hQAb1(w,:)/etkinh_1;</i>
vb2(w,:)=Sh(:,w)*(Ub2(:,w));
$mb2(w,:)=Sr(:,w)*(hQb2(:,w))-deltaM*hQAb2(w,:)/etkinh_2;$

end

end

```
len = length(freq);
t = 0:interval:(len-1)*interval;
hesapifft_U1 = real(ifft(U1));
hesapifft_U2 = real(ifft(U2));
hesapifft_A1 = real(ifft(A1));
hesapifft_A2 = real(ifft(A2));
VB1 = real(ifft(vb1));
MB1 = real(ifft(mb1))/etkinh_1;
VB2 = real(ifft(mb2))/etkinh_2;
for k = 1:len;
```

```
U11(k,:) = RN1 * a_1(1,1) * real(hesapifft_U1(k));

U21(k,:) = RN1 * a_1(2,1) * real(hesapifft_U1(k));

U12(k,:) = RN2 * a_2(1,1) * real(hesapifft_U2(k));

U22(k,:) = RN2 * a_2(2,1) * real(hesapifft_U2(k));
```

```
V11(k,:)=etkinm_1*RN1*a_1(1,1)*real(hesapifft_A1(k));
V21(k,:)=etkinm_1*RN1*a_1(2,1)*real(hesapifft_A1(k));
V12(k,:)=etkinm_2*RN2*a_2(1,1)*real(hesapifft_A2(k));
```

 $V22(k,:) = etkinm_2 * RN2 * a_2(2,1) * real(hesapifft_A2(k));$

$$\begin{split} &M11(k,:) = etkinm_1*etkinh_1*RN1*a_1(1,1)*real(hesapifft_A1(k));\\ &M21(k,:) = etkinm_1*etkinh_1*RN1*a_1(2,1)*real(hesapifft_A1(k));\\ &M12(k,:) = etkinm_2*etkinh_2*RN2*a_2(1,1)*real(hesapifft_A2(k));\\ &M22(k,:) = etkinm_2*etkinh_2*RN2*a_2(2,1)*real(hesapifft_A2(k)); \end{split}$$

end

u1=-(U11+U12); u2=-(U21+U22);

V1=V11+V12; V2=V12+V22;

M1=M11+M12; M2=M21+M22;

 $Vtaban = -((V1+V2)-VB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))-VB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_1/(etkinm_2+etkinm_1))+MB2*(etkinm_2/(etkinm_2+etkinm_1))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2)))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2)))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2)))); Mtaban = -((M1+M2)-MB1*(etkinm_2+etkinm_2))))$

end

Ek-5 Kullanılan Alt Program Kodları

```
function [U,hiz,a,TESD,ORAN] = FEMA ikikutle(ro,r0,e,pois,vs,son temzem,son yap,k,M,h,agmax)
pi=3.1453;
vsmax=vs;
Gmax=ro*vs^2
                      %G kayma modulu
% FEMA YA GÖRE KAYMA MODULU VE KAYMA DALGASI HIZLARINDAKİ AZALMALAR
if (agmax <= 0.1)
  Gazalt = (1-0.81)/(0.1-0)*(0.1-agmax)+0.81;
  Vazalt = (1-0.81)/(0.1-0)*(0.1-agmax)+0.90;
elseif (agmax <= 0.15)
  Gazalt = (0.81 - 0.64)/(0.15 - 0.1)*(0.15 - agmax) + 0.64;
  Vazalt = (0.81-0.64)/(0.15-0.1)*(0.15-agmax)+0.80;
elseif (agmax<=0.20)
  Gazalt = (0.64-0.49)/(0.20-0.15)*(0.20-agmax)+0.49;
  Vazalt = (0.64-0.49)/(0.20-0.15)*(0.20-agmax)+0.70;
elseif (agmax<=0.30)
  Gazalt = (0.49-0.42)/(0.30-0.20)*(0.30-agmax)+0.42;
  Vazalt = (0.49-0.42)/(0.30-0.20)*(0.30-agmax)+0.65;
else
  Gazalt = 0.42;
  Vazalt = 0.65;
end
vs=Vazalt*vsmax
 G=Gazalt*Gmax
Ec=2*G*(1-pois)/(1-2*pois);
                                %Ec bulk modülü
E=2*G*(1+pois);
                                 %E elastisite modülü
Kh=((8*G*r0)/(2-pois))*(1+e/r0) %Kh yatay statik rijitliği
Kr = (8*G*r0^3)/(3*(1-pois))*(1+2.3*e/r0+0.58*(e/r0)^3); %Kr dönme statik rijitliği
W = sqrt(k/M); f = W/(2*pi); T = 1/f\%
%
           FEMA YA GÖRE TEMEL-ZEMİN SİSTEMİ DÖNME RİJİTLİĞİ AZALTMA KATSAYISI
kont = (r0/vs) *T
                         % azaltma katsayısının belirlenmesi için gerekli katsayı
if (kont<0.05)
  gamaQ = 1;
elseif (kont<0.15)
  gamaQ = (1.0-0.85)/(0.15-0.05)*(0.15-kont)+0.85;
elseif (kont<0.35)
  gamaQ = (0.85 - 0.70)/(0.35 - 0.15)*(0.35 - kont) + 0.70;
elseif (kont<0.50)
```

EK-5'in devamı

%

```
gamaQ = (0.70-0.60)/(0.50-0.35)*(0.50-kont)+0.60;
else
gamaQ = 0.60;
end
Kr=gamaQ*Kr % AZALTILMIŞ DÖNME RİJİTLİĞİ
```

[U,hiz,a] = newmark FEMA(kesd,M,esdson,ag,interval);

 $TESD = T*sqrt(1+k/Kh*(1+Kh*h^2/Kr))$

disp('Tesd/T Degerine Bagli Olarak Grafikten Deger Alinrak Son_Temzem Yerine Yaz = ')
ORAN = TESD/T
esdson = son_temzem + son_yap/(TESD/T)^3;
if (esdson<0.05)
 esdson = 0.05;
else
 esdson = son_temzem + son_yap/(TESD/T)^3;
end
disp('ESEGER PERIYOT = '); TESD
disp('ESEGER SONUM = '); esdson
[interval,ivme] = izmyarkay_FEMA;
ag=ivme/100;
kesd=M*4*pi^2/TESD^2</pre>

EŞDEĞER SİSTEMİN PERİYODU

EK-5'in devamı

```
function[a 1,a 2,RN1,RN2,etkinm 1,etkinm 2,etkink 1,etkink 2,etkinh 1,etkinh 2,w01,w02]=modal anal(k
                                                                                       i, kc, mi, mc, hi, hc)
%disp('----SİSTEMİN RİJİTLİK MATRİSİ----')
k = [ki + kc, -(kc)]
  -(kc),kc];
%disp('----sistemin sigma matrisi----')
         s=inv(k)
%disp('SİSTEMİN KÜTLE MATRSİSİ')
m = [mi, 0]
    0,mc];
%disp('sistemin c(fiktiv yerdeğiştirmeler) matrisi')
         c=s*m;
         [a,l]=eig(c);
%disp('—sistemin özdeğerleri)
         lamda1=l(1,1);
         lamda2 = l(2,2);
%disp('----sitemin dairesel frekansları----')
         w02=sqrt(1/lamda2);
         w01=sqrt(1/lamda1);
%disp('----sistemin peryotları----')
         t02=2*3.141592654/w02
         t01=2*3.141592654/w01
%
                                MOD VEKTÖRLERİ
         a \ l = [a(l, l); a(2, l)];
         a \ 2 = [a(1,2);a(2,2)];
                                ETKİN KÜTLE VE RİJİTLİKLER
%
         Ln1 = mi^*a \ 1(1,1) + mc^*a \ 1(2,1)
         Ln2 = mi^*a 2(1,1) + mc^*a 2(2,1)
         Lh1 = hi^{mi^{a}} 1(1,1) + hc^{mc^{a}} 1(2,1)
         Lh2 = hi*mi*a \ 2(1,1)+hc*mc*a \ 2(2,1)
         M1 = mi^*a \ 1(1,1)^2 + mc^*a \ 1(2,1)^2
         M2 = mi^*a \ 2(1,1)^2 + mc^*a \ 2(2,1)^2
         RN1 = Ln1/M1;
         RN2=Ln2/M2;
         etkinm 1 = (Ln1)^2/M1; etkink 1 = w01^2*etkinm 1;
         etkinm 2 = (Ln2)^2/M2; etkink 2 = w02^2*etkinm 2;
         etkinh 1 = Lh1/Ln1; etkinh 2 = Lh2/Ln2
```

ÖZGEÇMİŞ

Ramazan LİVAOĞLU 1977 yılında Samsun'da doğdu. Lise öğrenimini Samsun Ondokuz Mayıs Lisesinde tamamladı. 1993-1994 öğretim yılında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 1997-1998 öğretim yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Aynı yıl girdiği sınavı kazanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 1998-1999 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Sürmene Nazmi Kalafatoğlu Eğitim Merkezi'ndeki İngilizce hazırlık sınıfını başarıyla bitirdi. Aralık 2000'de KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün açtığı sınavı kazanarak Ocak 2001'de bu bölümün Yapı Anabilim Dalı'na Öğretim Görevlisi olarak atandı. 2000-2001 öğretim yılında "*Yapıların Deprem Hesabında Burulma Düzensizliğinin ve Hesap Yöntemlerinin Etkinliğinin* İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezini vererek yüksek lisans eğitimini başarıyla tamamladı. Ramazan LİVAOĞLU İngilizce bilmekte ve halen KTÜ Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında Öğretim Görevliliğini sürdürmektedir.