

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİSMİK YALITIMLI DÜŞEY SİLİNDİRİK SIVI
DEPOLARININ DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Gökhan YAZICI**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2008

**SİSMİK YALITIMLI DÜŞEY SİLİNDİRİK SIVI
DEPOLARININ DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Gökhan YAZICI
(501002100)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 05 Eylül 2008**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Feridun ÇILI
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Zeki HASGÜR (İ.T.Ü.)
Prof. İbrahim EKİZ (Y.T.Ü.)
Doç.Dr. Abdullah Necmettin GÜNDÜZ (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Mustafa ZORBOZAN (Y.T.Ü.)

EYLÜL 2008

ÖNSÖZ

Kritik öneme sahip sıvı depolarında deprem etkisiyle oluşabilecek hasarları azaltmak amacıyla kullanılan sismik yalıtım sistemlerinin mekanik özelliklerinde yükleme koşulları ya da zaman içerisinde çevresel etkiler nedeniyle oluşabilecek değişimlerin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerinin, MATLAB’de geliştirilen bir program yardımıyla incelendiği çalışmalarım sırasında bir an bile yardımlarını esirgemeyen ve mesleki birikimime sayısız katkılar sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Feridun ÇILI’ya, özellikle mühendislik sismolojisi ve analizlerde kullanılacak kayıtların seçilmesi konularında değerli fikirleriyle katkıda bulunan Prof. Dr. Zeki HASGÜR’e, çalışmamın pratik mühendislik uygulamaları üzerindeki etkileri konusunda araştırmalarımın destek olan Prof. İbrahim EKİZ’e, sismik yalıtım sistemleri üzerine çalışmamı teşvik eden ve bu konuda geniş deneyime sahip University of California at San Diego ve State University of New York at Buffalo laboratuvarlarında kısa süreli araştırma olanakları sağlamada yardımcı olan merhum Prof. Dr. Hasan KARATAŞ’a, Prof. Dr. Andrew WHITTAKER’a, Prof. Dr. Michael CONSTANTINOU’ya ve Dr. Nader HEYAT’a, tez çalışmamın gelişimini devamlı olarak takip eden Prof. Dr. Okay EROSKAY’a, çalışmalarım sırasında hep destek gördüğüm aileme, eşim Yasemin’e, kızım Naz’a ve isimlerini sayamadığım dostlarıma teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2007

Gökhan YAZICI

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Sıvı Depolarının Deprem Hareketi Altındaki Davranışı	1
1.2 Sismik Yalıtımlı Sıvı Depolarının Dünyadaki Uygulamaları	4
1.3 Sıvı Depolarının Tasarımında Kullanılan Yönetmelikler	7
1.4 Sismik Yalıtımlı Depolar Üzerine Yapılan Çalışmalar	8
1.5 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	10
2. SİSMİK YALITIM SİSTEMLERİ	12
2.1 Giriş	12
2.2 Doğrusal sismik yalıtım sistemlerinin davranışı	13
2.3 Sismik yalıtım sistemi bileşenleri	22
2.3.1 Sürtünmeli Sarkaç Sistemi	22
2.3.2 Elastomer yalıtıcılar	27
2.3.3 Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcılar	29
2.3.4 Viskos sıvı sönümleyiciler	32
3. SIVI DEPOSUNUN MODELİNİN OLUŞTURULMASI	34
3.1 Giriş	34
3.2 Rijit duvarlı silindir depoların analizi	36
3.2.1 Darbesel bileşen	39
3.2.2 Devinimli bileşen	41
3.2.2.1 Harmonik hareket	41
3.2.2.2 Geçici titreşim hareketi	45
3.2.3 Depoda oluşan en elverişsiz hidrodinamik etkiler	47
3.2.3.1 Hidrodinamik basınç	47
3.2.3.2 Sıvı yüzeyinin hareketi	49
3.2.4 Depoda oluşan kuvvetler ve gerilmeler	51
3.2.4.1 Hidrodinamik taban kesme kuvveti ve eğilme momenti	52

3.3	Sismik yalıtımlı depoların hareket denklemleri	55
4.	FARKLI TİPTE SİSMİK YALITIMLI DEPOLARIN DEĞİŞİK ÖZELLİKTEKİ DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ	62
4.1	Giriş	62
4.2	Çalışmada kullanılan depo tipleri	62
4.3	Çalışmada kullanılan deprem kayıtları	63
4.4	Sürtünmeli sarkaç mesnetleri üzerine mesnetlenen sıvı depoları	63
4.4.1	Depo Geometrisinin ve Sismik Yalıtım Sistemi Özelliklerinin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi	65
4.4.2	En büyük Yer İvmesininYapı Davranışı Üzerindeki Etkisi	79
4.4.3	Sürtünmeli Sarkaç Sistemi Üzerine Mesnetli Sıvı Depolarının Deprem Yükleri Altındaki Davranışının İncelenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi	82
4.5	Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetli Sıvı Depoları	84
4.5.1	Depo Geometrisinin ve Sismik Yalıtım Sistemi Özelliklerinin Yapı Davranışı Üzerindeki Etkisi	85
4.5.2	Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetli Sıvı Depolarının Deprem Yükleri Altındaki Davranışının İncelenmesi Amacıyla Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi	99
4.6	Örnek Uygulama	101
5.	SONUÇLAR	105
	KAYNAKLAR	113
	EKLER	124
EK A.	Taban hareketi altında rijit duvarlı depolarda sıvı davranışı	124
EK B.	Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının ivme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman ve spektrum grafikleri	152
EK C.	Sürtünmeli sarkaç mesnetli sıvı depoları için 0.4g'ye ölçeklenmiş ivme kayıtlarının kullanıldığı çalışmanın sonuçları	162
EK D.	Kurşun çekirdekli elastomer mesnetli sıvı depoları için 0.4g'ye ölçeklenmiş ivme kayıtlarının kullanıldığı çalışmanın sonuçları	178
EK E.	Sürtünmeli sarkaç mesnetli sıvı depoları için ölçeklenmemiş ivme kayıtlarının kullanıldığı çalışmanın sonuçları	215
EK F.	Kurşun çekirdekli elastomer mesnetli sıvı depoları için ölçeklenmemiş ivme kayıtlarının kullanıldığı çalışmanın sonuçları	228
EK G.	Geliştirilen yazılımın program kodları	

KISALTMALAR

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	: American Concrete Institute
API	: American Petroleum Institute
AWWA	: American Water Works Association
CERF	: Civil Engineering Research Foundation
EC	: Eurocode
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
FPS	: Sürtünmeli Sarkaç Sistemi
GF	: Glass-filled Teflon (Cam dolgulu Teflon)
HITEC	: Highway Innovative Technology Evaluation Center
IBC	: International Building Code
LNG	: Sıvılaştırılmış doğal gaz
LRB	: Kurşun çekirdekli elastomer mesnet
NISEE	: National Information Service for Earthquake Engineering
NZS	: New Zealand Standard
ODE	: Adi diferansiyel denklem
PTFE	: Politetraflor Etilen
UF	: Unfilled Teflon (Dolgusuz Teflon)
WT	: Woven Teflon (Dokuma Teflon)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Sıvı depolarının analizinde ve boyutlandırmasında kullanılan yönetmelikler	9
Tablo 2.1 Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yarıçapları ve sismik yalıtım periyotları	24
Tablo 2.2 Değişik teflon malzemelerinin değişik basınçlar altında sürtünme parametreleri	27
Tablo 3.1 Hız potansiyeli fonksiyonunun bileşenleri ve sağladıkları sınır koşulları.....	38
Tablo 3.2 $J_1'(\lambda) = 0$ ifadesinin ilk on kökü.....	42
Tablo 4.1 Analizlerde kullanılan ivme kayıtlarının mühendislik özellikleri	63
Tablo 4.2 Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin sıvı depolarının dinamik davranışına olan etkilerinin saptanması için yürütülen çalışmada kullanılan analiz parametreleri.....	65
Tablo 4.3 Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin davranışa olan etkilerinin saptanması için yürütülen çalışmada kullanılan analiz parametreleri.....	85
Tablo 4.4 Sabit tabanlı depo için elde edilen depo tasarım parametreleri (H = 36m, R = 42 m, = 8000 N/m ³ , Erzincan 1992 DB (0.6 g'ye ölçeklenmiş)).....	101
Tablo 4.5 Sismik yalıtımlı depo için elde edilen depo tasarım parametreleri (H = 36m, R = 42 m, = 8000 N/m ³ , Erzincan 1992 DB (0.6 g'ye ölçeklenmiş)).....	104
Tablo A.1 Birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunun türevinin ilk on kökü (Chalhoub and Kelly, 1988)	132

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Tüpraş rafinerisinde oluşan yangın hasarı (National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley)	2
Şekil 1.2 : Habaş rafinerisindeki oksijen depolarında oluşan hasar (National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley)	2
Şekil 1.3 : Yunanistan’da bulunan sismik yalıtımlı sıvılaştırılmış doğal gaz deposu (Whittaker, 2003).....	4
Şekil 1.4 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin üzerine mesnetlenen amonyak deposu (Zayas, 1996)	5
Şekil 1.5 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin üzerine mesnetlenen su deposu (Zayas, 1996)	5
Şekil 1.6 : Incheon tesislerinde bulunan LNG depoları (www.lussas.com) ..	5
Şekil 1.7 : İzmir-Aliğa tesislerinde bulunan sismik yalıtımlı LNG depoları (Martelli, 2006)	6
Şekil 1.8 : İsviçre’de Visp kimyasal depolama merkezinde bulunan sismik yalıtımlı LNG deposu (Bachmann ve Wenk, 2000)	6
Şekil 1.9 : İsviçre’de bulunan sismik yalıtımlı küresel sıvılaştırılmış gaz deposu (Bachmann, 2002)	7
Şekil 1.10 : (a) Housner (Housner, 1957) (Housner, 1963) tarafından deprem hareketine maruz kalan rijit duvarlı silindir sıvı hazneler için geliştirilmiş model. (b) Depo duvarında ve tabanında oluşan hidrodinamik basınç (Myers, 1997).....	8
Şekil 2.1 : Doğrusal sismik yalıtım sistemli yapı (Naeim and Kelly, 1999) .	14
Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı tek katlı bir yapının mod şekilleri (Filiatrault, 2001)	18
Şekil 2.3 : Sürtünmeli sarkaç mesneti kesiti	22
Şekil 2.4 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin geometrisi (Mosqueda ve diğ., 2004)	23
Şekil 2.5 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin kuvvet-yer değiştirme ilişkisi	25
Şekil 2.6 : Elastomer yalıtıcı (Dusi, 2003).....	28
Şekil 2.7 : Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcı (Constantinou and Whittaker, 2004).....	30
Şekil 2.8 : Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi	31
Şekil 2.9 : Kurşun çekirdek ve kauçuk boyutlarının çevrimsel davranışa etkisi	31
Şekil 2.10 : Bouc-Wen parametresi η ’nin çevrimsel davranışa etkisi (Sain ve diğ., 1998)	32

Şekil 2.11	: Bouc-Wen parametreleri β ve γ_{bw} 'nin çevrimsel davranışa etkisi (Hornig ve diğ., 2002).....	32
Şekil 2.12	: Viskos Sıvı Sönümleyici (Constantinou, 2004)	33
Şekil 3.1	: Rijit duvarlı sıvı depo modeli (Veletsos, 1984).....	36
Şekil 3.2	: Depo geometrisine bağlı olarak darbesel kütlelerin ve devinimli kütlelerinin toplam sıvı kütlelerine oranının değişimi.....	44
Şekil 3.3	: İlk 5 devinimli modun düşey yerdeğiştirmelerinin dağılımı	48
Şekil 3.4	: Darbesel basınç katsayısı $c_0(z)$ 'nin yükseklik boyunca değişimi .	50
Şekil 3.5	: 1. ve 2. devinimli moda ait $c_1(z)$ ve $c_2(z)$ 'nin yükseklik boyunca değişimi.....	50
Şekil 3.6	: Silindirik koordinatlarda gerilmeler (Lincaiah, 2002)	51
Şekil 3.7	: Depo tabanında hidrodinamik basınçların dağılımı.....	54
Şekil 3.8	: Sismik yalıtımlı ve rijit duvarlı sıvı deposunun dinamik modeli .	55
Şekil 3.9	: Sismik yalıtımlı depo tabanının ivme kaydı	60
Şekil 3.10	: Sismik yalıtım sisteminin kuvvet-yer değiştirme grafiği	60
Şekil 3.11	: Sismik yalıtımlı sıvı deposunda serbest sıvı yüzeyinin yer değiştirmesi	61
Şekil 3.12	: Depo duvarı boyunca en büyük hidrodinamik basıncın dağılımı.	61
Şekil 4.1	: Parametrik çalışmada kullanılan depo tipleri	63
Şekil 4.2	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$)	66
Şekil 4.3	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	67
Şekil 4.4	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$).....	68
Şekil 4.5	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$).....	68
Şekil 4.6	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$)	69
Şekil 4.7	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$)	70
Şekil 4.8	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	71
Şekil 4.9	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	71
Şekil 4.10	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	72
Şekil 4.11	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$).....	73
Şekil 4.12	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$)	74
Şekil 4.13	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$)	74
Şekil 4.14	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	75
Şekil 4.15	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{El Centro } 0.40\text{g}$).....	76
Şekil 4.16	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$).....	77

Şekil 4.17	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Erzincan 0.40g).....	77
Şekil 4.18	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $R_{fps} = 2.24$ m – Yarımca 0.40g)	78
Şekil 4.19	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Yarımca 0.40g)	79
Şekil 4.20	: En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – El Centro).....	80
Şekil 4.21	: En büyük yer ivmesinin mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – El Centro).....	80
Şekil 4.22	: En büyük yer ivmesinin mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – Yarımca)	81
Şekil 4.23	: En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – Yarımca)	82
Şekil 4.24	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.10$ – El Centro 0.40g)	86
Şekil 4.25	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – El Centro 0.40g)	87
Şekil 4.26	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.10$ – Erzincan 0.40g)	88
Şekil 4.27	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – Erzincan 0.40g)	88
Şekil 4.28	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.10$ – Yarımca 0.40g).....	89
Şekil 4.29	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – Yarımca 0.40g).....	90
Şekil 4.30	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.20$ – El Centro 0.40g)	91
Şekil 4.31	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – El Centro 0.40g)	91
Şekil 4.32	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.10$ – Erzincan 0.40g)	92
Şekil 4.33	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – Erzincan 0.40g)	93
Şekil 4.34	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $K_p/K_e = 0.10$ – Yarımca 0.40g).....	94

Şekil 4.35	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2 \text{ s} - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$).....	94
Şekil 4.36	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - K_p/K_e = 0.10 - \text{El Centro } 0.40\text{g}$)	95
Şekil 4.37	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$)	96
Şekil 4.38	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - K_p/K_e = 0.10 - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$)	97
Şekil 4.39	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{Erzincan } 0.40\text{g}$)	97
Şekil 4.40	: Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - K_p/K_e = 0.10 - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$)	98
Şekil 4.41	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{Yarımca } 0.40\text{g}$).....	99
Şekil 4.42	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{Erzincan } 1992 \text{ DB } 0.60\text{g}$)	102
Şekil 4.43	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{fps} = 1.55 \text{ m} - \text{Erzincan } 1992 \text{ DB } 0.60\text{g}$)	102
Şekil 4.44	: Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Erzincan } 1992 \text{ DB } 0.60\text{g}$)	103
Şekil 4.45	: Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{El Centro } 0.40\text{g}$)	103
Şekil A.1	: Silindirik sıvı deposunun geometrisi ve koordinat sistemi (Chalhoub ve Kelly, 1990).....	125
Şekil A.2	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$)	138
Şekil A.3	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$)	138
Şekil A.4	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$).....	139
Şekil A.5	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2 - \text{El Centro}$)	139
Şekil A.6	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2 - \text{El Centro}$)	140
Şekil A.7	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 2 - \text{El Centro}$).....	140
Şekil A.8	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3 - \text{El Centro}$)	141
Şekil A.9	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 3 - \text{El Centro}$)	141
Şekil A.10	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 3 - \text{El Centro}$).....	142

Şekil A.11	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85$ – Erzincan).....	142
Şekil A.12	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85$ – Erzincan).....	143
Şekil A.13	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 0.85$ – Erzincan).....	143
Şekil A.14	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2$ – Erzincan).....	144
Şekil A.15	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2$ – Erzincan).....	144
Şekil A.16	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 2$ – Erzincan).....	145
Şekil A.17	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3$ – Erzincan).....	145
Şekil A.18	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 3$ – Erzincan).....	146
Şekil A.19	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 3$ – Erzincan).....	146
Şekil A.20	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85$ – Yarımca).....	147
Şekil A.21	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85$ – Yarımca).....	147
Şekil A.22	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 0.85$ – Yarımca).....	148
Şekil A.23	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2$ – Yarımca).....	148
Şekil A.24	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2$ – Yarımca).....	149
Şekil A.25	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 2$ – Yarımca).....	149
Şekil A.26	: Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3$ – Yarımca).....	150
Şekil A.27	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 3$ – Yarımca).....	150
Şekil A.28	: En büyük çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 3$ – Yarımca).....	151
Şekil B.1	: İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG).....	153
Şekil B.2	: Görelî yer değiştirme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)	153
Şekil B.3	: Görelî hız spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)	154
Şekil B.4	: Sözde görelî hız spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)	154
Şekil B.5	: Mutlak ivme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG).....	155
Şekil B.6	: Sözde mutlak ivme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG) ...	155
Şekil B.7	: İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Erzincan, 1992 - Erzincan DB).....	156
Şekil B.8	: Görelî yer değiştirme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)	156
Şekil B.9	: Görelî hız spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)	157
Şekil B.10	: Sözde görelî hız spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)	157
Şekil B.11	: Mutlak ivme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB).....	158

Şekil B.12	: Sözde mutlak ivme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB).	158
Şekil B.13	: İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)	159
Şekil B.14	: Görelî yer değiştirme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)	159
Şekil B.15	: Görelî hız spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG) ...	160
Şekil B.16	: Görelî hız spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG) ...	160
Şekil B.17	: Mutlak ivme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)	161
Şekil B.18	: Sözde mutlak ivme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)	161
Şekil C.1	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – El Centro (0.4g))	163
Şekil C.2	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 2 – El Centro (0.4g))	164
Şekil C.3	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – El Centro (0.4g))	165
Şekil C.4	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – Erzincan (0.4g))	166
Şekil C.5	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 2 – Erzincan (0.4g))	167
Şekil C.6	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – Erzincan (0.4g))	168
Şekil C.7	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – Yarımca (0.4g))	169
Şekil C.8	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 2 – Yarımca (0.4g))	170
Şekil C.9	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – Yarımca (0.4g))	171
Şekil C.10	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (El Centro (0.4g))	172
Şekil C.11	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Erzincan (0.4g))	173
Şekil C.12	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Yarımca (0.4g))	174
Şekil C.13	: En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – $R_{fps} = 1m$ - $\mu = 0.05$ - El Centro (0.4g))	175
Şekil C.14	: En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – $R_{fps} = 1m$ - $\mu = 0.05$ - Erzincan (0.4g))	176
Şekil C.15	: En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – $R_{fps} = 1m$ - $\mu = 0.05$ - Yarımca (0.4g))	177
Şekil D.1	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – $T_p = 2s$ – El Centro (0.4g))	179

Şekil D.2	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{El Centro (0.4g)}$)	180
Şekil D.3	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - \text{El Centro (0.4g)}$)	181
Şekil D.4	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	182
Şekil D.5	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	183
Şekil D.6	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	184
Şekil D.7	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{Yarımca (0.4g)}$).....	185
Şekil D.8	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{Yarımca (0.4g)}$).....	186
Şekil D.9	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - \text{Yarımca (0.4g)}$).....	187
Şekil D.10	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s - \text{El Centro (0.4g)}$)	188
Şekil D.11	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s - \text{El Centro (0.4g)}$)	189
Şekil D.12	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - \text{El Centro (0.4g)}$)	190
Şekil D.13	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	191
Şekil D.14	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	192
Şekil D.15	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	193
Şekil D.16	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s - \text{Yarımca}$).....	194
Şekil D.17	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s - \text{Yarımca (0.4g)}$).....	195

Şekil D.18	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – Yarımcı (0.4g))	196
Şekil D.19	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – El Centro (0.4g))	197
Şekil D.20	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – El Centro (0.4g))	198
Şekil D.21	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – El Centro (0.4g))	199
Şekil D.22	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Erzincan (0.4g)).....	200
Şekil D.23	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Erzincan (0.4g)).....	201
Şekil D.24	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – Erzincan (0.4g)).....	202
Şekil D.25	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Yarımcı (0.4g)).....	203
Şekil D.26	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Yarımcı (0.4g))	204
Şekil D.27	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – Yarımcı (0.4g))	205
Şekil D.28	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – El Centro (0.4g)).....	206
Şekil D.29	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Erzincan (0.4g))	207
Şekil D.30	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Yarımcı (0.4g)).....	208
Şekil D.31	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – El Centro (0.4g)).....	209
Şekil D.32	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Erzincan (0.4g))	210
Şekil D.33	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Yarımcı (0.4g)).....	211

Şekil D.34	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{El Centro (0.4g)}$).....	212
Şekil D.35	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Erzincan (0.4g)}$).....	213
Şekil D.36	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Yarımca (0.4g)}$).....	214
Şekil E.1	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$).....	216
Şekil E.2	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{El Centro}$).....	217
Şekil E.3	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{El Centro}$).....	218
Şekil E.4	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan}$).....	219
Şekil E.5	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Erzincan}$).....	220
Şekil E.6	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Erzincan}$).....	221
Şekil E.7	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Yarımca}$)	222
Şekil E.8	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Yarımca}$).....	223
Şekil E.9	: Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Yarımca}$).....	224
Şekil E.10	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (El Centro).....	225
Şekil E.11	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Erzincan).....	226
Şekil E.12	: Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Yarımca)	227
Şekil F.1	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{El Centro}$)	229
Şekil F.2	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{El Centro}$)	230
Şekil F.3	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - \text{El Centro}$)	231
Şekil F.4	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{Erzincan}$)	232

Şekil F.5	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)	233
Şekil F.6	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Erzincan)	234
Şekil F.7	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s$ – Yarımca)	235
Şekil F.8	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s$ – Yarımca)	236
Şekil F.9	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Yarımca)	237
Şekil F.10	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – El Centro)	238
Şekil F.11	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – El Centro)	239
Şekil F.12	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – El Centro)	240
Şekil F.13	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – Erzincan)	241
Şekil F.14	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)	242
Şekil F.15	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – Erzincan)	243
Şekil F.16	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – Yarımca)	244
Şekil F.17	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Yarımca)	245
Şekil F.18	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – Yarımca)	246
Şekil F.19	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – El Centro)	247
Şekil F.20	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – El Centro)	248

Şekil F.21	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – El Centro)	249
Şekil F.22	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Erzincan)	250
Şekil F.23	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)	251
Şekil F.24	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – Erzincan)	252
Şekil F.25	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Yarımca).....	253
Şekil F.26	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Yarımca).....	254
Şekil F.27	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s$ – Yarımca)	255
Şekil F.28	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – El Centro).....	256
Şekil F.29	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Erzincan)	257
Şekil F.30	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Yarımca)	258
Şekil F.31	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – El Centro).....	259
Şekil F.32	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Erzincan).....	260
Şekil F.33	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Yarımca)	261
Şekil F.34	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – El Centro).....	262
Şekil F.35	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Erzincan).....	263
Şekil F.36	: Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Yarımca)	264

SEMBOL LİSTESİ

A	: Bouc-Wen model parametresi
A_k	: Kauçuk katman alanı
A_p	: Kurşun çekirdeğin alanı
A_c	: Depo duvarının kesit alanı
α	: Bouc-Wen model parametresi
α_1	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 1.modunun katkı oranı
α_2	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 2.modunun katkı oranı
$\alpha_{lr b}$	: Kurşun çekirdekli mesnetlerin akma sonrası rijitliğinin elastik rijitliğine oranı
β	: Bouc-Wen model parametresi
c_0	: Darbesel hidrodinamik basıncın depo duvarı yüksekliği boyunca dağılımını veren fonksiyon
c_b	: Sismik yalıtım sisteminin sönüm katsayısı
c_j	: j. devinimli moda ait hidrodinamik basıncın depo duvarı yüksekliği boyunca dağılımını veren fonksiyon
c_{LRB}	: Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcının sönüm katsayısı
c_s	: Yapının sönüm katsayısı
C_0	: Darbesel hidrodinamik basıncın sıvı yüksekliği boyunca dağılımını veren fonksiyon
C_j	: j. devinimli mod için sıvı yüksekliği boyunca hidrodinamik basıncın dağılımını veren fonksiyon
d	: Çalkalanma sonucu sıvının serbest yüzeye göre yaptığı yer değiştirme
d_w	: Yer hareketi doğrultusunda sıvının depo ile temas eden noktasının yer değiştirmesi
d_{max}	: En büyük çalkalanma yüksekliği
D_y	: Kurşun çekirdekli mesnetlerin akma yer değiştirmesi
ΔM_i	: Darbesel bileşenin depo tabanında oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti artışı
ΔM_c	: Devinimli bileşenin depo tabanında oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti artışı
Δh_0	: Darbesel bileşenin depo tabanında oluşturduğu eğilme momenti artışından kaynaklanan yükseklik artışı
Δh_j	: j. devinimli modun depo tabanında oluşturduğu eğilme momenti artışından kaynaklanan yükseklik artışı
ε	: Sismik yalıtım sisteminin açısal frekansının, üstyapı açısal frekansına oranının karesi
F	: Dış kuvvet potansiyeli
F_b	: Sismik yalıtım sisteminde oluşan kuvvet
F_{fps}	: Sürtünmeli sarkaç mesnedinde oluşan yanıl kuvvet
$F_{lr b}$	: Sürtünmeli sarkaç mesnedinde oluşan yanıl kuvvet
F_{rb}	: Elastomer yalıtıcıda oluşan yanıl kuvvet
F_{vd}	: Viskos sıvı sönümleyicilere etkiyen kuvvet

f	: Sürtünme kuvveti
g	: Yer çekimi ivmesi
G_k	: Kauçuğun kayma modülü
G_p	: Kurşun çekirdeğin kayma modülü
γ	: Üst yapı kütesinin toplam kütleyle oranı
γ_{bw}	: Bouc-Wen model parametresi
H	: Depo içerisindeki sıvı yüksekliği
h_0	: Darbesel kütlelerin depo tabanından yüksekliği
h'_0	: Temelde oluşan eğilme momentinin hesaplanmasında kullanılan darbesel kütlelerin depo tabanına göre yüksekliği
h_j	: j.nci devinimli moda ait kütlelerin depo tabanından yüksekliği
h'_j	: Temelde oluşan eğilme momentinin hesaplanmasında kullanılan j.nci devinimli moda ait kütle yüksekliği
h_k	: Kauçuk katmanların toplam yüksekliği
I	: Depo duvarının atalet momenti
I_1	: Birinci tip ve birinci mertebeden modifiye Bessel fonksiyonu
I_2	: Birinci tip ve ikinci mertebeden modifiye Bessel fonksiyonu
J_1	: Birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonu
k_e	: Kurşun çekirdekli mesnetlerin elastik rijitliği
k_p	: Kurşun çekirdekli mesnetlerin akma sonrası rijitliği
k_b	: Sismik yalıtım sisteminin yanal rijitliği
k_{eff}	: Etkili yanal rijitlik
k_s	: Üst yapının yanal rijitliği
L	: Depo yüksekliği
L_{ζ}	: Depo çatısının ağırlık merkezinin tabana olan yüksekliği
L_T	: Depo duvarının ağırlık merkezinin tabana olan yüksekliği
λ_j	: $J_1(\lambda) = 0$ denkleminin j. kökü
M'	: Depo temelinde oluşan eğilme momenti
M_i	: Darbesel bileşenin depo duvarında oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti
M_c	: Devinimli bileşenin depo duvarında oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti
M_T	: Sismik yalıtım sistemi üzerindeki toplam kütle
M_{max}	: Depo duvarında oluşan en büyük eğilme momenti
M'_{max}	: Depo temelinde oluşan en büyük eğilme momenti
m	: Yapının kütlesi
n	: Viskos sıvı sönmüleyicilerde piston başının geometrisine bağlı olarak değişen katsayı
m_0	: Darbesel kütle
m_b	: Yalıtım sistemi üzerindeki toplam rijit kütle
m_c	: Toplam devinimli kütlesi
m_j	: j.nci devinimli moda ait kütle
m_l	: Depo içerisindeki toplam sıvı kütlesi
m_t	: Yalıtım sistemi üzerindeki tabliye ve boş deponun toplam kütlesi
m_T	: Depo duvarının kütlesi
m_{ζ}	: Depo çatısının kütlesi
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_{min}	: Sürtünme katsayısının minimum değeri
μ_{max}	: Sürtünme katsayısının en büyük değeri

η	: Bouc-Wen model parametresi
P	: Toplam sıvı basıncı
p	: Hidrodinamik basınç
p_i	: Darbesel bileşenin sıvının herhangi bir noktasında oluşturduğu hidrodinamik basınç
p_c	: Devrimli bileşenin sıvının herhangi bir noktasında oluşturduğu hidrodinamik basınç
p_{max}	: Depo duvarının herhangi bir noktasında oluşan hidrodinamik basıncın en büyük değeri
$\bar{p}_{max}$	: Depo duvarının herhangi bir noktasında oluşan hidrodinamik ve hidrostatik basınç toplamının en büyük değeri
ζ_1	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 1.modunun sönüm oranı
ζ_2	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 2.modunun sönüm oranı
ζ_b	: Sismik yalıtım sisteminin sönüm oranı
ζ_s	: Üst yapının sönüm oranı
ϕ	: Hız potansiyeli fonksiyonu
ϕ_i	: Hız potansiyeli fonksiyonunun darbesel bileşeni
ϕ_c	: Hız potansiyeli fonksiyonunun devrimli bileşeni
ψ	: Teflon-çelik arayüzü tipine ve düşey basınca göre değişen parametre
Q	: Taban kesme kuvveti
Q_i	: Taban kesme kuvvetinin darbesel bileşeni
Q_c	: Taban kesme kuvvetinin devrimli bileşeni
Q_{max}	: Taban kesme kuvvetinin en büyük değeri
ρ_l	: Depo içerisindeki sıvının özkütlesi
R	: Depo yarıçapı
R_{fps}	: Sürtünmeli sarkaç sistemi yarıçapı
$\sigma_{\theta,max}$	: Depo duvarında oluşan çevresel gerilmelerin en büyük değeri
$\sigma_{z,max}$	: Depo duvarında oluşan normal gerilmelerin en büyük değeri
T_{rb}	: Elastomer yalıtım sisteminin titreşim periyodu
T_p	: Akma sonrası rijitlikten elde edilen sismik yalıtım periyodu
τ_{max}	: Depo duvarında oluşan kayma gerilmelerinin en büyük değeri
Θ	: Hız potansiyeli fonksiyonu
u_b	: Yalıtım sistemi üzerindeki kütlenin mutlak yanal yer değiştirmesi
$\dot{u}_b$	: Yalıtım sistemi üzerindeki kütlenin mutlak yanal hızı
$\ddot{u}_b$	: Yalıtım sistemi üzerindeki kütlenin mutlak yanal ivmesi
u_g	: Deprem hareketi nedeniyle zemin serbest yüzeyinin yatayda yer değiştirmesi
$\dot{u}_g$	: Deprem hareketi nedeniyle zemin serbest yüzeyinin yatayda hızı
$\ddot{u}_g$	: Yer ivmesi
$\ddot{u}_{g,max}$	: Yer ivmesinin en büyük değeri
u_s	: Üst Yapının mutlak yanal yer değiştirmesi
$\dot{u}_s$	: Üst yapının mutlak yanal hızı
$\ddot{u}_s$	: Üst yapının mutlak yanal ivmesi
v_s	: Üst yapının sismik yalıtım sistemine göre göreceli yer değiştirmesi
$\dot{v}_s$	: Üst yapının sismik yalıtım sistemine göre göreceli hızı

$\ddot{v}_s$	: Üst yapının sismik yalıtım sistemine göre görelî ivmesi
v_b	: Sismik yalıtım sisteminin zemine göre görelî yer değıştirmesi
$\dot{v}_b$	: Sismik yalıtım sisteminin zemine göre görelî hızı
$\ddot{v}_b$	: Sismik yalıtım sisteminin zemine göre görelî ivmesi
v_n	: Sıvı içerisinde rastgele bir noktada t anında n yönündeki hız
T_{fps}	: Sürtünmesiz durum için elde edilen sarkaç periyodu
t_w	: Duvar kalınlığı
ω_1	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 1.modunun açısal titreşim frekansı
ω_2	: Sismik yalıtımlı yapı sisteminin 2.modunun açısal titreşim frekansı
ω_b	: Sismik yalıtım sistemine mesnetlenen, rijit ve M kütlesine sahip yapının açısal titreşim frekansı
ω_j	: j. devinimli modun açısal frekansı
ω_{rb}	: Elastomer yalıtım sisteminin açısal titreşim frekansı
ω_s	: Üst yapının açısal titreşim frekansı
Y	: Bouc-Wen model parametresi
Z	: Boyutsuz çevrimsel değışken

SİSMİK YALITIMLI DÜŞEY SİLİNDİRİK SIVI DEPOLARININ DEPREM YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Sıvı depoları; başlıca yakıt, endüstriyel kimyasallar, kullanma ve yangın söndürme suyu depolamakta kullanılan önemli mühendislik yapılarıdır. Bu yapıların depremlerde hasar görmeleri, doğrudan ya da dolaylı maddi kayıplara ve çevresel felaketlere yol açabilmektedirler. Stratejik yakıt ve su depolarının önemli bir kısmının yüksek sismik risk altında bulunan bölgelerde bulunması, bu yapıların dinamik modellenmesi konusunda çok sayıda araştırma yapılmasını zorunlu kılmıştır. Bu araştırmalarda sürekli sıvı kütlesinin depo tabanına yakın olan kısmının depoyla beraber hareket ettiği ve serbest yüzeye yakın kısmının ise uzun periyotlu bir çalkalanma hareketi yaptığı belirtilmiştir. Bu doğrultuda geliştirilen dinamik modellerde sürekli sıvı kütlesi, depoyla beraber hareket eden darbesel bileşen ve çalkalanma hareketinden sorumlu olan uzun periyotlu devinimli bileşeni ile temsil edilmektedir. Zemin üzerine doğrudan mesnetlenen sabit tabanlı depoların duvarlarında ve tabanında oluşan hidrodinamik basıncın büyük bir bölümü darbesel bileşenden kaynaklanmaktadır.

Sıvı depolarında oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmalarında; sıvı depolarının enerji sönümleme mekanizmalarının oldukça kısıtlı olmasından dolayı depremlerde kötü performans sergiledikleri ve depreme dayanımlarının arttırılması için yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerektiği vurgulanmıştır. Sıvı depolarını depremin olumsuz etkilerinden korumayı hedefleyen yeni tekniklerden biri de sismik yalıttır. Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla sıvı depolarının sönüm kapasitelerinin arttırılması ve periyot uzaması etkisiyle depo içerisinde darbesel bileşenden kaynaklanan hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır.

Yakın geçmişte sismik yalıtım ve enerji sönümleme sistemleri, kritik öneme sahip yakıt, kimyasal ve yangın söndürme suyu depolarında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüz itibarıyla, sismik yalıtım sistemlerinin sıvı depolarında kullanımı gün

geçtikçe artmaktadır. Ancak, sismik yalıtım sisteminin uygulandığı sıvı depolarının deprem yükleri altındaki davranışları ile ilgili oldukça sınırlı bilgi bulunmaktadır. Su ve yakıt depolarının boyutlandırılmasında kullanılan yönetmeliklerde de sismik yalıtım ve enerji sönüm sistemlerinin kullanılması durumu için özel hükümler bulunmamaktadır.

Sismik yalıtım bileşenlerinin doğrusal olmayan davranışı, mekanik özelliklerinin çevre koşulları, yaşlanma, yükleme koşulları vb.. nedeniyle zaman içerisinde değişimi ve depo içerisindeki çalkalanma hareketinin etkisi, depo ve sismik yalıtım sisteminin tasarımını zorlaştırmaktadır. Ülkemizde bulunan mevcut stratejik sıvı depolarının hangi özelliklere sahip olanlarının, bu yöntem ile etkin olarak korunabileceğinin belirlenmesi ve yeni inşa edilecek sismik yalıtımlı depoların projelendirilmesi için kullanılabilecek yöntemlerin ve araçların geliştirilmesi gerekmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, günümüz itibarıyla inşa edilmiş ya da inşaatı devam eden sismik yalıtımlı sıvı depo projeleri, bu projelerde kullanılan sismik yalıtım sistem tipleri ve depo tasarımında kullanılan yönetmelikler incelenmiştir. İnceleme sonucunda sismik yalıtım sisteminin büyük çoğunlukla silindirik yakıt depolarında uygulandığı ve en çok kullanılan sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin ise sürtünmeli sarkaç ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetler olduğu görülmüştür. Sürtünmeli sarkaç sistemi ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetleri Bouc-Wen modeli ile modellenmiştir. Sıvı depolarında taban hareketi nedeniyle oluşan hidrodinamik etkilerin hesaplanmasında kullanılan analitik modeller incelenmiş ve yürütülecek parametrik çalışmada Veletsos ve Chalhoub tarafından geliştirilen modellerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Bir sonraki aşamada, sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerinin, yükleme koşulları ya da zaman içerisinde çevresel etkiler nedeniyle değişiminin, depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla MATLAB üzerinde çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Bu program kullanılarak, sürtünmeli sarkaç ve kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerin değişiminin depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentlerinin üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla analizler yapılmıştır. Sismik yalıtım sistemi parametrelerinin depo davranışına olan etkileri Bölüm 4 ve Bölüm 5'te ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla depoda oluşan taban ivmesinin en büyük değerinin, sabit tabanlı durum için elde edilen değerin %5-10'u mertebesine indirilebildiği görülmüştür. Ancak taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarında depo geometrisine bağlı olarak önemli farklılıklar olabilmektedir. Buradan, sadece taban ivmesine bağlı olarak performansın değerlendirilmesinin yanıltıcı olabileceği görülmektedir. Depo tabanı ivmesindeki azalma oranının, taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentlerindeki azalma oranlarına kıyasla yüksek olması, periyot uzaması etkisiyle uzun periyotlu devinimli bileşeninden kaynaklanan hidrodinamik basınçların artmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu etki, özellikle devinimli kütlelerinin toplam sıvı kütesine olan oranının yüksek olduğu yayvan depolarda daha çok hissedilmektedir. Bu nedenden dolayı, sıvı yüksekliğinin depo yarıçapına oranının 0.85'ten küçük olduğu yayvan sıvı depolarında sismik yalıtım sisteminin kullanılmasının depo tasarım kuvvetlerinde önemli ölçüde azalma sağlamayacağı kabul edilmiştir.

Ön tasarım aşamasında, deponun inşa edileceği alanın çevre koşulları ve deponun hizmet süresi göz önünde bulundurularak sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerin değişim sınırlarının tespit edilmesi ve bu çalışmada gösterildiği şekilde söz konusu sınırlar içerisinde yapılacak parametrik çalışma ile hidrodinamik etkilerdeki değişim oranlarının sabit tabanlı durumda elde edilen değerlere göre normalize edildiği grafikler yardımıyla sunulması sismik yalıtım bileşenlerinin boyutlandırılmasını ve depo tasarımında kullanılacak taban kesme kuvveti ile eğilme momenti değerlerinin belirlenmesini önemli ölçüde kolaylaştıracaktır. Başka bir önemli konu da, analizlerde kullanılacak ivme kayıtlarıdır. Deprem hareketinin frekans içeriği, en büyük hız ve yer değiştirme değerleri depo davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, deponun inşa edileceği bölgeye uygun ivme kayıtlarının türetilmesi ve analizlerin bu kayıtlarla yapılması daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

Sismik yalıtım sistemi parametrelerinin belirlenmesinde, depo tasarım kuvvet ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarına ek olarak mesnet yer değiştirmeleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Zira, yüksek mesnet yer değiştirmeleri sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin maliyetlerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

EVALUATION OF THE SEISMIC RESPONSE OF BASE-ISOLATED UPRIGHT CYLINDRICAL LIQUID STORAGE TANKS

SUMMARY

Liquid storage tanks are critical elements of infrastructure systems that are primarily used to store fuel, industrial chemicals and water. Failure of these structures during earthquakes can lead to direct or indirect financial losses and environmental catastrophies. The fact that a great majority of strategic fuel and water tanks are located in regions of high seismicity has motivated research in developing models to predict their response. The results of this research show that the bottom portion of the contained liquid moves in unison with the tank while the portion near the free surface oscillates with a long period sloshing motion. Dynamic models built on this principle make the assumption that the continuous liquid media can be represented with two components: a short period impulsive component and a long period convective component responsible for the sloshing motion. Impulsive component is predominantly responsible for the hydrodynamic pressures acting on the tank wall and foundation in ground supported liquid storage tanks.

Field studies conducted by various researchers to investigate the seismic damage mechanisms of liquid tanks reveal that these structures generally perform poorly during earthquakes due to a lack of a substantial ductility mechanism that can dissipate large amounts of energy and that new methods should be developed to increase their performance. Seismic isolation is an example of these new methods that aims to protect the liquid storage tank against earthquakes by increasing their energy dissipation capacity and by lengthening its vibration period to decrease the hydrodynamic pressures generated by the short period impulsive component.

Recently, the application of seismic isolation and energy dissipation systems has been extended to critical fuel, chemical and fire-fighting water storage tanks. Although there are only a few seismically isolated liquid storage tanks, the number is steadily increasing. However, information on the observed performance of isolated

tanks subjected to strong earthquakes is very limited and there are no provisions for these structures in the current tank design codes. Sloshing phenomena and the nonlinear behavior of seismic isolation components which have mechanical characteristics that are subject to change due to aging, environmental and loading conditions etc. complicates the design of both the tank and the seismic isolation system. Therefore there is a growing need to develop new methods and tools to design and evaluate seismically isolated tanks as well as assess which types of liquid storage tanks in Turkey would benefit from seismic isolation.

In the initial phase of the study, an extensive literature review was carried out to gather information pertaining to tank geometries and seismic isolation systems used in existing seismically isolated liquid storage tank applications. Seismic provisions of codes for ground supported tanks were also examined to extract the vital parameters controlling tank design. It was seen that seismic isolation is mostly applied to upright cylindrical fuel tanks and that friction pendulum and lead rubber bearings are the most commonly used components in the existing applications.

Friction pendulum and lead rubber bearings were modelled with the Bouc-Wen model. Analytical models used to calculate the hydrodynamic effects generated in cylindrical liquid storage tanks subject to horizontal base excitation were examined and models developed by Veletsos and Chalhoub were selected to be used in the parametric analysis.

A MATLAB application was developed to evaluate the effects of potential changes on the mechanical characteristics of isolation components over time due to loading or environmental conditions on the tank design parameters. The effects of changes in friction pendulum and lead rubber bearing design parameters on the forces and bending moments used in the tank design were evaluated with this application. The effects of component parameter variations on tank design are delineated on Sections 4 and 5 of this dissertation.

It was observed that it is possible to decrease the base acceleration values to 5-10 % of the values obtained for the ground supported tank through seismic isolation. However, it was also observed that the level of decrease in the tank design forces and bending moments can be significantly lower depending on the tank geometry and the properties of the earthquake excitation. Therefore, making a design decision solely based on the level of drop in peak base acceleration can be misleading. This is due

to the amplification of the response of the long period convective component in response to period elongation provided by the isolation system. Hence, seismic isolation is unlikely to lower the tank design forces significantly in broad tanks with aspect ratios of less than 0.85, where the effect of the convective component is more pronounced.

Parametric analysis of the isolated tank within the limits of potential variations of components' mechanical properties determined from the environmental conditions in the vicinity of the tank and evaluation of the fluctuations in the levels of change in hydrodynamic effects with respect to the values obtained for the ground supported tank through normalized graphics as prescribed in this dissertation significantly facilitates the design of the seismic isolation system and the estimation of the forces and bending moments to be used in tank design. Another issue is the time-history records to be used in the analyses. Tank response is significantly effected by the frequency content, maximum velocity and displacement values of the base excitation. Therefore the use of site-specific time history records in the analyses will more likely yield realistic results.

Maximum value of the bearing displacement should also be taken in to account in addition to the levels of decrease in the tank design forces and bending moments when selecting the isolation system parameters, since excessive bearing displacements require large bearings which significantly increase the overall cost of the seismic isolation system.

1. GİRİŞ

1.1. Sıvı Depolarının Deprem Hareketi Altındaki Davranışı

Sıvı depoları; başlıca yakıt, endüstriyel kimyasallar ve su depolamakta kullanılan önemli mühendislik yapılarıdır. Hasar görmeleri durumunda doğrudan ya da dolaylı olarak maddi ve çevresel hasarlara yol açabilmektedirler.

1906 San Francisco depreminde yangın söndürme sistemlerinde kullanılan su depolarının önemli bir bölümünün hasar görmesinden dolayı yangınlar kontrolden çıkmıştır ve depremde sonra bölgeye uzun süre su sağlanamamıştır. (Liu ve diğ., 1996). Yakıt ve kimyasal madde depolarında depremde oluşan hasarlar, can ve mal kaybına ek olarak büyük boyutlarda çevre felaketlerine sebep olabilmektedir. Söz konusu depolarda çıkan yangınların söndürülmesi oldukça güç olmaktadır. Depoların birbirine yakın olduğu durumlarda yangının komşu depolara sıçraması sorunu daha da büyütebilmektedir. Depolarda oluşan hasar nedeniyle sızan kimyasallar ve yangınlarda ortaya çıkan duman, bölgede oldukça ciddi çevre sorunlarının oluşmasına neden olabilmektedir. Yakıt ve kimyasal depolarında meydana gelen hasarlar 1999 Kocaeli depreminde, önemli ekonomik kayıplara ve çevresel hasarlara neden olmuştur. Tüpraş rafinerisinde bulunan nafta yakıt depolarının içerisindeki sıvının çalkalanması sonucu yüzen-çatı ve depo duvarı arasındaki birleşimler hasar görmüştür. Hasar gören birleşimler nedeniyle, bazı depolarda yüzen-çatılar dibe çökmüş ve sıvı depo dışına taşmıştır. Yine hasar gören birleşimler nedeniyle, depo duvarı ile hareket eden yüzen-çatı temas etmiş ve bunun sonucu depoların birinde oluşan kıvılcıklar yangın çıkmasına neden olmuştur. Yangın, çevredeki nafta depolarına da yayılmış ve önemli ekonomik kayba neden olmuştur (Yazıcı ve Çılı, 2005). Tüpraş rafinerisinde bulunan Nafta yakıt depolarında oluşan hasarlar Şekil 1.1’de görülmektedir.

İzmit’de bulunan Habaş Sınai ve Tıbbi Gaz Depolama Tesisleri’nde bulunan iki sıvılaştırılmış oksijen deposu da Kocaeli depreminde hasar görmüştür. Sıvılaştırılmış oksijen depolarını taşıyan kolonlar tahrip olmuştur. Bunun sonucu, depolar devrilmiş

ve sıvılaştırılmış oksijen depolarının dışarısına çıkmıştır (Aydan ve diğ., 1999). Habaş depolama tesislerinde meydana gelen hasarlar Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.1 : Tüpraş rafinerisinde oluşan yangın hasarı (National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley)



Şekil 1.2 : Habaş rafinerisindeki oksijen depolarında oluşan hasar (National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley)

Sıvı depolarında depremlerde oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmaları yapılmıştır. Steinbrugge ve Rodrigo, 1960 Şili depreminde sıvı depolarının performansını incelemiştir (Steinbrugge ve Rodrigo, 1963). Manos, 1977 San Juan depreminde depoların davranışını incelemiştir (Manos, 1991). Haroun, 1979 Imperial Valley depreminde bazı ankrajlanmamış petrol depolarının yerden kalktıklarını ve tabanlarında “fil ayağı” tipi burkulma oluştuğunu rapor etmiştir (Haroun, 1983). Niwa ve Clough, 1980 California Livermore depreminde depoların davranışını incelemiştir (Niwa ve Clough, 1982). Nielsen tarafından yapılan bir araştırmada 1933 ile 1983 yılları arasında petrol rafinerilerinde deprem nedeniyle oluşan deprem hasarları detaylı olarak incelenmiş ve performanslarının artırılması gerektiğinin altı

izilmiştir (Nielsen, 1986). Wylie ve diğ. 1985 şili depreminde sıvı depolarının performansını incelemiştir (Wylie ve diğ., 1986). Lau ve diğ. 1994 California Northridge depreminde depoların davranışını incelemiştir (Lau ve diğ., 1995). Endüstriyel yapıların ve altyapı sistemlerinin 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde gösterdiğı performans birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Aydan ve diğ., 1999) (Erdik, 2000) (Hamada, 1999) (Sezen, 2006).

Söz konusu saha araştırmalarında sıvı depolarının oldukça kötü performans sergiledikleri ve deprem dayanımlarının arttırılması için yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerektiğı vurgulanmıştır (Malhotra, 2000). Buna ek olarak, sıvı depolarında aşağıda belirtilen hasarların gözleendiğı rapor edilmiştir.

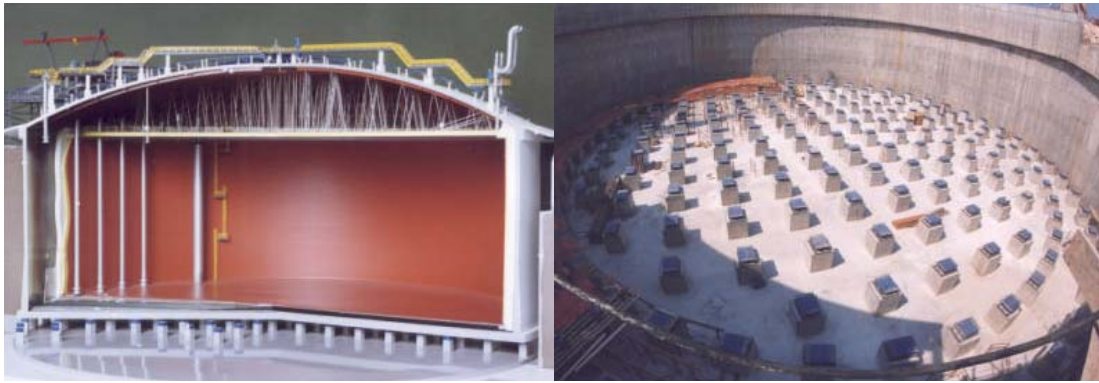
- Depo tabanında oluşan “fil ayağı” tipi burkulma
- Emme etkisiyle deponun üst bölümünde oluşan burkulma.
- Çatıyı taşıyan kolonların hidrodinamik etkilerle hasar görmesi
- Yüzen çatılı sıvı depolarında şiddetli çalkalanma sonucu çatı-depo duvarı birleşiminin hasar görmesi
- Depo tabanının yerden kalması nedeniyle taban-duvar birleşiminin ayrılması
- Depo temelinin göçmesi
- Depoya bağılı boru tesisatının kırılması
- Depoyu taşıyan kolonların hasar görmesi
- Deponun içerisindeki sıvının çalkalanma nedeniyle dışarı taşması
- Deponun kayması

Sıvı depolarını depremin olumsuz etkilerinden korumayı hedefleyen yeni tekniklerden biri de sismik yalıttır. Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla sıvı depolarının sönüm kapasitelerinin arttırılması ve depo içerisinde oluşan hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır. Sismik yalıtım sistemlerinin sağıladığı diğeri bir avantaj da hasarın kolaylıkla değıştirilebilecek elemanlarda yoğunlaşmasıdır.

Yakın geçmişte sismik yalıtım ve enerji sönümleme sistemleri, çevre felaketlerine yol açabilecek yakıt ve kimyasal depolarında ve yangın söndürme suyu depolarında kullanılmaya başlamıştır. Takip eden bölümde sismik yalıtım sisteminin sıvı depolarında uygulamaları incelenmiş ve kullanılan sismik yalıtım sistem tipleri not edilmiştir.

1.2. Sismik Yalıtımlı Sıvı Depolarının Dünyadaki Uygulamaları

Sismik yalıtım sisteminin sıvı depolarında uygulandığı en büyük projelerden biri Yunanistan'ın Revithoussa bölgesinde inşa edilen sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) depolama tesisleridir. Söz konusu tesiste bulunan 69 m çapında ve 32 m yüksekliğindeki iki depoda 72000 m³ LNG depo edilmektedir. Bu depolar, Yunanistan'ın LNG ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılamaktadır (Zayas ve Low, 1996). Depoların kesiti ve depoların altına yerleştirilen sürtünmeli sarkaç mesnetleri Şekil 1.3'de gösterilmektedir (Whittaker, 2003).



Şekil 1.3 : Yunanistan'da bulunan sismik yalıtımlı sıvılaştırılmış doğal gaz deposu (Whittaker, 2003)

Kentucky'de New Madrid fay hattına yakın olan ISP Chemicals tesisinde bulunan 190 m³ kapasiteli bir amonyak deposunda sismik yalıtım sistemi kullanılmıştır. Bu projede, sürtünmeli sarkaç mesnetleri, çapı 3.65 m ve boyu 18.30 m olan silindir amonyak deposunu taşıyan betonarme kolonların üzerine yerleştirilmiştir. Söz konusu amonyak deposu Şekil 1.4'de görülmektedir (Zayas, 1996).

Pittsburg, Kaliforniya'da bulunan Dow Chemicals tesisinde yükseltilmiş bir su deposu sismik yalıtım sistemi ile güçlendirilmiştir. Tesiste çıkabilecek yangınları söndürmekte kullanılacak çelik depo ve temeli 1930 yılında inşa edilmiştir. Günümüz deprem yönetmeliklerine göre yetersiz kalan deponun çelik iskeletinin altına yerleştirilen sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yerleşimi Şekil 1.5'de görülmektedir (Zayas, 1996).

Güney Kore'nin Seul şehrinde bulunan Incheon doğal gaz depolama tesislerinde bulunan 68 m çaplı ve 30 m yüksekliğinde 100000 m³ kapasiteli 3 LNG deposunda sismik yalıtım sistemi kullanılmıştır (Şekil 1.6) (Koh ve diğ., 1996).

Bu uygulamadan sonra Pyeong-taek tesislerinde 10 LNG deposuna da sismik yalıtım sistemi uygulanmıştır (Martelli, 2006). Söz konusu depoların tümünde yüksek sönümlü kauçuk mesnetleri kullanılmıştır.



Şekil 1.4 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin üzerine mesnetlenen amonyak deposu (Zayas, 1996)



Şekil 1.5 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin üzerine mesnetlenen su deposu (Zayas, 1996)



Şekil 1.6 : Incheon tesislerinde bulunan LNG depoları (www.lussas.com)

İzmir’de Aliğa Egegaz tesislerinde inşa edilen 36 m yüksekliğinde, 85 m çapında ve 140000 m³ kapasiteye sahip 2 LNG deposunda kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler ve düşük sönümlü kauçuk mesnetler beraber kullanılmıştır. Bu uygulamada, sınırda kalan 112 mesnette kurşun çekirdekli mesnetler, iç kısımda kalan 221 mesnette ise

düşük sönümlü kauçuk mesnetler beraber kullanılmıştır. Sismik yalıtımlı depolar ve sismik yalıtım sistemi elemanları Şekil 1.7’de gösterilmiştir (Martelli, 2006).



Şekil 1.7 : İzmir-Aliaga Egegaz tesislerinde bulunan sismik yalıtımlı LNG depoları (Martelli, 2006)

İsviçre’de Visp kimyasal tesislerinde bulunan 15 m çapında ve 16 m yüksekliğinde olan 2 LNG deposu yürürlükte olan deprem yönetmeliğinin koşullarını yerine getiremedikleri için taşıyıcı sistemleri sismik yalıtım sistemi ile güçlendirilmiştir. Bu projede, sismik yalıtım sistemi olarak yüksek sönümlü kauçuk mesnetler kullanılmıştır. Söz konusu mesnetler, deposu taşıyan mevcut 26 kolonun üzerine yerleştirilmiştir (Bachmann and Wenk, 2000).



Şekil 1.8 : İsviçre’de Visp kimyasal depolama merkezinde bulunan sismik yalıtımlı LNG deposu (Bachmann ve Wenk, 2000)

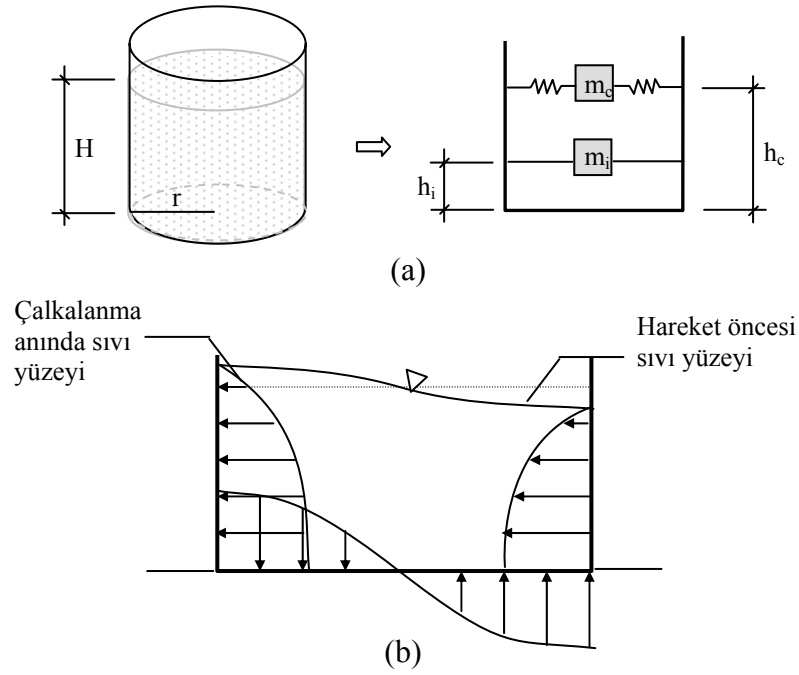
Söz konusu depolar Şekil 1.8’de gösterilmiştir. İsviçre’de 700 ton kapasiteli bir küresel sıvılaştırılmış gaz deposuna da sismik yalıtım sistemi uygulanmıştır. Mevcut 8 betonarme kolonun tabanlarına yerleştirilen yüksek sönümlü kauçuk mesnetler Şekil 1.9’da gösterilmiştir (Bachmann, 2002).



Şekil 1.9 : İsviçre’de bulunan sismik yalıtımlı küresel sıvılaştırılmış gaz deposu (Bachmann, 2002)

1.3. Sıvı Depolarının Tasarımında Kullanılan Yönetmelikler

Stratejik yakıt ve su depolarının önemli bir kısmının yüksek sismik risk altında bulunan bölgelerde bulunması, bu yapıların dinamik modellenmesi konusunda çok sayıda araştırma yapılmasına ve bu araştırmaların sonuçlarından yararlanan tasarım yönetmeliklerin oluşturulmasını zorunlu kılmıştır. Sıvı depolarının tasarımında kullanılan yönetmeliklerin önemli bir bölümü Housner’in 1950’lerde deprem hareketine maruz kalan rijit silindir sıvı depolarının davranışı üzerine yaptığı çalışmalara dayanmaktadır (Housner, 1957)(Housner, 1963). Housner tarafından öne sürülen modelde sürekli sıvı kütlesi, darbesel kütle ve devinimli kütlesi olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu modelde darbesel kütle, deponun alt kısmında bulunan ve depoya beraber rijit olarak hareket eden sıvı kütlesini; devinimli kütlesi ise deponun üstünde bulunan ve çalkalanmaya neden olan sıvı kütlesini göstermektedir (Şekil 1.10). Wozniak ve Mitchell, Housner’ın modelini silindir çelik petrol depolarına uyarlamıştır (Wozniak ve Mitchell, 1978). Bu uyarlama, silindir çelik petrol depolarının tasarımında kullanılan API (American Petroleum Institute) şartnamelerine taban oluşturmuştur. Veletsos tarafından 1984 yılında rijit ve esnek duvarlı sıvı depolarının deprem etkisindeki davranışı üzerine hazırlanan rapor ise Yeni Zellanda ve Eurocode yönetmeliklerinde hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Veletsos, 1984).



Şekil 1.10 : (a) Housner (Housner, 1957) (Housner, 1963) tarafından deprem hareketine maruz kalan rijit duvarlı silindirik sıvı hazneler için geliştirilmiş model. (b) Depo duvarında ve tabanında oluşan hidrodinamik basınç (Myers, 1997)

Sıvı depolarının tasarımında sık olarak kullanılan yönetmeliklerin listesi Tablo 1.1’de verilmiştir. Söz konusu yönetmelikler, Jaiswal tarafından hazırlanan raporda (Jaiswal ve diğ.,2004) sıvı depolarının tasarımında etkili olan parametreler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

Söz konusu raporda;

- Depo duvarının ve temelini tasarımında etkili olan hidrodinamik basınç dağılımının, taban kesme kuvvetinin ve eğilme momentinin,
- Çalkalanan sıvının depodan taşmasını engellemek için en büyük sıvı yüksekliği ile depo çatısı arasında bırakılan boşluğun hesabında kullanılan hesap yöntemleri ve bu yöntemlerin teorik altyapısı ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

1.4. Sismik Yalıtımlı Depolar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Sismik yalıtım sisteminin sıvı depoları üzerindeki etkisi deneysel olarak Chalhoub ve Kelly tarafından incelenmiştir (Chalhoub ve Kelly, 1988) (Chalhoub ve Kelly, 1990). Deneysel çalışmada 1.2 m çapında, 0.6 m yüksekliğinde ve cidarı 1 mm kalınlığında 2 sıvı deposu kullanılmıştır. Depolardan biri doğrudan sarsma tablasına, diğeri ise

sarsma tablasının üzerinde bulunan 9 katlı sismik yalıtımlı yapı modelinin tabanına monte edilmiştir. Çalışmada sismik yalıtımlı depo duvarında oluşan hidrodinamik basıncın sabit tabanlı depoya göre azaldığı ancak sismik yalıtımlı depoda sıvının sabit tabanlı depoya göre daha çok yükseldiği görülmüştür.

Tablo 1.1 : Sıvı depolarının analizinde ve boyutlandırmasında kullanılan yönetmelikler

ACI 350	Betonarme çevre mühendisliği yapıları için yönetmelik
ACI 350.3	Betonarme sıvı depolarının depreme dayanıklı tasarımı için yönetmelik
ACI 371	Yükseltilmiş betonarme sıvı depolarının analizi, tasarımı ve inşaatı için yönetmelik
API 650	Kaynak bileşimli çelik yakıt depoları için yönetmelik
AWWA D-100	Kaynak bileşimli çelik su depoları için yönetmelik
AWWA D-103	Bulon çelik su depoları için yönetmelik
AWWA D-110	Öngermeli betonarme silindir su depoları için yönetmelik
AWWA D-115	Çevresel tendonlar ile takviye edilmiş öngermeli betonarme silindir su depoları için yönetmelik
Eurocode 8	Bölüm 4: Silolar, depolar ve boru hatları
NZS 3106	Betonarme sıvı depolarının depreme dayanıklı tasarımı için yönetmelik

Kim ve Lee, sismik yalıtımlı depoların performansının deneysel değerlendirilebilmesi için bir yöntem geliştirmiştir (Kim and Lee, 1995). Geliştirilen yöntem, yarı-statik deney teçhizatına sahip olan laboratuvarlarda sismik yalıtımlı depolarda oluşan hidrodinamik etkilerin tespit edilmesini amaçlamaktadır.

Malhotra, sismik yalıtım sisteminin mevcut çelik sıvı depolarında uygulanabilmesi için bir yöntem geliştirmiştir (Malhotra, 1997a) (Malhotra, 1997b). Söz konusu yöntemde, ilk aşamada depo duvarı taban hizasında kesilerek temelden ayrılmaktadır. Daha sonra temel ile duvar arasına sismik yalıtıcılar yerleştirilmektedir. Son olarak, depo duvarı ile temel arasındaki boşluk esnek bir membran ile doldurulmaktadır. Bu yöntem ile sıvı deposunun altına yeni bir plak yapılmasına ihtiyaç kalmaması ve daha az sayıda sismik yalıtıcı kullanılması amaçlanmıştır.

Sismik yalıtım sisteminin yükseltilmiş sıvı depolarının davranışına etkisi Shenton ve Hampton tarafından incelenmiştir (Shenton III ve Hampton, 1999). Bu incelemede, sıvı deposunun davranışı Housner (Housner, 1957) (Housner, 1963) tarafından geliştirilen mekanik benzer sistem ile modellenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda sismik yalıtım sisteminin, depoyu taşıyan kuleye etkiyen kuvvetleri azaltmakta etkili

olduğu ancak bununla beraber depo içerisindeki sıvının çalkalanmasını arttırdığı belirtilmiştir.

Bachmann ve Wenk, İsviçre’de bulunan 15 m çapında ve 16 m yüksekliğinde bir sıvılaştırılmış doğal gaz deposuna sismik yalıtım sistemi uygulamasını (Bachmann ve Wenk, 2000) kaynağında anlatmaktadır. Söz konusu depo, 26 betonarme kolon tarafından taşınan 50 cm kalınlığında bir plak üzerinde bulunmaktadır. Kaynakta sırasıyla, tasarım öncesi sistemin dinamik özelliklerinin ve yerel zemin koşullarının belirlenmesi için yürütülen deneysel program, tasarım ve sismik yalıtım sistemi elemanlarının seçilmesi, kullanılacak sismik yalıtım sistemi elemanlarının özelliklerinin kontrol edilebilmesi için yürütülen deneysel program ve saha uygulaması aşamaları üzerinde durulmuştur.

Wang ve diğ., sürtünmeli sarkaç mesnetleri üzerinde bulunan rijit duvarlı silindir sıvı depolarının hareket denklemini durum-uzay formülasyonuna uygun olarak çıkarmıştır (Wang ve diğ., 2001). Çalışmada, sürtünmeli sarkaç mesnetleri üzerinde bulunan sıvı deposunun mekanik benzer modeli oluşturulmuş, sıvı yüzeyi hareketi ifadesi ve depo duvarında oluşan kesme kuvveti ve eğilme momenti ifadeleri çıkarılmıştır. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinde Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır.

Shirmali, Jadhav ve Jangid, sismik yalıtımlı sıvı depolarının davranışı üzerine 2002-2004 arasında bir dizi araştırma yapmıştır (Shirmali ve Jangid, 2002a, b, c, d, e) (Shirmali ve Jangid, 2003a, b, c) (Jadhav ve Jangid, 2004a, b). Bu çalışmalarda kayıcı mesnetler ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin kullanılmasının depo duvarlarında oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momentine etkisi araştırılmıştır. Söz konusu çalışmalarda depo içerisindeki sıvı, Haroun ve Housner (Haroun ve Housner, 1981) tarafından esnek duvarlı depolar için geliştirilmiş olan mekanik benzer model kullanılarak modellenmiştir.

1.5. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Son yıllarda deprem bölgelerinde bulunan stratejik sıvı depolarını korumak amacıyla sismik yalıtım uygulamalarının sayısı giderek artmaktadır. Ancak, sismik yalıtım sisteminin uygulandığı sıvı depolarının deprem yükleri altındaki davranışları ile ilgili oldukça sınırlı bilgi bulunmaktadır (Shirmali and Jangid, 2002a). Su ve yakıt depolarının boyutlandırılmasında kullanılan yönetmeliklerde de (Tablo 1.1) sismik

yalıtım ve enerji sönüm sistemlerinin kullanılması durumu için özel hükümler bulunmamaktadır. Ülkemizde bulunan mevcut stratejik sıvı depolardan hangi tipte olanların bu yöntem ile etkin olarak korunabileceğinin belirlenmesi ve yeni inşa edilecek sismik yalıtımlı depoların boyutlandırılmasında kullanılacak kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin hesaplanabilmesi için yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, sismik yalıtımlı sıvı depolarının tasarım kuvvetlerinin ve eğilme momentlerinin elde edilmesi ve sismik yalıtım sistemi parametrelerinin seçimi için bir yöntem önerilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, dünyadaki sismik yalıtımlı sıvı depoları ve bunlarda kullanılan yalıtım sistemleri hakkında bilgi toplanmıştır. Bu araştırma sonucunda, sismik yalıtım sistemlerinin en çok düşey yerleşimli silindirik sıvı depolarında uygulandığı ve bu uygulamalarda en sık kullanılan elemanların sürtünmeli sarkaç mesnetler ve kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler olduğu belirlenmiştir. Söz konusu sismik yalıtım sistemlerinin çalışma ilkeleri ve modelleme esasları ikinci bölümde verilmiştir. Düşey yerleşimli silindirik sıvı depolarında oluşan hidrodinamik etkilerin modellenmesi üçüncü bölümde ele alınmıştır. Çalışmanın bir sonraki aşamasında, ikinci ve üçüncü bölümlerde sunulan teorik bilgiler kullanılarak, sismik yalıtımlı depolarda oluşan hidrodinamik etkilerin parametrik olarak incelenmesinde yararlanılacak yazılım geliştirilmiştir. Söz konusu yazılımın kaynak kodları Ek-G'de verilmiştir. Dördüncü bölümde; depo geometrisinin, sismik yalıtım sistemi parametrelerinin ve deprem hareketinin özelliklerinin, depo tasarım parametrelerinin üzerindeki etkileri parametrik bir çalışma ile değerlendirilmiştir. Bu bölümün sonunda parametrik yaklaşımın sismik yalıtım sistemi parametrelerinin seçiminde ve depo tasarım kuvvetlerinin elde edilmesinde kullanılması örnek uygulamayla gösterilmiştir.

Sonuçlar bölümünde çalışma sonuçları değerlendirilmiş ve sismik yalıtımlı depoların tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmiştir. Sismik yalıtımlı depoların analizi ve tasarımı konularında daha ayrıntılı olarak incelenmesi gereken konular da yine bu bölümde ele alınmıştır.

2. SİSMİK YALITIM SİSTEMLERİ

2.1. Giriş

Sismik yalıtım sistemleri, yapıların titreşim periyodunu yer hareketinin hakim periyodundan uzaklaştırarak ve ek sönüm sağlayarak deprem hareketi sırasında yapıya etkiyen atalet kuvvetlerini azaltmayı amaçlamaktadır. İlk sismik yalıtım denemeleri 20.yy'ın ilk yarısında başlamasına karşın yapı sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlaması 1970'lerin ikinci yarısını bulmuştur. Bu süreç içerisinde birçok sismik yalıtım sistem tipi geliştirilmiştir ancak bunlardan sadece birkaçı uygulamada sık olarak kullanılmaktadır. Sismik yalıtım sistemlerinin gelişim tarihçesi ayrıntılı olarak (Kelly, 2004) ve (Buckle ve Mayes, 1990) kaynaklarında ele alınmıştır. Sismik yalıtım sistemlerinin çalışma ilkeleri ve günümüzde yaygın olarak kullanılan yalıtım sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi (Filiatrault, 2001), (Kelly, 1997), (Naeim ve Kelly, 1999), (Kelly, 2001), (Scheller ve Constantinou, 1999), (Skinner ve diğ., 1993), (Soong ve Dargush, 1997) ve (Whittaker, 2003) kaynaklarından elde edilebilir.

Sismik yalıtım uygulamasının başarısı, uygun yalıtım sisteminin ve bileşenlerinin seçimine bağlıdır. Sismik yalıtım sistemleri yapıya yatayda istenilen miktarda esneklik ve sönüm kazandırmalı, depremden sonra eski konumuna gelebilmeli ve yapıdan gelen düşey yükleri güvenli biçimde zemine iletebilmelidir. Sismik yalıtım sistemi tasarlanırken, yatayda oluşacak yer değiştirmeler göz önünde bulundurulmalı ve yapının etrafında gerekli hareket payı bırakılmalıdır. Beklenenden daha büyük bir hareket olması ihtimaline karşı, yapının etrafında şok emici tamponların ve yalıtım sisteminin devre dışı kalması durumunda, yapıdan gelen düşey yükleri güvenli biçimde zemine aktarabilecek elemanların da yerleştirilmesi gerekmektedir. Bütün bunlara ek olarak, sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin kolayca monte edilebilmesi, bakımlarının yapılabilmesi ve gerektiğinde parçalarının değiştirilebilmesi gerekmektedir (Kelly, 2001).

Sismik yalıtım sisteminin yapının hizmet ömrü süresince özelliklerinin mümkün olduğu kadar az değişmesi istenmektedir. Dolayısıyla sismik yalıtım sisteminin seçiminde ve tasarımında çevre koşullarının etkileri göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Constantinou ve diğ.,1999).

Yapının beklenen ömründe bir ya da iki defa yaşanacak kuvvetli hareketlerin yanısıra yalıtım sistemi, sık sık oluşan ve şiddeti daha az olan etkilere de maruz kalacaktır. Köprülerdeki fren kuvvetleri, ısı genleşme ve rüzgar bunlara örnek gösterilebilir. Bu tip etkiler de yalıtım sistemi tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır (Kelly, 2001).

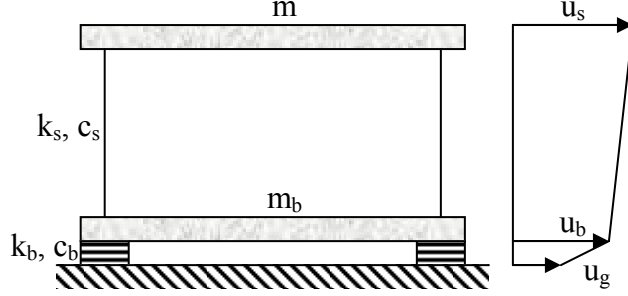
Sismik yalıtım sistemlerinin tasarımında kullanılan bazı yönetmelikler (FEMA 368, 2000), (IBC 2003, 2003), (AASHTO, 1999), (Eurocode 8, 1998) ve (Building Standard Law of Japan, 2004) kaynaklarında verilmiştir.

Söz konusu yönetmeliklerde sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin kullanılmadan önce bir dizi laboratuvar testlerinden geçirilmesi öngörülmektedir. Bu testlerde, sismik yalıtım sistemi elemanlarının tasarımda öngörülen en elverişsiz koşullar altında ve daha önce sözü edilen sık oluşan ve şiddeti az olan etkiler altında davranışı incelenmektedir. Sismik yalıtım sistemi bileşenlerine uygulanan testler hakkında bilgi (Aiken, 1998) ve (Mokha ve diğ., 1990) kaynaklarından elde edilebilir. Bunlara ek olarak, Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC) tarafından 1998-2001 yılları arasında yayınlanan raporların (CERF 40367, 1998), (CERF 40369, 1998), (CERF 40370, 1998), (CERF 40368, 1998), (CERF 40366, 1998), (CERF 40365, 1998), (CERF 40373, 1998), (CERF 40376, 1998), (CERF 40576, 2001), sonuçlarından yararlanarak hazırlanan (CERF 40600, 2002) kaynağından değişik tipte sismik yalıtım sistemi elemanlarında uygulanan test programları hakkında ayrıntılı bilgiye ulaşmak mümkündür.

2.2. Doğrusal Sismik Yalıtım Sistemlerinin Davranışı

Sismik yalıtımın yapı üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için m kütlesine, k_s rijitliğine ve c_s viskos sönümüne sahip basit tek katlı bir yapı ele alınmıştır. Bu yapı, k_b rijitliğinde doğrusal bir yaydan ve c_b viskos sönümüne sahip bir amortisörden oluşan doğrusal davranan bir sismik yalıtım sisteminin üzerine oturtulmuştur. Temel plağının kütlesi m_b ile gösterilmiştir. Yapı ve yalıtım sistemi, Şekil 2.1'de 2

serbestlik dereceli bir model ile temsil edilmiştir. Yalıtım sistemi tabanının, m_b ve m kütlelerinin mutlak yer değiştirmeleri sırasıyla u_g , u_b ve u_s ile gösterilmiştir. Söz konusu örnekte sismik yalıtım sisteminin davranışa etkisinin gösterilmesinde (Naeim ve Kelly, 1999) ve (Filiatrault, 2001) kaynaklarında verilen çözüm izlenmiştir.



Şekil 2.1 : Doğrusal sismik yalıtım sistemli yapı (Naeim and Kelly, 1999)

Kütlelerin hareket denklemleri (2.1) ve (2.2) ifadelerinde verilmiştir.

$$m\ddot{u}_s = -c_s(\dot{u}_s - \dot{u}_b) - k_s(u_s - u_b) \quad (2.1)$$

$$m\ddot{u}_s + m_b\ddot{u}_b = -c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) - k_b(u_b - u_g) \quad (2.2)$$

Hareket denklemleri, v_s (2.3a) ve v_b (2.3b) göreli yer değiştirmeleri cinsinden yeniden yazılması durumunda (2.4) ve (2.5) ifadelerinde verilen hali alır.

$$v_s = u_s - u_b \quad (2.3a)$$

$$v_b = u_b - u_g \quad (2.3b)$$

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (2.4)$$

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g \quad (2.5)$$

Yapı ve temel arasındaki göreli yerdeğiştirme tutulursa ($v_s = 0$), (2.5) ifadesi, (2.6)'da verilen ve kütlesi M_T ($M_T = m + m_b$) olan sismik yalıtımlı tek serbestlik dereceli sistemin hareket denkleminde dönüşür.

$$M_T\ddot{v}_b + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -M_T\ddot{u}_g \quad (2.6)$$

Benzer şekilde, temel ile yer arasındaki görelî yerdeğiştirme tutulursa ($v_b = 0$), (2.4) ifadesi (2.7)'de verilen sabit tabanlı tek serbestlik dereceli bir sistemin hareket denklemine dönüşür.

$$m\ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g \quad (2.7)$$

İki serbestlik dereceli sistemin hareket denklemleri (2.8) ifadesinde matris formunda ifade edilmiştir.

$$[m](\ddot{v}) + [c](\dot{v}) + [k](v) = -[m](r)\ddot{u}_g \quad (2.8)$$

Bu ifadede, kütle, sönüm, rijitlik ve görelî yer değiştirme matrisleri sırasıyla (2.9a), (2.9b), (2.9c), (2.9d) ifadelerinde verilmiştir. Yer hareketinin etkilediği noktayı belirten r matrisi ise (2.9e) ifadesinde verilmiştir.

$$[m] = \begin{bmatrix} M_T & m \\ m & m \end{bmatrix} \quad (2.9a)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \quad (2.9b)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \quad (2.9c)$$

$$(v) = \begin{pmatrix} v_b \\ v_s \end{pmatrix} \quad (2.9d)$$

$$(r) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.9e)$$

Yapının ve sismik yalıtım sisteminin özellikleri göz önünde bulundurularak, (2.8) ifadesindeki büyüklüklerin mertebeleri konusunda aşağıdaki varsayımlar yapılabilir.

- $m_b \ll m$ olmasına karşın mertebeleri aynıdır.

- $\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m}} \gg \omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M_T}}$ olduğundan dolayı açısal frekansların karelerinin

oranı $\varepsilon = \left(\frac{\omega_b}{\omega_s}\right)^2$ 'nin , 10^{-2} mertebesinde olduğu kabul edilebilir.

- Yapının viskos sönüm oranı $\zeta_s = \frac{c_s}{2m\omega_s}$ ve sismik yalıtım sisteminin viskos

sönüm oranı $\zeta_b = \frac{c_b}{2(m+m_b)\omega_b}$, ε mertebesinde dir.

Sistemin doğal frekansları (2.10) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$[k] - \omega^2 [m] = 0 \quad (2.10)$$

Karakteristik denklemin kökleri, (2.11a) ve (2.11b)'de verilmiştir.

$$\omega_1^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (\omega_b^2 + \omega_s^2) + \sqrt{(\omega_b^2 + \omega_s^2)^2 - 4(1-\gamma)\gamma\omega_b^2\omega_s^2} \right\} \quad (2.11a)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ (\omega_b^2 + \omega_s^2) - \sqrt{(\omega_b^2 + \omega_s^2)^2 - 4(1-\gamma)\gamma\omega_b^2\omega_s^2} \right\} \quad (2.11b)$$

Bu ifadede γ , üst yapı kütle sinin toplam kütle ye oranını göstermektedir.

$$\gamma = \frac{m}{m+m_b} = \frac{m}{M_T} \quad (2.12a)$$

(2.11a) ve (2.11b)'nin karekök altındaki kısmı (2.13)'de yeniden yazılmıştır.

$$\sqrt{(\omega_b^2 + \omega_s^2)^2 - 4(1-\gamma)\gamma\omega_b^2\omega_s^2} = (\omega_s^2 - \omega_b^2) \sqrt{1 + 4\gamma \frac{\omega_b^2\omega_s^2}{(\omega_s^2 - \omega_b^2)^2}} \quad (2.13)$$

Eşitliğin sağ kısmındaki ifadenin binom serisine açılması durumunda (2.14) elde edilir.

$$\sqrt{(\omega_b^2 + \omega_s^2)^2 - 4(1-\gamma)\gamma\omega_b^2\omega_s^2} \cong (\omega_s^2 - \omega_b^2)^2 \left(1 + \frac{2\gamma\omega_b^2\omega_s^2}{(\omega_s^2 - \omega_b^2)^2} \right) \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'te bulunan yaklaşık sonucun sırasıyla (2.11a) ve (2.11b)'ye yerleştirilmesiyle sistemin açılal frekansları (2.15a) ve (2.15b) ile ifade edilebilir.

$$\omega_1^2 = \frac{\omega_b^2}{(1-\gamma)} \left[1 - \frac{\gamma \omega_s^2}{(\omega_s^2 - \omega_b^2)} \right] \quad (2.15a)$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{(1-\gamma)} \left[1 + \frac{\gamma \omega_s^2}{(\omega_s^2 - \omega_b^2)} \right] \quad (2.15b)$$

$\omega_b \ll \omega_b$ olduğundan, sistemin açılal frekansları yaklaşık olarak (2.16a) ve (2.16b) ifadeleri ile hesaplanabilir.

$$\omega_1 = \omega_b \sqrt{1-\gamma\epsilon} \approx \omega_b \quad (2.16a)$$

$$\omega_2 = \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \sqrt{1 + \frac{\gamma \omega_b^2}{\omega_s^2}} \approx \frac{\omega_s}{\sqrt{1-\gamma}} \quad (2.16b)$$

Denklem (2.16a)'da sistemin birinci modunun titreşim frekansının, üst yapının rijitliğinden fazla etkilenmediği görülmektedir. Ancak bu durum üst yapının, sismik yalıtım sistemine göre çok daha rijit olduğu koşullarda geçerlidir. Denklem (2.16b)'de ise sistemin ikinci modunun titreşim frekansının yalıtım sisteminin rijitliğinden fazla etkilenmediği görülmektedir. Buna ek olarak, ω_2 'nin taban kütlesi m_b 'nin varlığı nedeniyle önemli ölçüde artabileceği görülmektedir. Sistemin birinci mod şekli $A^{(1)}$, (2.17) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} k_b - \omega_b^2 & -\omega_b^2 m \\ -\omega_b^2 m & k_s - \omega_b^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_1^{(1)} \\ A_2^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

$A_1^{(1)}=1$ olarak alınırsa;

$$A_2^{(1)} = \frac{\omega_b^2 m}{k - \omega_b^2 m} = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2 - \omega_b^2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon} - 1} = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \approx \epsilon \quad (2.18)$$

Birinci mod şekli, (2.19) ile ifade edilebilir.

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Benzer şekilde, ikinci mod şekli, $A^{(2)}$, (2.20) ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} k_b - \frac{\omega_s^2}{1-\gamma} M_T & -\frac{\omega_s^2}{1-\gamma} m \\ -\frac{\omega_s^2}{1-\gamma} m & k_s - \frac{\omega_s^2}{1-\gamma} m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_1^{(2)} \\ A_2^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

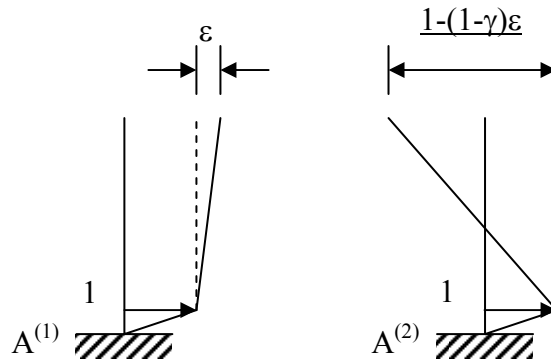
$A_1^{(2)}=1$ olarak alınırsa;

$$A_2^{(2)} = \frac{k_b - \frac{\omega_s^2}{1-\gamma} M_T}{\frac{\omega_s^2}{1-\gamma} m} = -\left(\frac{1-(1-\gamma)\varepsilon}{\gamma} \right) \quad (2.21)$$

İkinci mod şekli (2.22) ile ifade edilebilir.

$$A^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{1-(1-\gamma)\varepsilon}{\gamma} \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Sismik yalıtımlı yapının her iki mod şekli Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 : Sismik yalıtımlı tek katlı bir yapının mod şekilleri (Filiatrault, 2001)

Görelî yerdeğıştirmelerin mod şekilleri göz önünde tutularak yeniden yazılmasıyla (2.23a) ve (2.23b) elde edilir.

$$v_b(t) = u_1(t)A_1^{(1)} + u_2(t)A_1^{(2)} \quad (2.23a)$$

$$v_s(t) = u_1(t)A_2^{(1)} + u_2(t)A_2^{(2)} \quad (2.23b)$$

Sistemin modal hareket denklemleri (2.24a) ve (2.24b) ifadelerinde verilmiştir.

$$M_1\ddot{u}_1 + C_1\dot{u}_1 + K_1u_1 = P_1(t) \quad (2.24a)$$

$$M_2\ddot{u}_2 + C_2\dot{u}_2 + K_2u_2 = P_2(t) \quad (2.24b)$$

Burada;

$$\begin{aligned} M_1 &= (A^{(1)})^T [m] (A^{(1)}) & M_2 &= (A^{(2)})^T [m] (A^{(2)}) \\ C_1 &= (A^{(1)})^T [c] (A^{(1)}) & C_2 &= (A^{(2)})^T [c] (A^{(2)}) \\ K_1 &= (A^{(1)})^T [k] (A^{(1)}) & K_2 &= (A^{(2)})^T [k] (A^{(2)}) \\ P_1 &= -(A^{(1)})^T [m] (r) \ddot{u}_g & P_2 &= -(A^{(2)})^T [m] (r) \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.25)$$

Modal hareket denklemleri, ζ_1 ve ζ_2 modal sönüm oranları, α_1 ve α_2 modal katkı oranları cinsinden yeniden yazılırsa (2.26a) ve (2.26b) ifadeleri elde edilir.

$$\ddot{u}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{u}_1 + \omega_1^2u_1 = -\alpha_1\ddot{u}_g \quad (2.26a)$$

$$\ddot{u}_2 + 2\zeta_2\omega_2\dot{u}_2 + \omega_2^2u_2 = -\alpha_2\ddot{u}_g \quad (2.26b)$$

Burada;

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{C_1}{2\omega_1M_1} & \zeta_2 &= \frac{C_2}{2\omega_2M_2} \\ \alpha_1 &= \frac{-(A^{(1)})^T [m] (r)}{M_1} & \alpha_2 &= \frac{-(A^{(2)})^T [m] (r)}{M_2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Denklem (2.19), (2.27)'de yerine konulursa α_1 modal katkı oranı (2.28) ile ifade edilebilir.

$$\alpha_1 = \frac{(1 \ \varepsilon) \begin{bmatrix} M_T & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{(1 \ \varepsilon) \begin{bmatrix} M_T & m \\ m & m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \varepsilon \end{pmatrix}} = \frac{M_T + m\varepsilon}{M_T + 2m\varepsilon + m\varepsilon^2} \quad (2.28)$$

ε^2 'li terim ihmal edilirse, birinci modun katkı oranı yaklaşık olarak (2.29) ile hesaplanabilir.

$$\alpha_1 = \frac{M_T + m\varepsilon}{M_T + 2m\varepsilon} \approx 1 - \gamma\varepsilon \quad (2.29)$$

Birinci modun modal kütlesi, M_1^* , (2.30) ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$M_1^* = \alpha_1^2 M_1 = ((1 - \gamma\varepsilon)^2 (M_T + 2m\varepsilon + m\varepsilon^2)) \approx M_T \quad (2.30)$$

Aynı işlemler ikinci mod için de tekrarlanırsa, ikinci modun katkı oranı ve modal kütlesi sırasıyla (2.31) ve (2.32) ile ifade edilebilir.

$$\alpha_2 = \gamma\varepsilon \quad (2.31)$$

$$M_2^* = M_T \frac{(1 - \gamma)[1 - 2(1 - \gamma)\varepsilon]}{\gamma} \quad (2.32)$$

Bu sonuçlardan, sismik yalıtım sisteminin neden etkili olduğu görülmektedir. Yapısal deformasyonların yoğun olduğu ikinci modun katılım oranı, ε mertebesinde. Dolayısıyla, ω_b ve ω_s doğal frekansları birbirinden ayrık olduğu sürece oldukça küçüktür. Buna ek olarak, ikinci modun frekansı, (2.16b)'den de görüleceği gibi sabit tabanlı frekanstan daha yüksek bir değer alacaktır.

Modal katılım oranının çok küçük olmasından dolayı, ikinci mod deprem girdisine neredeyse ortogondur. (2.25)'de $A^{(2)}$ ve (r) yerlerinde koyulursa, (2.33) elde edilir.

$$P_2(t) = -\left(A^{(2)}\right)^T [m](r)\ddot{u}_g(t) \quad (2.33)$$

$\left(A^{(1)}\right)^T = (1 \ \varepsilon)$ ve $(r)^T = (1 \ 0)$ olduğu ve ε 'nin 10^{-2} mertebesinde olduğu göz önünde bulundurulursa (r) ve $(A^{(1)})$ 'in birbirine neredeyse eşit olduğu (2.34) ifadesinde görülebilir.

$$(r) \approx (A^{(1)}) \quad (2.34)$$

Mod şekillerinin ortogonallik özellikleri kullanılırsa (2.34), $P_2(t)$ 'nin neredeyse sıfıra eşit olduğu görülebilir.

$$(A^{(2)})^T [m] (A^{(1)}) = 0 \approx (A^{(2)})^T [m] (r) \quad (2.35)$$

Dolayısıyla;

$$P_2(t) \approx 0 \quad (2.36)$$

(2.36) ifadesinden sismik yalıtım sisteminin sağladığı bu ortogonallik özelliği nedeniyle enerjinin geri yansıtıldığı görülebilir. Birinci modun sönüm oranı (2.37) ifadesinde verilmiştir.

$$\zeta_1 = \frac{(A^{(1)})^T [c] (A^{(1)})}{2\omega_1 M_1} = \frac{c_b + c_s \varepsilon^2}{2\omega_b \sqrt{1 - \gamma \varepsilon} (M_T + 2m\varepsilon + m\varepsilon^2)} \quad (2.37)$$

ε^2 'li terim ihmal edilirse, (2.37) ifadesi (2.38)'e dönüşür.

$$\zeta_1 = \frac{\zeta_b (1 - 2\gamma \varepsilon)}{\sqrt{1 - \gamma \varepsilon}} = \zeta_b \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \varepsilon \right) \quad (2.38)$$

İkinci modun modal sönüm oranı da benzer şekilde elde edilebilir.

$$\zeta_2 = \frac{(A^{(2)})^T [c] (A^{(2)})}{2\omega_2 M_2} = \frac{\left(1 - \frac{1 - (1 - \gamma) \varepsilon}{\gamma} \right) \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \left(1 - \frac{1 - (1 - \gamma) \varepsilon}{\gamma} \right)}{2\omega_s \frac{\sqrt{1 + \gamma \varepsilon}}{\sqrt{1 - \gamma}} M_T \frac{(1 - \gamma) [1 - 2(1 - \gamma) \varepsilon]}{\gamma}} \quad (2.39)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, (2.40) ifadesi elde edilir.

$$\zeta_2 = \frac{\zeta_s}{\sqrt{1 - \gamma}} + \frac{\gamma \zeta_b \sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{1 - \gamma}} \quad (2.40)$$

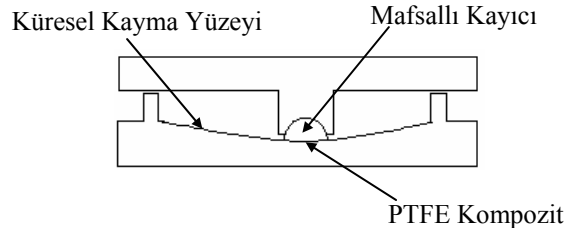
Sismik yalıtım sisteminin yer değiştirmesine karşılık gelen birinci modun modal sönüm oranının neredeyse yalıtım sisteminin sönüm oranına eşit olduğu (2.36) ifadesinden görülmektedir.

Buna ek olarak, (2.40) ifadesi incelendiğinde, ikinci modun modal sönüm oranının, sismik yalıtım sistemi tarafından $\sqrt{\varepsilon}$ mertebesinde artırıldığı görülmektedir. Özellikle, ζ_s 'nin çok küçük olması durumunda $\zeta_b \sqrt{\varepsilon}$ çarpanı ikinci modun modal sönüm oranına önemli oranda katkıda bulunabilmektedir.

2.3. Sismik Yalıtım Sistemi Bileşenleri

2.3.1. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi

Sürtünmeli sarkaç mesnetler, küresel çelik bir yüzey üzerinde hareket eden mafsallı bir kayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 2.3). Mafsallı kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe taşınan kütle yükselmekte ve yerçekiminin etkisiyle geri gelmektedir. Mafsallı kayıcının altında bulunan PTFE (politetrafloroetilen) tabaka ile paslanmaz çelik içbükey yüzey arasında oluşan sürtünme sayesinde yapıya iletilen enerjinin bir kısmı sönümlenmektedir. Sürtünmeli sarkaç sistemi hakkında ayrıntılı bilgi (Zayas ve diğ., 1987), (Zayas ve diğ., 1990), (Mosqueda ve diğ., 2004), (Mokha ve diğ., 1991), (Mokha ve diğ., 1990) ve (Almazan ve diğ., 1998) kaynaklarından elde edilebilir.



Şekil 2.3 : Sürtünmeli sarkaç mesneti kesiti

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin geometrisi ve üzerine etkiyen yükler Şekil 2.4.'de verilmiştir. Sürtünme kuvvetinin ihmal edilmesi durumunda ($f = 0$), kayıcıyı hareket ettirmek için gereken yatay kuvvet F_{fps} , basit denge ifadeleriyle hesaplanabilir.

Yatayda denge koşulu uygulanırsa;

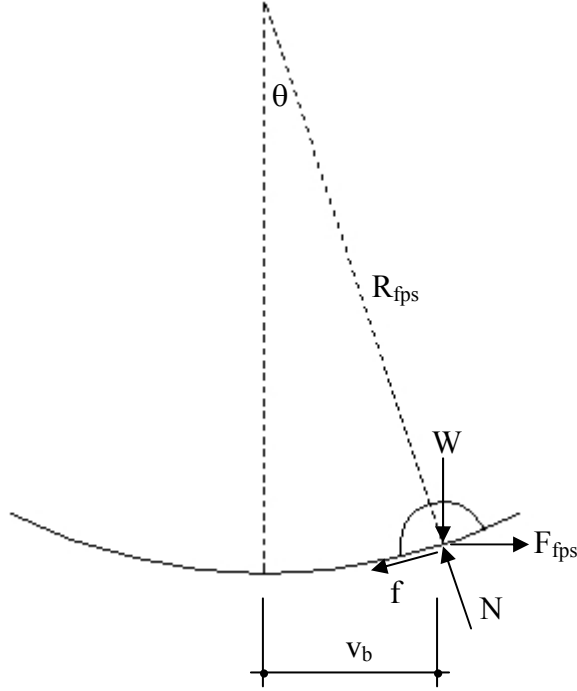
$$F_{fps} = N \sin \theta \quad (2.41)$$

Düşeyde denge koşulu uygulanırsa;

$$W = N \cos \theta \quad (2.42)$$

(2.42) ifadesi, (2.41) eşitliğinde yerleştirilirse;

$$F_{fps} = W \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = W \tan \theta \quad (2.43)$$



Şekil 2.4 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin geometrisi (Mosqueda ve diğ., 2004)

$$\tan \theta = \frac{v_b}{R_{fps}} \quad (2.44)$$

(2.44) ifadesi, (2.43) eşitliklerinde yerleştirilirse;

$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} v_b \quad (2.45)$$

Buradan yanal rijitliğin, $k=W/R_{fps}$ olduğu görülmektedir. Bu mesnetler tarafından taşınan rijit bir yapının doğal periyodu (2.46) eşitliğinde verilmiştir.

$$T_{fps} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{gk}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_{fps}}{g}} \quad (2.46)$$

Bu ifadeden, sürtünmenin ihmal edilmesi durumunda doğal periyodun ve yanal rijitliğin sadece küresel kayma yüzeyinin eğrilik yarıçapına göre değiştiği görülmektedir. Tablo 2.1’de çeşitli sismik yalıtım periyotlarının elde edilmesi için kullanılan mesnet yarıçapları metre cinsinden verilmiştir.

Tablo 2.1 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yarıçapları ve sismik yalıtım periyotları

T_{fps} (s)	R_{fps} (m)
1.50	0.56
2.00	1.00
2.50	1.55
3.00	2.24
5.00	6.21

Kayma yüzeyinin sürtünmesi μ , göz önüne alındığında, (2.41)'den (2.45)'e kadar olan eşitlikler, (2.47) ile (2.51) arasında verilen eşitliklere dönüşmektedir.

$$F_{fps} = N \sin \theta + f \cos \theta \quad (2.47)$$

$$W = N \cos \theta + f \sin \theta \quad (2.48)$$

$$\sin \theta = \frac{v_b}{R_{fps}} \quad (2.49)$$

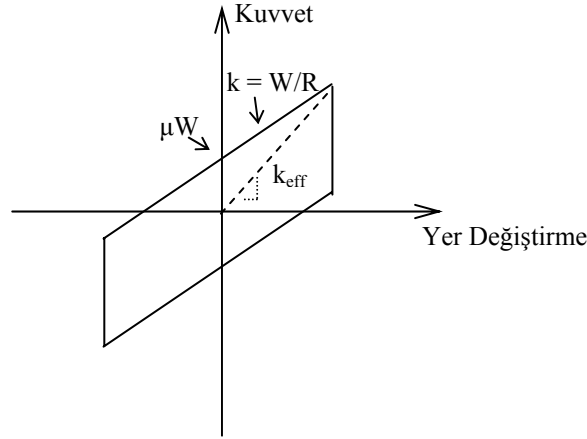
$$\cos \theta = \frac{\sqrt{R_{fps}^2 - v_b^2}}{R_{fps}} \quad (2.50)$$

$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} v_b + \mu W (\text{sgn } \dot{v}_b) \quad (2.51)$$

Kuvvet ifadesinin ilk terimi geri döndürücü kuvveti, ikinci terim ise sürtünme kuvvetini göstermektedir. Sürtünme kuvveti, geri döndürücü kuvvetten fazla ise mafsallı kayıcı eski konumuna geri dönemeyecektir. Dolayısıyla, $v_b/R_{fps} \leq \mu$ olması durumunda yalıtım sisteminin geri döndürücü bir mekanizma ile takviye edilmesi gerekmektedir (Naeim ve Kelly, 1999). Bu durum genellikle uzun yalıtım periyotlu sistemlerde ortaya çıkabilmektedir.

Sürtünme kuvvetinin etkisiyle, etkili rijitlik ifadesi (2.52) ile verilebilir. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin, kuvvet – yer değiştirme ilişkisi Şekil 2.5’de verilmiştir.

$$k_{eff} = \frac{W}{R_{fps}} + \frac{\mu W}{v_b} \quad (2.52)$$



Şekil 2.5 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

Kuvvet ifadesi N cinsinden yazılırsa (2.53) ifadesi elde edilir.

$$F_{fps} = \frac{N}{R_{fps}} v_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{v}_b) \cos \theta \quad (2.53)$$

Sarkaç yerdeğiştirmesi u 'nun yarıçapa kıyasla çok küçük olduğu kabul edilirse ($\cos \theta \approx 1$), (2.53) ifadesi (2.54) halini alır.

$$F_{fps} = \frac{N}{R_{fps}} v_b + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{v}_b) \quad (2.54)$$

Teflon-çelik arayüzlerinde sürtünme katsayısı kayma hızı ve düşey yüke göre önemli değişim göstermektedir. Bu nedenle sürtünme kuvvetinin modellenmesi için Coulomb modeli yetersiz kalmaktadır (Mokha ve diğ., 1991).

Teflon-Çelik arayüzlerinde herhangi bir $\dot{v}_b$ kayma hızında sürtünme katsayısı (2.55) ile tarif edilmektedir (Mokha ve diğ., 1990)

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) e^{-\psi |\dot{v}_b|} \quad (2.55)$$

Bu ifadede, $\mu_{\max}$ yüksek kayma hızındaki sürtünme katsayısını, $\mu_{\min}$ ise düşük kayma hızındaki sürtünme katsayısını vermektedir. ψ katsayısı ise teflon-çelik arayüzü tipine ve düşey basınca göre değişmektedir. (Mokha ve diğ., 1990)

Değişik teflon-çelik arayüzü tipleri için sürtünme değişkenleri Tablo (2.2)'de verilmiştir. Teflon malzemesi olarak dolgusuz teflon (UF), %15 cam dolgulu teflon (15GF), %25 cam dolgulu teflon (25GF) ve örülmüş teflon (W) incelenmiştir.

Kayma yönünün sürtünme parametrelerine etkisini incelemek amacıyla teflon liflerinin seriliş yönüne paralel (P) ve dik (T) doğrultularda deney yapılmıştır. (Mokha ve diğ., 1991).

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin dinamik analizinde (2.55) ifadesi kullanılarak kayma hızının ve mesnede gelen düşey yükün değişimine göre sürtünme katsayısının değeri düzeltilebilir. Mesnetlerdeki sürtünme katsayısının ani değişiminin sistem üzerindeki etkisi Tsopelas tarafından ayrıntılı olarak incelenmiş ve davranış üzerindeki etkinin ihmal edilebilecek boyutlarda olduğu rapor edilmiştir (Tsopelas ve diğ.,1994).

(2.54) ifadesinde mafsallı kayıcının altında bulunan ve kalınlığı 1-2 mm arasında değişen PTFE kaplama malzemesinin şekil değiştirmesinin sürtünmeye etkisi göz önüne alınmamıştır.

Hareket başlamadan önce Teflon tabakada küçük bir elastik kayma şekil değiştirmesi meydana gelmektedir. Söz konusu yer değiştirme PTFE kaplama malzemesinin kalınlığına göre 0.13 – 0.25 mm arasında değişmektedir. Kaplama malzemesinin kayma öncesi şekil değiştirmesinin sistem davranışına olan etkisi Bouc-Wen viskoplastisite modeli ile hesaba katılabilmektedir (Constantinou ve diğ., 1990).

Bouc-Wen modeli (2.56), çevrimsel sistemlerin rastgele titreşimler altında davranışını modellemede kullanılan bir viskoplastisite modelidir. Söz konusu model, Bouc tarafından ortaya atılmış (Bouc, 1967) ve daha sonra Wen tarafından geliştirilmiştir (Wen, 1976).

$$Y\dot{Z} + \gamma_{bw}|\dot{v}_b|Z|Z|^{\eta-1} + \beta\dot{v}_b|Z|^{\eta} - A\dot{v}_b = 0 \quad (2.56)$$

Yukarıdaki ifadede β, γ_{bw} , A ve η boyutsuz katsayılarıdır ve çevrimin şeklini tanımlamakta kullanılmaktadır. A = 1 ve $\beta + \gamma_{bw} = 1$ olduğunda Y mesneden akma yer değiştirmesini göstermektedir. $\eta = 2$, A=1 ve $\beta + \gamma_{bw} = 1$ ($\gamma_{bw} = 0.9$, $\beta = 0.1$) olması durumunda, deneysel sonuçlara yakın sürtünme kuvveti-kayma şekil değiştirmesi çevrimlerinin elde edildiği görülmüştür (Constantinou ve diğ., 1990).

Tablo 2.2 : Değişik teflon malzemelerinin değişik basınçlar altında sürtünme parametreleri (Mokha ve diğ., 1991)

Teflon tipi ¹	Basınç (MPa)	Kayma Yönü ²	f _{max} (%)	f _{min} (%)	ψ(s/cm)
UF	6.90	P	11.93	2.66	0.24
UF	13.80	P	8.70	1.75	0.24
UF	20.70	P	7.03	1.51	0.31
UF	44.85	P	5.72	0.87	0.20
15GF	6.90	P	14.61	4.01	0.24
15GF	13.80	P	10.08	4.28	0.22
15GF	20.70	P	8.49	2.32	0.24
15GF	44.85	P	5.27	2.15	0.28
25GF	6.90	P	13.20	5.54	0.26
25GF	13.80	P	11.20	4.87	0.26
25GF	20.70	P	9.60	4.40	0.13
25GF	44.85	P	5.89	3.19	0.35
UF	6.90	T	14.20	2.39	0.18
UF	13.80	T	10.50	1.72	0.28
UF	20.70	T	8.20	2.90	0.22
UF	44.85	T	5.50	1.11	0.18
WT	44.85	T	5.64	1.38	0.31
WT	69.00	T	4.50	1.13	0.63

¹ UF: Dolgusuz Teflon (Unfilled Teflon), 15GF: %15 Cam dolgulu Teflon (Glass-filled Teflon), WT:Dokuma Teflon (Woven Teflon)

² P: Teflon malzemenin liflerinin seriliş yönüne paralel, T: Teflon malzemenin liflerinin seriliş yönüne dik

Bu durumda, (2.54)'de tanımlanan ve sürtünme yönünün tayin edilmesinde kullanılan süreksiz signum fonksiyonu yerine sürekli Z boyutsuz çevrimsel değişkeni kullanılıncı kuvvet ifadesi (2.57)'deki hali almaktadır. Z boyutsuz değişkeni, (2.56)'da verilen diferansiyel denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

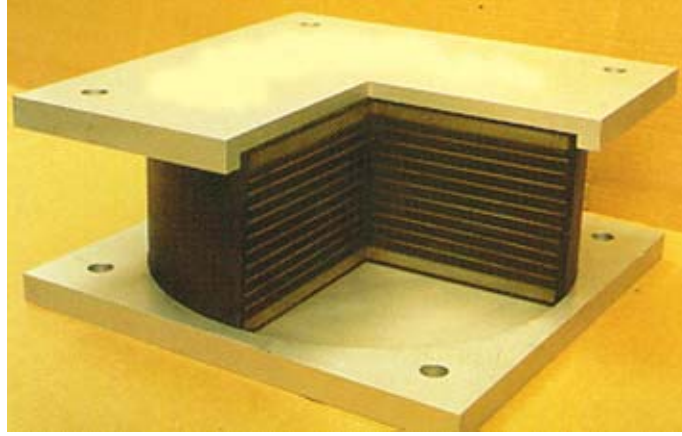
$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} v_b + \mu W Z \quad (2.57)$$

Kayma hareketi esnasında $Z \pm 1$ değerlerini almaktadır. Yapışma sırasında da Z'nin mutlak değeri 1'den küçük olmaktadır.

2.3.2. Elastomer Yalıtıcılar

Elastomer yalıtıcılar, Şekil (2.6)'de görüldüğü gibi üstüste dizilmiş kauçuk ve çelik katmanlarından oluşmaktadır. Pürüzlendirilen çelik plakalar ve kauçuk katmanlar, yüksek ısı ve basınç altında birbirlerine yapıştırılmaktadır. Kauçuk katmanların ve çelik plakaların çevre koşullarından korunabilmesi için mesnetin etrafı koruyucu bir

kauçuk katman ile kaplanmaktadır. Elastomer yalıtıcıların mekanik özellikleri, elastomer birleşimine ve mesnet geometrisine bağlı olarak değişmektedir (Kelly, 1997).



Şekil 2.6 : Elastomer yalıtıcı (Dusi, 2003)

Kauçuk katmanlara yapıştırılmış olan çelik tabakalar, elastomer mesnetin eğilme deformasyonlarını önemli derecede azaltmaktadır. Bundan dolayı, kauçuk katmanlarda sadece kayma deformasyonlarının meydana geldiği kabul edilmektedir. Elastomer yalıtıcılarda oluşan geri döndürücü kuvvet (2.58) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$F_{rb} = k_b v_b + c_b \dot{v}_b \quad (2.58)$$

Bu ifadede k_b elastomer yalıtıcının yanal rijitliğini ve c_b ise sönümünü göstermektedir. Elastomer mesnetlerin yanal rijitliği k_b , (2.59) ifadesiyle hesaplanabilir (Skinner ve diğ., 1993).

$$k_b = \frac{G_k A_k}{h_k} \quad (2.59)$$

Yukarıdaki eşitlikte, G_k kauçuğun kayma modülünü, A_k kauçuk katmanının alanını ve h_k ise kauçuk katmanların toplam yüksekliğini göstermektedir. Elastomer mesnetler tarafından taşınan yapının tamamen rijit olması durumunda, elastomer mesnetlerin doğal periyodu, T_{rb} , (2.60) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$T_{rb} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \sum k_b}} \quad (2.60)$$

Bu ifadede, W yapının toplam ağırlığını ve Σk_b ise elastomer mesnetlerin yanal rijitliklerinin toplamını göstermektedir.

Elastomer yalıtıcılarda kauçuk katmanlarının yaptığı kayma şekil değiştirmesiyle oluşan enerji sönümünün hızla orantılı olarak değiştiği deneysel olarak görülmüştür. Bu nedenden dolayı elastomer yalıtıcılarda sönüm eşdeğer viskos sönüm kullanılarak modellenabilmektedir (Filiatrault, 2001). Eşdeğer viskos sönüm c_b , (2.61) ifadesiyle hesaplanabilir (Skinner ve diğ., 1993).

$$c_b = 2\zeta_b M_T \omega_{rb} \quad (2.61)$$

Bu ifadede ω_b açısal frekansı (2.62), ζ_b sönüm oranını ve M_T ise sismik yalıtım sisteminin üzerinde bulunan toplam kütleyi göstermektedir. Sönüm oranı ζ_b , kullanılan kauçuk birleşimine göre kritik sönümün %5 ila %10'u arasında değişmektedir (Filiatrault, 2001).

$$\omega_{rb} = \frac{2\pi}{T_{rb}} \quad (2.62)$$

2.3.3. Kurşun Çekirdekli Elastomer Yalıtıcılar

Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcılar, elastomer mesnetlerin içerisine açılmış deliklere kurşun silindirlerin yerleştirilmesiyle elde edilen mesnetlerdir (Şekil 2.7). Kurşun çekirdeğin amacı, kurşunun kayma deformasyonu yapmasıyla sönümü arttırmaktır. Kurşun çekirdeğin kullanılmasının diğer bir nedeni de rüzgar ya da fren yükleri etkisi altında yapının o kuvvetler doğrultusunda hareket etmesini engellemektir.

Kurşun çekirdeğin çapı, rüzgar ve fren yükleri gibi hafif yanal yükleri karşılamak için gereken ilk yanal rijitliğe göre belirlenir. Kurşun çekirdeğin kesit alanı, bu yükleri akma olmadan iletebilecek kadar büyük olmalıdır. Akma kuvveti, genellikle yapının ağırlığının bir yüzdesi olarak belirlenir (Kelly, 2001).



Şekil 2.7 : Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcı (Constantinou and Whittaker, 2004)

Çekirdek malzemesi olarak kurşun kullanılmasının nedenlerinden biri plastik deformasyonlardan sonra zamanla yeniden kristelleşme sayesinde eski özelliklerini kazanmasıdır. Kurşun kullanılmasının bir başka nedeni de doğada çok kolay sağlanabilmesi ve ucuz olmasıdır (Skinner, 1993).

Kurşun çekirdek akmadan önce kurşun çekirdekli elastomer mesnetin yanal rijitliğinin elastomer mesnetin yanal rijitliğine kıyasla oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni de kurşunun ve kauçuğun her ikisinin de elastik deformasyon yapmasıdır. Kurşun aktıktan sonra ise her iki mesnetin de aynı rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin akma sonrası rijitliği sadece elastomerin kayma rijitliğine bağlıdır.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin değişen yükler altındaki çevrimsel davranışı, elastik rijitliği k_e , akma sonrası rijitliği k_p ve akma kuvveti F_y olan bileer bir yay olarak modellenenebilir (Şekil 2.8). Elastik rijitlik k_e , (2.63) ifadesiyle elde edilebilir.

$$k_e = \frac{1}{h_k} (G_p A_p + G_k A_k) \quad (2.63)$$

Bu ifadede;

h_k : Kauçuk katmanlarının toplam yüksekliği

A_p : Kurşun çekirdeğin kesit alanı

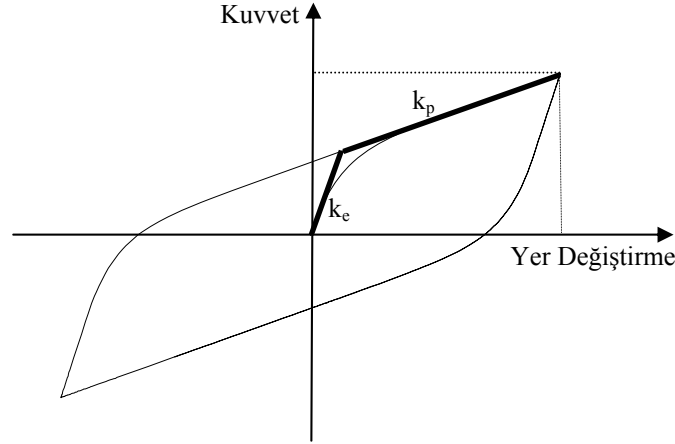
A_k : Kauçuk katman alanı

G_p : Kurşunun kayma modülü $\approx$ Oda sıcaklığında 150 Mpa

G_k : Kauçuğun kayma modülü $\approx$ 1 Mpa

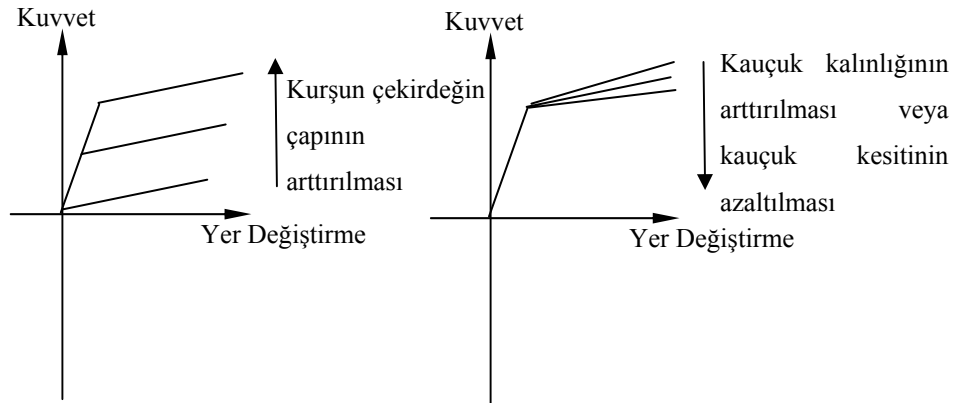
Akma sonrası rijitlik k_p (2.64) ise kauçuk katmanların kayma rijitliğine eşittir.

$$k_p = \frac{G_k A_k}{h_k} \quad (2.64)$$



Şekil 2.8 : Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi

Kurşun çekirdeğin çapının ve kauçuk tabakalarının toplam kalınlığının değişen yükler altındaki çevrimsel davranışa etkisi Şekil 2.9’da görülmektedir.



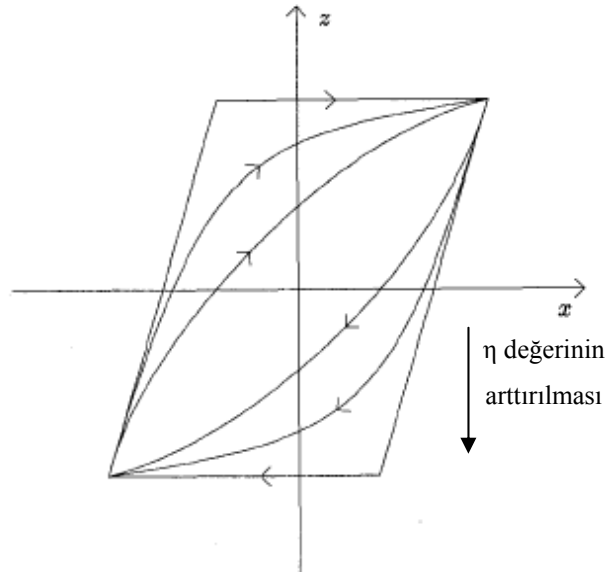
Şekil 2.9 : Kurşun çekirdek ve kauçuk boyutlarının çevrimsel davranışa etkisi

Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcılarda, çevrimler Bouc-Wen modeliyle tarif edilebilir. Bu durumda yalıtıcılarda oluşan geri döndürücü kuvvet (2.65) ifadesiyle hesaplanmaktadır (Park et al, 2006).

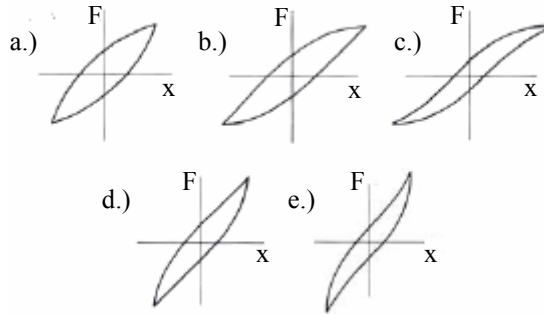
$$F_{lrb}(v_b, \dot{v}_b) = \alpha_{LRB} k_e v_b + (1 - \alpha_{LRB}) k_e D_y Z + c_{LRB} \dot{v}_b \quad (2.65)$$

Bu ifadede α_{LRB} , akma-sonrası rijitliğin akma-öncesi rijitliğe oranıdır. Z boyutsuz değişkeni ise (2.66)’da verilen diferansiyel denklemi sağlamalıdır. Modelde kullanılacak olan Bouc-Wen parametreleri, kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcının

deneysel çevrimlerden yararlanılarak tespit edilmektedir. Bouc-Wen parametrelerinin çevrimsel davranışa olan etkileri Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de görülmektedir.



Şekil 2.10 : Bouc-Wen parametresi η 'nin çevrimsel davranışa etkisi (Sain ve diğ.,1998)



Şekil 2.11 : Bouc-Wen parametreleri β ve γ_{bw} 'nin çevrimsel davranışa etkisi ($\eta = 1$).

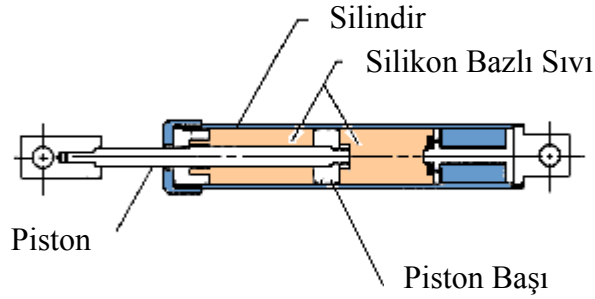
a.) $\beta + \gamma_{bw} > 0$, $\beta - \gamma_{bw} < 0$, b.) $\beta + \gamma_{bw} > 0$, $\beta - \gamma_{bw} = 0$, c.) $\beta + \gamma_{bw} > \beta - \gamma_{bw} > 0$,
d.) $\beta + \gamma_{bw} = 0$, $\beta - \gamma_{bw} < 0$, e.) $\beta - \gamma_{bw} < \beta + \gamma_{bw} < 0$ (Hornig ve diğ., 2002)

2.3.4. Viskos Sıvı Sönümleyiciler

Viskos sönümleyiciler, silikon bazlı yağ gibi viskos bir sıvı içeren kapalı bir silindir ve bunun içinde hareket eden bir pistondan oluşmaktadır (Şekil 2.12). Piston çubuğu, ucunda küçük delikler bulunan bir başlığa bağlıdır. Piston, silindirin içinde hareket ederken viskos sıvı piston başının üzerinde bulunan deliklerden geçer. Sıvının bu hareketi sırasında oluşan sürtünme ile enerji sönümlemesi gerçekleşmektedir. Piston başının çapı ve deliklerin alanı, viskos sıvı sönümleyicinin sönüm özelliklerini belirlemektedir. Viskos sıvı sönümleyicilerde oluşan kuvvet (2.66) ifadesi ile verilmektedir (Haskell ve Lee, 1997).

$$F_{VD} = c|\dot{v}_b|^n \text{sgn}(\dot{v}_b) \quad (2.66)$$

Bu ifadede $\dot{v}_b$ sönümleyicinin karşılıklı iki ucu arasındaki görelî hızı, c sönümü ve n ise piston başlığının geometrisine göre 0.30 ile 2.00 arasında değışen bir katsayıyı göstermektedir. Yapısal uygulamalar için n katsayısının değeri 0.30 ile 1.00 arasında seçilmektedir. Doğrusal viskos sönümleyiciler için $n=1$ değeri almaktadır. Signum fonksiyonu ise görelî hızın yönüne göre oluşan kuvvetin işaretini vermektedir (Tsopelas et al., 2005).



Şekil 2.12 : Viskos Sıvı Sönümleyici (Constantinou, 2004)

Viskos sıvı sönümleyiciler, enerji sönümü arttırmak için üst yapıda ya da sismik yalıtım sistemi elemanlarıyla beraber kullanılabilir. Viskos sıvı sönümleyicilerinin tasarımı ile ilgili ayrıntılı bilgi (Soong ve Dargush, 1997), (Constantinou ve Symans, 1992) ve (Reinhorn ve Constantinou, 1995) kaynaklarından elde edilebilir.

3. SIVI DEPOSUNUN MODELİNİN OLUŞTURULMASI

3.1.Giriş

Hareket eden haznelerin içerisindeki sıvının dinamik davranışı çeşitli mühendislik uygulamaları için birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve hazne tasarımında kullanılacak hidrodinamik kuvvetlerin pratik olarak elde edilebilmesi için çeşitli “mekanik benzer sistemler” geliştirilmiştir.

Bu yaklaşımla depo içerisindeki sürekli sıvı kütlesi, tek serbestlik dereceli sistemlere ayrılarak modellenmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik özellikleri ise basit trigonometrik ifadeler ya da abaklar yardımıyla elde edilmektedir. Bu mekanik benzer sistemlerin ilklerinden biri Housner tarafından rijit duvarlı silindirik ve dikdörtgen depolar için geliştirilen modeldir (Housner, 1957), (Housner, 1963). Bu modelde, sürekli sıvı kütlesinin tabana yakın olan kısmının depoyla beraber hareket ettiği ve serbest yüzeye yakın kısmının ise uzun periyotlu bir çalkalanma hareketi yaptığı kabul edilmiştir. Bu kabul doğrultusunda sürekli sıvı kütlesi, rijit kütle ve çalkalanan kütle olmak üzere birbirinden ayrık iki tek serbestlik dereceli sistem ile temsil edilmiştir (Rosenblueth ve Newmark, 1971). Housner tarafından geliştirilen bu model, sıvı depolarının tasarımı ve boyutlandırılmasında kullanılan birçok yönetmeliğe esas oluşturmıştır. Wozniak ve Mitchell, Housner’ın modelini silindirik çelik petrol depolarına uyarlanmıştır (Wozniak ve Mitchell, 1978). Bu uyarlama, silindirik çelik petrol depolarının boyutlandırılmasında kullanılan API 650 şartnamesinde kullanılmaktadır. Haroun, depo duvarlarının esnek olması durumunu araştırmış ve sürekli sıvı kütlesini birbirinden ayrık 3 tek serbestlik dereceli sistem ile temsil eden bir mekanik benzer sistem geliştirmiştir (Haroun ve Housner, 1981). Bu modelde, tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik özellikleri, depo geometrisine ve duvar kalınlığına bağlı olarak geliştirilen abaklar ile elde edilmektedir. Veletsos, elastik duvarlı sıvı depolarının elastik zeminlere oturması durumunda oluşan hidrodinamik etkileri araştırmıştır (Veletsos, 1984), (Veletsos ve Tang, 1992). Gündüz, duvarları elastik sıvı haznelerinin bağlaışık titreşimini incelemiştir (Gündüz, 1988). Bu araştırmalar, zemin koşullarının ve duvar

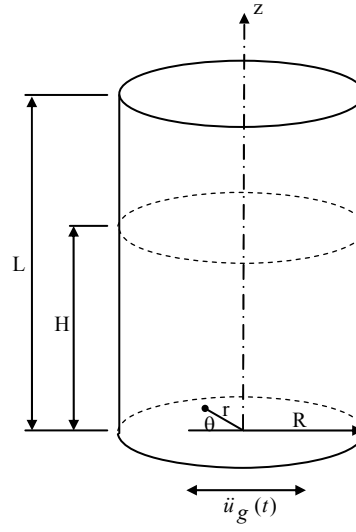
esnekliğinin, sabit tabanlı sıvı haznelerinde oluşan hidrodinamik etkileri önemli ölçüde değiştirebildiğini göstermiştir. Chalhoub ve Kelly, sismik yalıtımlı depolarda hidrodinamik etkilerin incelenebilmesi için rijit duvarlı depolar için analitik ifadeler geliştirilmiştir. Analitik ifadelerin çıkarılmasında, darbesel bileşenin sıvı yüzeyi hareketi üzerindeki etkileri göz önüne alınmıştır (Chalhoub ve Kelly, 1988). Malhotra ve Veletsos, yere sabitlenmemiş sıvı depolarının yerden kalkma etkisini araştırmıştır (Malhotra ve Veletsos, 1994). Özellikle yükseklikleri çaplarına göre çok büyük depolarda, yerden kalkma nedeniyle duvarda oluşan hidrodinamik etkilerin azaldığı ancak bununla beraber duvardaki normal gerilmelerin arttığı belirtilmiştir. Malhotra, esnek duvarlı depolar için iki tek serbestlik dereceli sistemden oluşan bir model oluşturmuştur (Malhotra, 2000) (Malhotra ve diğ. 2000). Bu model, halen hazırlanmakta olan Hint deprem yönetmeliğinin sıvı depoları bölümünde kullanılmaktadır.

Bu bölümde, ilk olarak rijit duvarlı silindirik bir deponun duvarlarında oluşan hidrodinamik basıncı ve sıvı yüzeyi hareketini veren analitik ifadelerin çıkarılması gösterilmiştir. Söz konusu ifadelerin çıkarılmasında Veletsos ve Chalhoub'un çözümleri takip edilmiştir (Veletsos, 1984) (Chalhoub ve Kelly, 1988), (Chalhoub ve Kelly, 1990). Daha sonra, analitik çözümlerden yararlanılarak yer hareketinin herhangi bir anında sıvı yüzeyi profilini ve hidrodinamik etkileri veren bağımsız iki yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılımlar sırasıyla Veletsos ve Chalhoub tarafından sunulan çözüm yöntemlerini kullanmaktadır. Yazılımların doğruluğunu değerlendirebilmek için (Veletsos, 1984) kaynağında bulunan problemler ele alınmış ve üretilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Söz konusu kıyaslama Ek-A'da verilmiştir. Bu bölümde Veletsos tarafından sunulan çözüm ana hatlarıyla izlenmiştir. Chalhoub ve Kelly tarafından elde edilen çözüm ise Ek-A'da verilmiştir.

Bir sonraki aşamada, sabit tabanlı depolar için üretilen analitik ifadelerden yararlanılarak sismik yalıtımlı depolarda oluşan hidrodinamik etkilerin hesaplanması üzerinde durulacaktır. Sismik yalıtım sistemi elemanları ikinci bölümde verilen bilgiler doğrultusunda modelleneyecektir. Sismik yalıtımlı depolarda oluşan hidrodinamik etkiler geliştirilen yazılım ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen yazılımların kaynak kodları Ek-G'de verilmiştir.

3.2. Rijit duvarlı silindir depoların analizi

Problemin sınır koşullarının belirlenebilmesi için R yarıçapında, L yüksekliğinde ve H yüksekliğine kadar ρ yoğunluğunda bir sıvıyla dolu olan ve zamana bağlı $x_g(t)$ yatay taban hareketine maruz kalan rijit duvarlı bir silindir depo ele alınacaktır. Sıvı ve depo üzerinde yer alan noktaların konumları silindirik bir koordinat sistemi (r , θ ve z) kullanılarak tanımlanacaktır. Söz konusu sistemin başlangıcı depo tabanının merkezinde ve $\theta=0$ doğrultusu yatay hareket yönündedir. Sıvı deposunun geometrisi ve çözümde kullanılan koordinat sistemi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Rijit duvarlı sıvı depo modeli (Veletsos, 1984)

Hareket denklemlerinin çıkarılmasında, sıvının viskos olmadığı, sıvı akışının çevrintisiz olduğu, sıvı ve depo arasında boşluk oluşmadığı ve sıvı ve deponun hareketlerinin lineer elastik sınır içerisinde kalacağı varsayımları kullanılmıştır. Bu varsayımlar doğrultusunda sıvı hareketi (3.1) eşitliğinde verilen Laplace denklemini sağlamalıdır. Bu denklem, depo duvarı, tabanı ve serbest sıvı yüzeyindeki sınır koşullarından yararlanılarak çözülecektir (Veletsos, 1984).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

Bu ifadede ϕ , hız potansiyelini göstermektedir. Hız potansiyeli r , θ , z ve t 'nin bir fonksiyonudur.

Sıvı içerisinde rastgele bir noktada t anında n yönündeki hız v_n ve hidrodinamik basınç p ile gösterilirse; hız potansiyeli fonksiyonuyla hız ve hidrodinamik basınç arasındaki ilişki (3.2) ve (3.3) eşitlikleri ile tanımlanabilir. (3.3) eşitliğinde ρ_l , sıvının özkütlesini göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$v_n = -\frac{\partial \phi}{\partial n} \quad (3.2)$$

$$p = \rho_l \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3.3)$$

Sıvı hareketini tanımlayan Laplace denkleminin çözümü aşağıda verilen sınır koşullarını sağlamalıdır (Veletsos, 1984).

- Depo tabanında ($z=0$), sıvı hızının düşey bileşeni sıfıra eşit olmalıdır (3.4).

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.4)$$

- Depo duvarı boyunca ($r=R$), sıvı ve deponun radyal hızları birbirine eşit olmalıdır (3.5a). Bu ifadede, $w(z,\theta,t)$ duvarın radyal yer değiştirmesini göstermektedir.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.5a)$$

Rijit depolarda duvar, yer ile aynı hareketi yapacaktır. Dolayısıyla, (3.5a) ifadesi rijit depolar için (3.5b) ifadesine dönüşmektedir.

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=R} = \dot{u}_g(t) \cos \theta \quad (3.5b)$$

- Serbest sıvı yüzeyindeki sınır şartı $z=H$ düzlemindeki basınç durumundan yararlanılarak elde edilecektir. Çalkalanma sonucu sıvının serbest yüzeye göre yaptığı yer değiştirme $d(r,\theta,t)$ ile ifade edilirse; $z=H$ düzlemindeki bir noktada hidrodinamik basınç, noktanın üzerindeki sıvı kolonunun ağırlığına eşit olacaktır (3.6). Bu ifadede, g yerçekimi ivmesini göstermektedir.

$$\rho_l \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=H} = \rho_l g d(r, \theta, t) \quad (3.6)$$

(3.6) ifadesinin zamana göre kısmi türevi alınır ve (3.7)'de verilen sıvı yüzeyi hızı ifadesi kullanılırsa (3.8) eşitliğinde verilen sınır koşulu elde edilir.

$$v_z \Big|_{z=H} = \frac{\partial d(r, \theta, t)}{\partial t} = - \frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=H} \quad (3.7)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \Big|_{z=H} = 0 \quad (3.8)$$

Hız potansiyeli ifadesi, darbesel ve devinimli bileşenlerinin toplamı olarak (3.9) ifadesinde verilmiştir. Bu ifadede, ϕ_i hız potansiyeli fonksiyonunun darbesel bileşenini, ϕ_c ise devinimli bileşenini göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$\phi(r, \theta, z, t) = \phi_i(r, \theta, z, t) + \phi_c(r, \theta, z, t) \quad (3.9)$$

Darbesel bileşen, depo duvarı ve tabanında tanımlanan sınır koşullarını ve $z=H$ düzleminde $p=0$ koşulunu sağlamaktadır. Devinimli bileşeni ise darbesel bileşenin çözümünde kullanılan $z=H$ düzlemindeki sınır koşulu ile (3.8) ifadesinde verilen gerçek sınır koşulu arasındaki farkı düzeltmektedir. Hız potansiyeli fonksiyonunun bileşenleri ve sağladıkları sınır koşulları Tablo 3.1'de özetlenmiştir (Veletsos, 1984).

Tablo 3.1 : Hız potansiyeli fonksiyonunun bileşenleri ve sağladıkları sınır koşulları

	Darbesel Bileşen $\phi_i = \phi_i(r, \theta, z, t)$	Devinimli Bileşen $\phi_c = \phi_c(r, \theta, z, t)$
$z = 0$	$\frac{\partial \phi_i}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \phi_c}{\partial z} = 0$
$r = R$	$\frac{\partial \phi_i}{\partial r} = -\dot{u}_g(t) \cos \theta$	$\frac{\partial \phi_c}{\partial r} = 0$
$z = H$	$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = 0$	$\frac{\partial^2 \phi_c}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_c}{\partial z} = -g \frac{\partial \phi_i}{\partial z}$

3.2.1. Darbesel Bileşen

Hız potansiyeli ifadesinin darbesel bileşenin çözüm (3.11) ifadesinde verilmiştir. Söz konusu ifadenin adım adım çıkarılışı (Yang, 1976) kaynağında verilmiştir.

$$\phi_i = C_0(r, z) R \ddot{u}_g(t) \cos \theta \quad (3.11)$$

C_0 fonksiyonu (3.12), darbesel hidrodinamik basıncın sıvı yüksekliği boyunca dağılımını vermektedir. (3.12) ifadesinde yer alan I_1 ve I_1' sırasıyla, birinci tip ve birinci mertebeden modifiye Bessel fonksiyonunu ve birinci türevini göstermektedir. Modifiye Bessel fonksiyonları ve çözümleri hakkında ayrıntılı bilgi (Kreyszig, 1998) kaynağından elde edilebilir. Depo yüksekliği boyunca basınç dağılımının hesaplanmasında (3.12) ifadesindeki serinin ilk 20 teriminin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür.

$$C_0(r, z) = \frac{8}{\pi^2} \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{r}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{r}{H} \right]} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{H} \right] \quad (3.12)$$

Darbesel bileşenin sıvının herhangi bir noktasında oluşturduğu hidrodinamik basınç (3.3) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir (3.13) (Veletsos, 1984).

$$p_i(r, z, \theta, t) = C_0(r, z) \rho_l R \ddot{u}_g(t) \cos \theta \quad (3.13)$$

Depo duvarında oluşan darbesel hidrodinamik basınç ise yukarıdaki ifadede C_0 fonksiyonunun $r=R$ durumunun incelenmesi sonucu elde edilebilir (3.14) (Veletsos, 1984).

$$p_i(R, z, \theta, t) = C_0(R, z) \rho_l R \ddot{u}_g(t) \cos \theta \quad (3.14)$$

Depo duvarında oluşan hidrodinamik basıncın oluşturduğu taban kesme kuvveti $Q(t)$ (3.15) ifadesiyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$Q(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^H p|_{r=R} R \cos \theta dz d\theta \quad (3.15)$$

Hidrodinamik basıncın darbesel bileşeninin oluşturduğu taban kesme kuvveti Q_i (3.16), (3.14) ifadesinin (3.15)'de yerine koyulmasıyla elde edilebilir (Veletsos, 1984).

$$Q_i(t) = m_l \ddot{u}_g(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]} \quad (3.16)$$

Taban kesme kuvveti ifadesi (3.17)'de yeniden yazılmıştır (Veletsos, 1984).

$$Q_i(t) = m_0 \ddot{u}_g(t) \quad (3.17)$$

Bu ifadede m_0 (3.18), darbesel kütleyi göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$m_0 = m_l \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]} \quad (3.18)$$

Darbesel bileşenin depo duvarında ($r=R$) oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti (3.19) ifadesiyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$M_i(t) = \int_0^{2\pi H} \int_0^R p|_{r=R} R z \cos \theta dz d\theta \quad (3.19)$$

Darbesel bileşenin depo tabanında ($z=0$) oluşturduğu hidrodinamik basınçtan kaynaklanan eğilme momenti artışı (3.20) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$\Delta M_i(t) = \int_0^{2\pi H} \int_0^R p|_{z=0} r^2 \cos \theta dz d\theta \quad (3.20)$$

(3.19) ve (3.20) ifadeleri açılırsa (3.21) ve (3.22) ifadeleri elde edilir (Veletsos, 1984).

$$M_i(t) = m_l H \ddot{u}_g(t) \sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \frac{2(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \right] \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]} \quad (3.21)$$

$$\Delta M_i(t) = m_i H \ddot{u}_g(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \frac{I_2 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2H} \right]} \quad (3.22)$$

(3.22) ifadesinde I_2 , birinci tip ve ikinci mertebeden modifiye Bessel fonksiyonudur.

Depo duvarının tasarımında $M_i(t)$ eğilme momenti, depo temelini hesabında ise tabanda oluşan hidrodinamik basıncı da göz önünde bulunduran $M_i(t) + \Delta M_i(t)$ eğilme momenti kullanılacaktır.

Taban kesme kuvveti ve eğilme moment ifadeleri kullanılarak darbesel kütlenin depo tabanından yüksekliği olan h_0 (3.23) ifadesinde hesaplanmıştır.

$$h_0 = \frac{M_i(t)}{Q_i(t)} \quad (3.23)$$

Tabanda oluşan hidrodinamik basıncın oluşturduğu eğilme momenti artışından kaynaklanan yükseklik artışı Δh_0 (3.24) ifadesinde hesaplanmıştır (Veletsos, 1984).

$$\Delta h_0 = \frac{\Delta M_i(t)}{Q_i(t)} \quad (3.24)$$

3.2.2. Devinimli Bileşen

İlk aşamada, genliği $\ddot{x}_0$ ve açısal frekansı $\bar{\omega}$ olan $\ddot{x}_h(t) = \ddot{x}_0 e^{i\bar{\omega}t}$ harmonik taban hareketi için hız potansiyelinin devinimli bileşeninin çözümünün çıkartılması üzerinde durulacaktır. Daha sonra harmonik hareket için elde edilen çözümden faydalanılarak rastgele taban hareketi için hız potansiyelinin devinimli bileşeninin çözümünün elde edilmesi gösterilecektir.

3.2.2.1. Harmonik hareket

Harmonik taban hareketi ve Tablo 3.1'de özetlenen sınır koşulları için hız potansiyelinin devinimli bileşeninin çözümü (3.25) ifadesinde verilmiştir. Söz konusu çözüm, sonsuz sayıda çalkalanma modunun çözümünün toplamı olarak ifade edilmiştir.

$$\phi_c = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{C_j(r, z)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j}\right)^2} R \frac{\ddot{x}_0}{i\omega} e^{i\omega t} \cos \theta \quad (3.25)$$

Bu ifadede C_j açık olarak (3.26) ifadesinde verilmiştir. (3.26) ifadesinde J_1 , birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunu göstermektedir. Yine (3.26) ifadesinde yer alan λ_j ise $J_1(\lambda) = 0$ denkleminin j . köküdür. Birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunun türevinin ilk on kökü Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 : $J_1'(\lambda) = 0$ ifadesinin ilk on kökü (Chalhoub ve Kelly, 1998)

j	λ_j
1	1.84118
2	5.33144
3	8.53632
4	11.70600
5	14.86359
6	18.01553
7	21.16437
8	24.31133
9	27.45705
10	30.60192

$$C_j(r, z) = -\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{J_1\left(\lambda_j \frac{r}{R}\right) \cosh\left(\lambda_j \frac{z}{R}\right)}{J_1(\lambda_j) \cosh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right)} \quad (3.26)$$

Hız potansiyel ifadesinde (3.25) yer alan ω_j ise j . çalkalanma modunun açısal frekansını göstermektedir. Çalkalanma modlarının açısal frekansları (3.27) ifadesi ile hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$\omega_j^2 = \frac{\lambda_j g}{R} \tanh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right) \quad (3.27)$$

Yukarıda belirtilen ifadelerin değişik yöntemler ile ayrıntılı olarak çıkarılması (Chalhoub and Kelly, 1988), (Yang, 1976) ve (Abramson, 1966) kaynaklarında ele alınmıştır.

Devinimli bileşenin oluşturduğu hidrodinamik basınç (3.28), (3.25) ifadesinin (3.3) ifadesine yerleştirilmesiyle elde edilebilir. Duvarda oluşan hidrodinamik basınç ise C_j ifadesinin $r=R$ durumunda değerlendirilmesiyle elde edilebilir.

$$p_c = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{C_j(r, z)}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} \rho_l R \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \cos \theta \quad (3.28)$$

Devinimli bileşenin taban kesme kuvvetine olan katkısı $Q_c(t)$ (3.29), (3.15) ifadesinde p yerine (3.28)'ifadesinin yerleştirilmesiyle elde edilebilir (Veletsos, 1984).

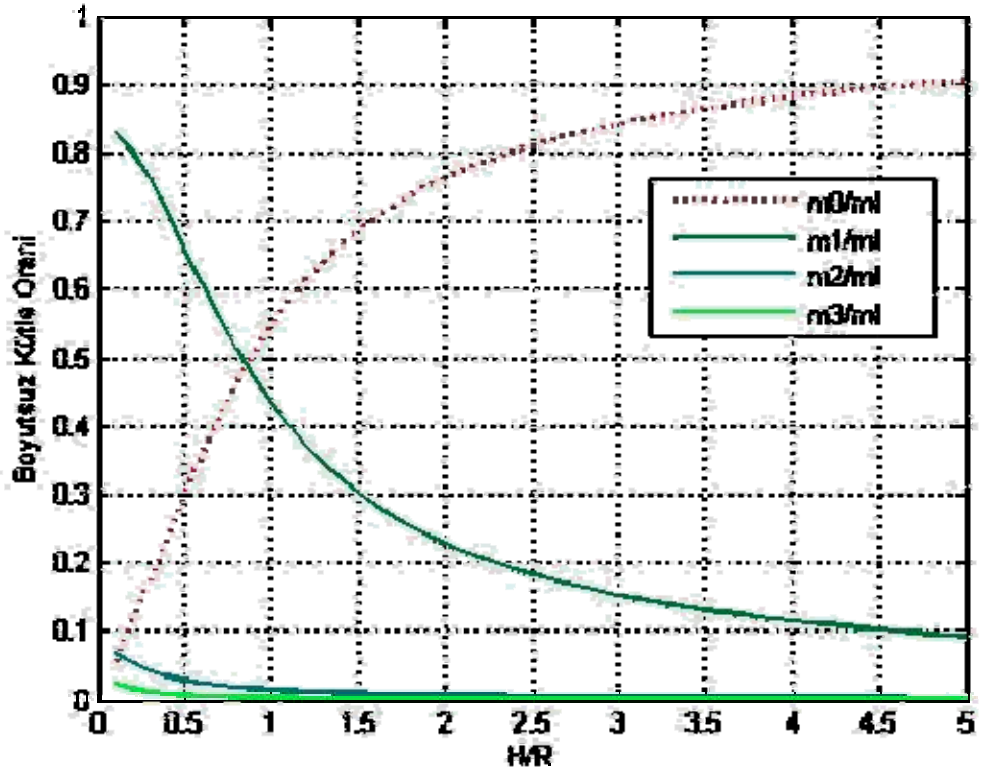
$$Q_c(t) = \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\left[\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{R}{\lambda_j H} \tanh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right) \right] m_j}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} \quad (3.29)$$

Taban kesme kuvveti ifadesi ifadesi çalkalanma modlarına ait kütleler (3.31) kullanılarak (3.30) ifadesinde yeniden yazılmıştır (Veletsos, 1984). Söz konusu ifadede, m_j , j . çalkalanma moduna karşılık gelen kütle göstermektedir.

$$Q_c(t) = \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{m_j}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} \quad (3.30)$$

$$m_j = \left[\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{R}{\lambda_j H} \tanh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right) \right] m_l \quad (3.31)$$

Benzer şekilde, devinimli bileşeni hidrodinamik duvar ve taban basınçlarının oluşturduğu $M_c(t)$ (3.32) ve $\Delta M_c(t)$ (3.34) eğilme momentleri (3.19) ve (3.20) ifadeleri kullanılarak elde edilebilir. Mekanik modellerde kullanılacak olan h_j ve Δh_j yükseklikleri ise (3.33) ve (3.35) ifadelerinde verilmiştir (Veletsos, 1984). Depo geometrisine bağlı olarak darbesel kütlelerin ve devinimli modlara ait kütlelerin toplam sıvı kütesine oranının değişimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Depo geometrisine bağlı olarak darbesel kütle ve devinimli modlara ait kütlelerin toplam sıvı külesine oranının değişimi

$$M_c(t) = \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{m_j h_j}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} \quad (3.32)$$

$$h_j = \left[1 - \frac{R}{\lambda_j H} \tanh\left(\frac{\lambda_j H}{2R}\right) \right] H \quad (3.33)$$

$$\Delta M_c(t) = \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{m_j \Delta h_j}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} \quad (3.34)$$

$$\Delta h_j = \frac{R}{\lambda_j \sinh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right)} \quad (3.35)$$

Sıvı yüzeyinin düşey yer değiştirmesi $d(r, \theta, t)$, (3.6) ifadesi kullanılarak elde elde edilebilir. Darbesel bileşen $z = H$ düzleminde hidrodinamik basınç oluşturmadığı için

(3.6) ifadesinin sol tarafında yer alan ifade devinimli bileşenden kaynaklanan basıncın etkisini göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafı ise (3.28) eşitliğinin $z = H$ durumu kullanılırsa (3.36) eşitliği elde edilir (Veletsos, 1984).

$$d(r, \theta, t) = R \left[\sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j} \right)^2} \frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{J_1 \left(\lambda_j \frac{r}{R} \right)}{J_1(\lambda_j)} \right] \frac{\ddot{x}_0}{g} e^{i\varpi t} \cos \theta \quad (3.36)$$

3.2.2.2. Geçici titreşim hareketi

Sistemin harmonik taban hareketi altında davranışının belirlenmesi, rasgele taban hareketi altındaki davranışın ters Fourier dönüşümü ve Duhamel integrali yardımıyla bulunmasına olanak vermektedir.

Genelleştirilmiş yer değiştirme vektörü $q(t)$ (3.37); zaman, yer hareketinin frekansı, ve (r, θ, z) koordinatlarının fonksiyonudur.

$$q(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{g_j \cos \theta}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j} \right)^2} \ddot{x}_0 e^{i\varpi t} \quad (3.37)$$

Bu ifadede g_j ; r , z ya da her iki koordinata da bağlı olan bir sabittir.

Sistemin transfer fonksiyonu H_q , (3.38) ifadesinde verilmiştir. H_q , $q(t)$ 'nin $\ddot{x}_0 e^{i\varpi t}$ 'ye olan oranını göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$H_q(\varpi) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{g_j \cos \theta}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j} \right)^2} \quad (3.38)$$

$h_q(t)$ (3.39) ise $\ddot{x}(t) = \delta(t)$ ivmesine olan tepkiyi göstermektedir. Burada $\delta(t)$, Dirac deltası fonksiyonudur (Veletsos, 1984).

$$h_q(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_q(\varpi) e^{i\varpi t} d\varpi \quad (3.39)$$

(3.38) ifadesi, (3.39) ifadesinde yerine koyulursa (3.40) ve düzenleme yapıldıktan sonra (3.41) elde edilebilir (Veletsos, 1984).

$$h_q(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^{\infty} g_j \cos \theta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{i\varpi t}}{1 - \left(\frac{\varpi}{\omega_j}\right)^2} d\varpi \quad (3.40)$$

$$h_q(t) = \sum_{j=1}^{\infty} g_j \cos \theta [\omega_j \sin \omega_j t] \quad (3.41)$$

$h_q(t)$ 'nin belirlenmesinden sonra $\ddot{x}_g(t)$ rastgele yer hareketine maruz kalan sistemin davranışı (3.43) Duhamel integrali (3.42) yardımıyla belirlenebilir (Veletsos, 1984).

$$q(t) = \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) h_q(t-\tau) d\tau \quad (3.42)$$

$$q(t) = \sum_{j=1}^{\infty} g_j \cos \theta \left[\omega_j \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) \sin[\omega_j(t-\tau)] d\tau \right] \quad (3.43)$$

Yukarıda köşeli parantez içerisindeki ifade $A_j(t)$ (3.44) olarak gösterilirse (3.42), (3.45) ifadesine dönüşür (Veletsos, 1984).

$$A_j(t) = \omega_j \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) \sin[\omega_j(t-\tau)] d\tau \quad (3.44)$$

$$q(t) = \sum_{j=1}^{\infty} g_j A_j(t) \cos \theta \quad (3.45)$$

(3.45) ve (3.37) karşılaştırılırsa harmonik hareket için elde edilen sonuçların $\ddot{x}_0(t) e^{i\varpi t} / \left[1 - (\varpi/\omega_j)^2 \right]$ ile $A_j(t)$ 'nin değiştirilmesi durumunda rastgele taban hareketi için kullanılabileceği görülebilir. $A_j(t)$, j devinimli kütlesinin sözde ivmesinin zaman içerisindeki değişimini vermektedir. Devinimli modların sönümlerinin ihmal edilebilecek mertebede olması nedeniyle bu denklem kullanılmıştır.

Bu durumda, (3.36) ifadesinden yola çıkılarak sıvı yüzeyinin yer değiştirmeleri (3.46)'da hesaplanmıştır (Veletsos, 1984).

$$d(r, \theta, t) = R \left[\sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{J_1\left(\lambda_j \frac{r}{R}\right)}{J_1(\lambda_j)} \frac{A_j(t)}{g} \right] \cos \theta \quad (3.46)$$

Yer hareketi doğrultusunda sıvının depo ile temas eden noktasının ($r=R$ ve $z=H$) zamana göre yer değiştirmeleri (3.47) ile hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$d_w(t) = d(R, 0, t) = R \left[\sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{A_j(t)}{g} \right] \quad (3.47)$$

Devinimli modların taban hareketi yönünde serbest sıvı yüzeyinin düşey yer değiştirmesine olan katkıları Şekil 3.3’de ilk 5 mod için gösterilmiştir.

3.2.3. Depoda Oluşan En Elverişsiz Hidrodinamik Etkiler

Buraya kadar olan kısımda sıvının taban hareketi nedeniyle herhangi bir t anında oluşturduğu hidrodinamik etkiler; hız potansiyeli ifadesi ve sınır koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Bu aşamada ise depo oluşan en elverişsiz hidrodinamik etkiler incelenecektir. En elverişsiz değerlerin hesaplanması, modal periyotların yakınlığı ilkesine göre modların birleştirilmesi karelerin toplamının karekökü (SRSS) veya tam karesel birleştirme yöntemleriyle yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan depo geometrileri için karelerin toplamının karekökü yönteminin modların birleştirilmesi için uygun olduğu görülmüştür. Ancak ayrık doğal frekansların oluşmadığı depo geometrileri için tam karesel birleştirme yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır.

3.2.3.1. Hidrodinamik Basınç

Taban hareketi nedeniyle sıvının depo üzerinde herhangi bir t anında oluşturduğu toplam hidrodinamik basınç (3.48) ifadesiyle tarif edilebilir.

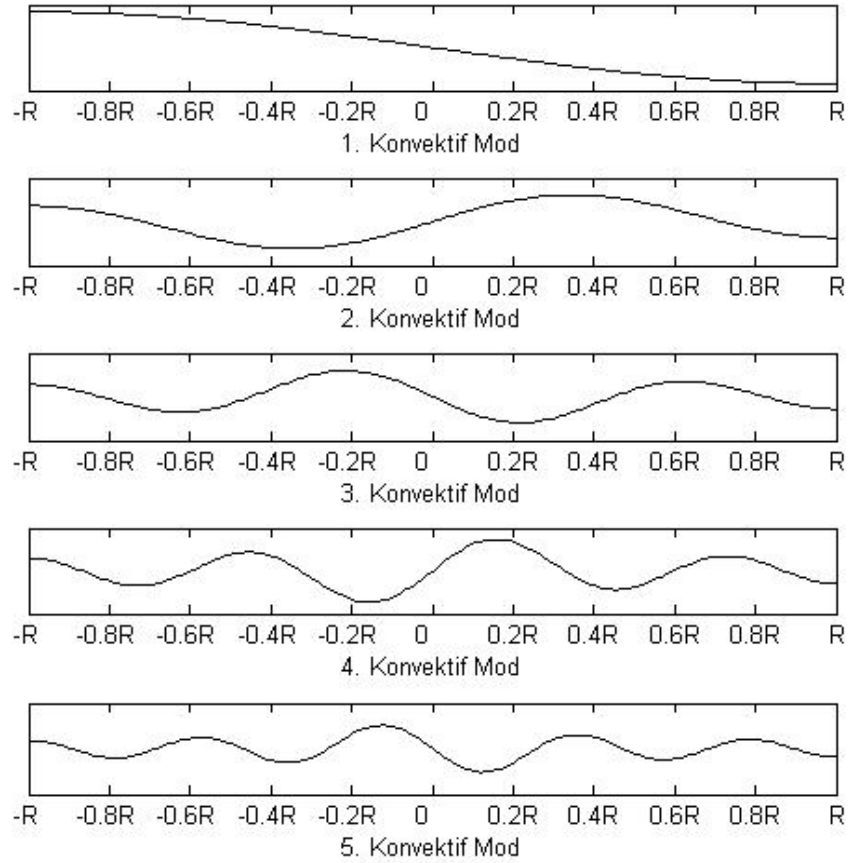
$$p(z, \theta, t) = p_i(z, \theta, t) + p_c(z, \theta, t) \quad (3.48)$$

Bu ifadede, $p_i(z, \theta, t)$ (3.49) ve $p_c(z, \theta, t)$ (3.51) sırasıyla darbesel ve devinimli bileşenlerin herhangi bir t anında depo üzerinde ($r=R$) oluşturduğu hidrodinamik basıncı göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$p_i(z, \theta, t) = c_0(z) \ddot{u}_g(t) \rho_l R \cos \theta \quad (3.49)$$

Bu ifadede $c_0(z)$, (3.13) ifadesinde ($r=R$) yerleştirilmesiyle elde edilmektedir (3.50).

$$c_0(z) = C_0(R, z) = \frac{8}{\pi^2} \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2 H} \right]} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi z}{2 H} \right] \quad (3.50)$$



Şekil 3.3 : İlk 5 devinimli moda ait düşey yerdeğiştirmelerinin dağılımı

$$p_c(z, \theta, t) = \sum_{j=1}^{\infty} [c_j(z) A_j(t)] \rho_l R \cos \theta \quad (3.51)$$

Yukarıdaki ifadede $c_j(z)$ (3.52), (3.26) ifadesinin ($r=R$) durumu için düzenlenmesiyle elde edilmektedir (Veletsos, 1984) (Veletsos, 1984).

$$c_j(z) = C_j(R, z) = -\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{\cosh\left(\lambda_j \frac{z}{R}\right)}{\cosh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right)} \quad (3.52)$$

Darbesel basınç dağılımını veren c_0 fonksiyonunun değişimi Şekil 3.4'de incelenmiştir. H/R oranından bağımsız c_0 değerinin depo tabanında en yüksek değerine ulaştığı ve sıvı yüzeyinde ise sıfır olduğu görülmektedir. H/R oranının artmasıyla c_0 fonksiyonunun tabandaki değeri 1'e yaklaşmaktadır. Buna ek olarak, H/R oranının artmasıyla c_0 dağılımının düşeyde giderek üniform bir hali almaktadır. Buradan da, dar ve uzun depolarda üniform bölgede sıvının rijit bir kütle gibi davrandığı görülmektedir.

İlk iki devinimli moda ait c_j fonksiyonları değişen H/R değerleri için Şekil 3.5'de incelenmiştir. Özellikle dar ve uzun depolarda, c_j değerlerinin yüzeyden aşağı doğru inildikçe hızla sönümlendiği görülmektedir. Buna ek olarak, c_1 değerlerinin c_2 değerlerinden yaklaşık 10 misli daha büyük olduğu görülmektedir. Buradan yüksek modlarda hidrodinamik basınca katılımın oldukça azaldığı anlaşılmaktadır.

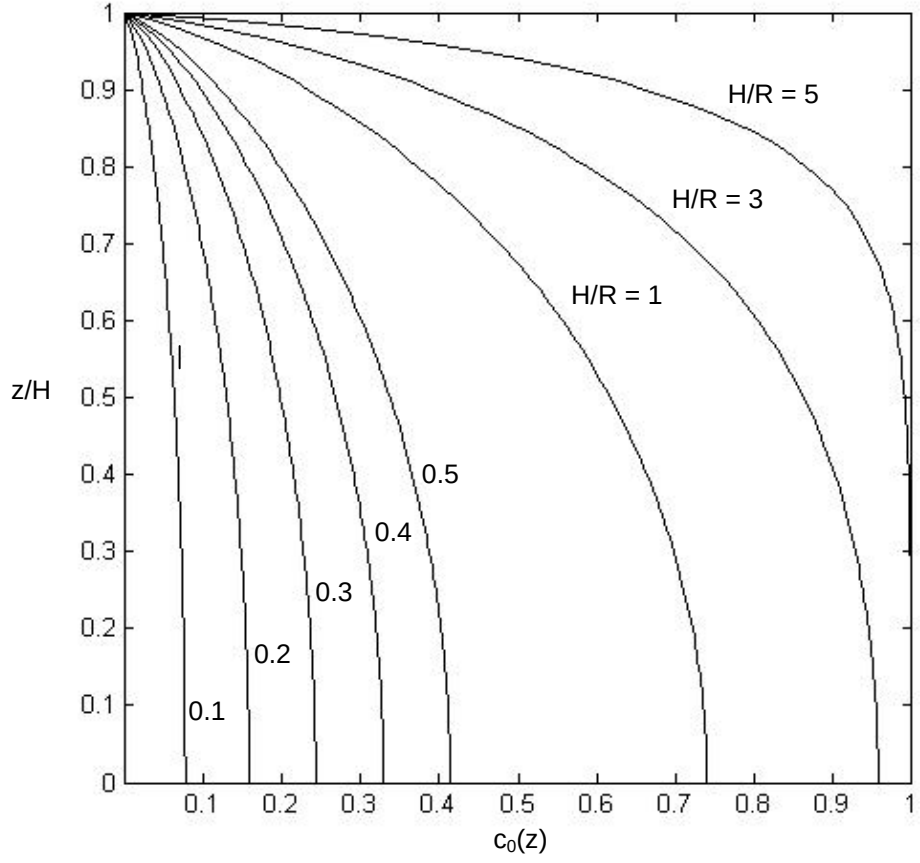
Bu çalışmada, depo duvarının herhangi bir noktasında oluşan hidrodinamik basıncın en büyük değeri, darbesel bileşen ile devinimli bileşenlerinin karelerinin karekökü toplanarak (3.53) ifadesiyle hesaplanmıştır. Bu ifadede $A_{j\max}$, $A_j(t)$ 'nin en büyük değeridir (Veletsos, 1984).

$$p_{\max}(z, \theta) = \left[c_0(z) \ddot{u}_{\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} [c_j(z) A_{j\max}]^2} \right] \rho_l R \cos \theta \quad (3.53)$$

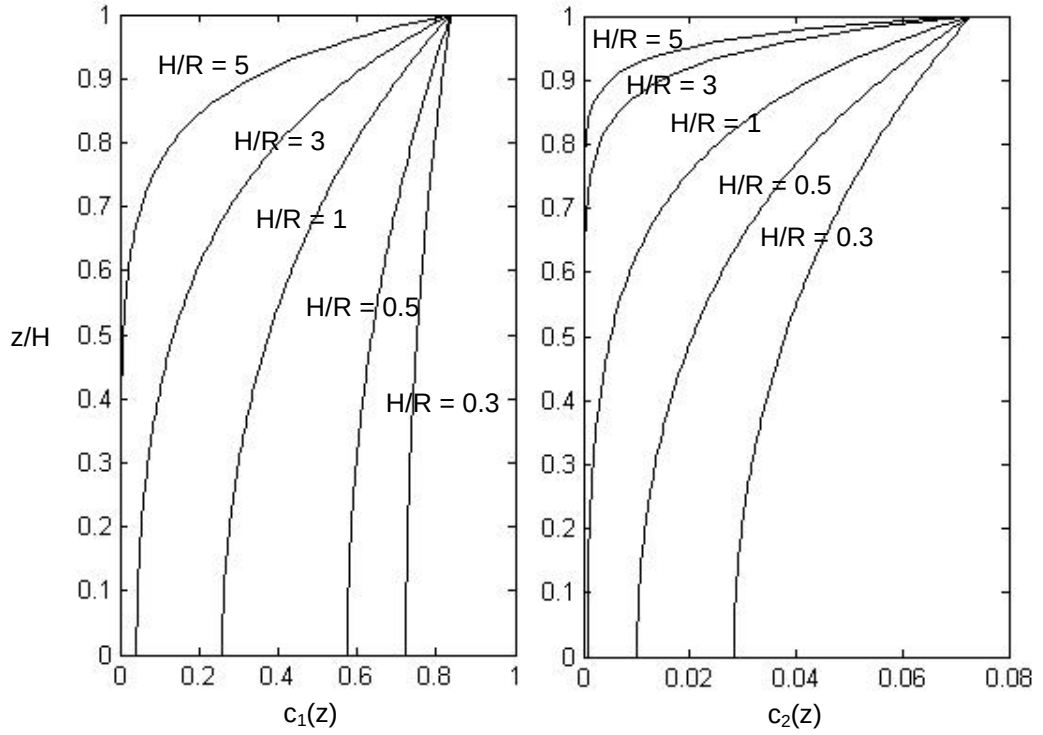
3.2.3.2. Sıvı Yüzeyinin Hareketi

Depo içerisinde muhafaza edilen sıvının çalkalanma nedeniyle dışarı taşmasını engellemek amacıyla serbest sıvı yüzeyi ile depo duvarının en yüksek noktası arasında bir hava payı bırakılmaktadır. Bu hava payı da (3.46) ifadesinde verilen devinimli modların sıvı yükselmesine olan katkılarının karelerinin toplamının karekökü alınarak (3.54) ifadesiyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$d_{\max} = R \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{A_{j\max}}{g} \right)^2} \quad (3.54)$$



Şekil 3.4 : Darbesel basınç katsayısı $c_0(z)$ 'nin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 3.5 : 1. ve 2. devinimli moda ait $c_1(z)$ ve $c_2(z)$ 'nin yükseklik boyunca değişimi

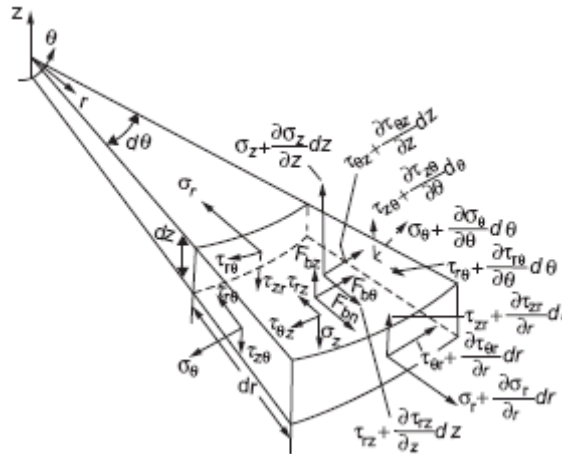
3.2.4. Depoda Oluşan Kuvvetler ve Gerilmeler

Depo duvarlarında oluşan hidrodinamik basıncın belirlenmesi ile beraber oluşan gerilmelerin (Şekil 3.6) en elverişsiz değerleri hesaplanabilir. Duvar kalınlığı sabit olan rijit depolarda en büyük gerilmeler depo tabanının hemen üzerinde oluşmaktadır. En büyük gerilmelerin hesaplanmasında kiriş teorisinin kullanılması durumunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Depo duvarında oluşan çevresel gerilmelerin en büyük değeri (3.55) ifadesiyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$\sigma_{\theta, \max} = \frac{\bar{p}_{\max} R}{t_w} \quad (3.55)$$

Bu ifadede $\bar{p}_{\max}$, hidrostatik ve hidrodinamik basıncın maksimumlarının toplamını, t_w ise depo duvarının kalınlığını göstermektedir.



Şekil 3.6 : Silindirik koordinatlarda gerilmeler (Linqaiah, 2002)

Depo duvarında oluşan kayma gerilmelerinin en büyük değeri (3.56) ifadesi ile hesaplanabilir.

$$\tau_{\max} = 2 \frac{Q_{\max}}{A_c} = \frac{1}{\pi} \frac{Q_{\max}}{R t_w} \quad (3.56)$$

Burada $Q_{\max}$, taban kesme kuvvetinin en büyük değerini ve A_c ise kesit alanını göstermektedir.

Depo duvarında oluşan normal gerilmelerin en büyük değeri $\sigma_{z,\max}$ ise benzer şekilde (3.57) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Söz konusu ifadede $M_{\max}$, depo duvarında oluşan eğilme momentinin en büyük değerini ve I ise depo duvarının atalet momentini göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$\sigma_{z,\max} = \frac{M_{\max} R}{I} = \frac{1}{\pi} \frac{M_{\max}}{R^2 t_w} \quad (3.57)$$

3.2.4.1. Hidrodinamik Taban Kesme Kuvveti ve Eğilme Momenti

Depo duvarında herhangi bir t anında oluşan taban kesme kuvveti, darbesel ve devinimli bileşenlerinin toplamı olarak (3.58) ifadesinde verilmiştir.

$$Q(t) = Q_i(t) + Q_c(t) \quad (3.58)$$

Bu ifadede, $Q_i(t)$ yerine (3.17) ifadesi ve (3.30) ifadesinde $\ddot{x}_0(t)e^{i\omega t} / [1 - (\omega/\omega_j)^2]$ yerine $A_j(t)$ yerleştirilmesiyle elde edilen $Q_c(t)$ ifadesi kullanılırsa taban kesme kuvveti (3.59)'da verilen hali alır (Veletsos, 1984).

$$Q(t) = m_0 \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j A_j(t) \quad (3.59)$$

Taban kesme kuvvetinin en büyük değeri, taban kesme kuvvetinin darbesel bileşeninin en büyük değeriyle devinimli bileşenlerinin en büyük değerlerinin karelerinin toplamının karekökünün toplanmasıyla hesaplanabilir (3.60) (Veletsos, 1984). Bu ifadede $\ddot{u}_{g,\max}$, yer ivmesinin en büyük değerini göstermektedir.

$$Q_{\max} = m_0 \ddot{u}_{g,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} [m_j A_{j\max}]^2} \quad (3.60)$$

Depo duvarına herhangi bir t anında oluşan eğilme momenti, darbesel ve devinimli bileşenlerinin toplamı olarak (3.61) ifadesinde verilmiştir (Veletsos, 1984).

$$M(t) = m_0 h_0 \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j A_j(t) \quad (3.61)$$

Depo temelinde herhangi bir t anında oluşan eğilme momenti, darbesel ve devinimli bileşenlerinin toplamı olarak (3.62) ifadesinde verilmiştir (Veletsos, 1984).

$$M'(t) = m_0 h_0' \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j' A_j(t) \quad (3.62)$$

Söz konusu ifadede yer alan yükseklikleri (3.63a) ve (3.63b) ifadeleri yardımıyla elde edilebilir (Veletsos, 1984).

$$h_0' = h_0 + \Delta h_0 \quad (3.63a)$$

$$h_j' = h_j + \Delta h_j \quad (3.63b)$$

(3.63) ifadelerinde yer alan Δh_0 ve Δh_j yükseklik farklarının değerleri sırasıyla (3.24) ve (3.35) ifadelerinde verilmiştir (Veletsos, 1984).

Depo duvarında ve temelinde oluşan en büyük eğilme momenti değerleri sırasıyla (3.64) ve (3.65) ifadeleriyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

$$M_{\max} = m_0 h_0 \ddot{u}_{g,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} (m_j h_j A_{j\max})^2} \quad (3.64)$$

$$M'_{\max} = m_0 h_0' \ddot{u}_{g,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} (m_j h_j' A_{j\max})^2} \quad (3.65)$$

Depo temelinden zemine iletilen gerilmelerin dağılımı hakkında bir fikir edinmek için hidrodinamik basıncın darbesel bileşeninin depo tabanında oluşturduğu gerilmeler incelenecektir. Depo tabanında darbesel bileşeninin oluşturduğu hidrodinamik basınç (3.14) eşitliğinden yararlanılarak elde edilen (3.66) eşitliğiyle hesaplanabilir (Veletsos, 1984).

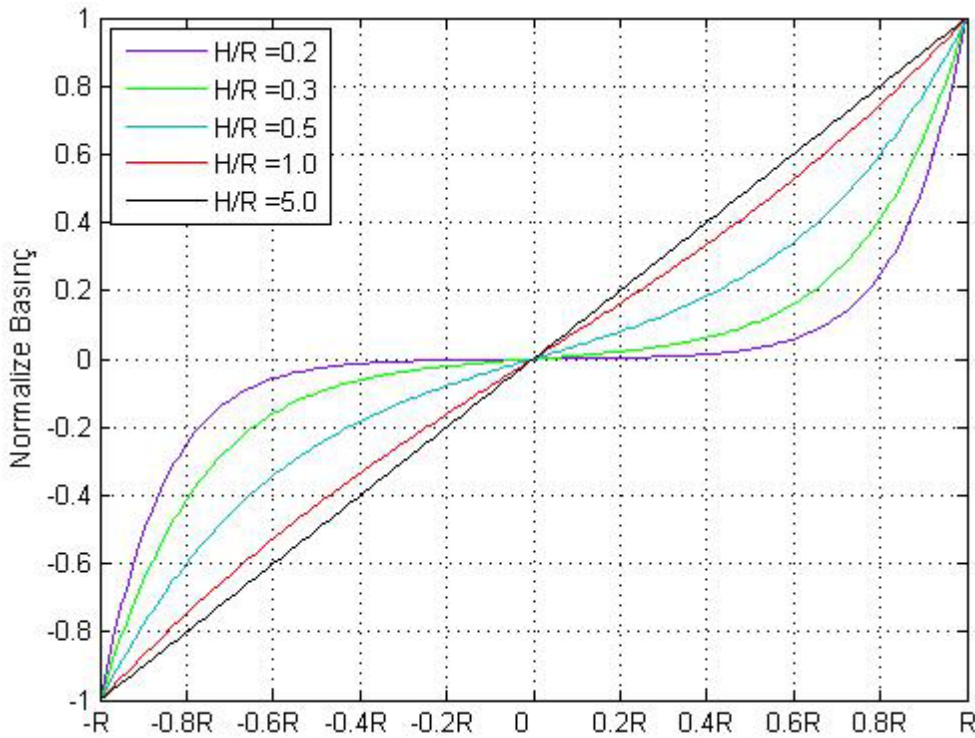
$$p_i(r,0,\theta,t) = C_0(r,0) \rho_l R \ddot{u}_g(t) \cos \theta \quad (3.66)$$

Yukarıdaki ifadede $C_0(r,0)$, depo tabanındaki gerilme dağılımını vermektedir (Veletsos, 1984).

$$C_0(r,0) = \frac{8}{\pi^2} \frac{H}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{r}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]} \quad (3.67)$$

Değişik depo geometrileri için (3.66) ve (3.67) ifadeleri kullanılarak depo tabanındaki hidrodinamik basınçların dağılımı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Şekil 3.7 incelendiğinde basık depolarda tabanda oluşan hidrodinamik basıncın depo duvarı yakınında yoğunlaştığı, yüksek depolarda ise taban boyunca üniform olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 3.7 : Depo tabanında hidrodinamik basınçların dağılımı

Depo duvarı ve çatının ataletinin taban kesme kuvveti ve eğilme momentine olan etkisi sırasıyla (3.68) ve (3.69) ifadeleriyle belirlenebilir (Veletsos, 1984).

$$Q_T(t) = (m_D + m_{\zeta})\ddot{u}_g(t) \quad (3.68)$$

$$M_T(t) = (m_D L_D + m_{\zeta} L_{\zeta})\ddot{u}_g(t) \quad (3.69)$$

Yukarıdaki ifadelerde m_T ve m_{ζ} , depo duvarı ve çatısının kütlesini; L_D ve L_{ζ} ise depo duvarı ve çatının ağırlık merkezlerini göstermektedir.

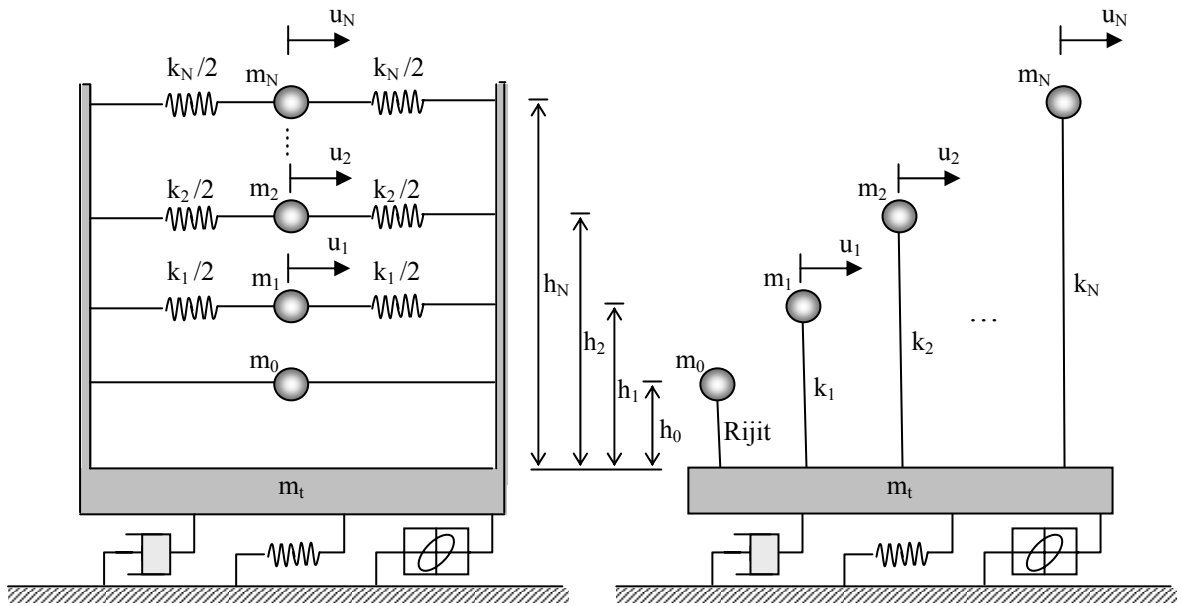
3.3. Sismik Yalıtımlı Depoların Hareket Denklemleri

Bu bölümde sismik yalıtımlı sıvı deposunun hareket denklemleri çıkartılacaktır. Sıvı deposunun mekanik benzer modeli Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu modelde, m_0 darbesel kütlesi (3.18) ifadesiyle, m_1 ’den m_N ’e kadar verilen devinimli kütleleriyle (3.31) ifadesiyle hesaplanabilir. Devinimli bileşenlerin k_1 ’den k_N ’e kadar olan rijitlikleri, devinimli modların (3.27) ifadesinde verilen açısal frekansları kullanılarak (3.70) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$k_j = m_j \omega_j^2 \quad (3.70)$$

Benzer şekilde, darbesel ve devinimli kütlelerin depo tabanından olan yükseklikleri sırasıyla (3.23) ve (3.27) ifadelerinden elde edilebilir.

Yalıtım sistemi elemanlarının davranışı Bölüm 2’de verilen bilgiler doğrultusunda modellenecektir.



Şekil 3.8 : Sismik yalıtımlı ve rijit duvarlı sıvı deposunun dinamik modeli

Sismik yalıtımlı depo sisteminin mutlak yer değiştirmeler kullanılarak oluşturulan hareket denklemleri (3.71), (3.72), (3.73), (3.74), (3.75) ve (3.76) eşitlikleriyle verilmiştir. Bu denklemlerde, 5 devinimli modun etkisi ele alınmıştır. Daha yüksek devinimli modların etkisinin oldukça küçük olduğu kabul edilmiştir. Pratik mühendislik uygulamalarında genelde 1 ya da 3 devinimli modun etkisi göz önüne alınmaktadır. Literatür çalışmasında devinimli modlara ait kritik sönüm oranının

% 0.5 olarak alındığı görülmüştür (Malhotra, 1997a. Malhotra, 1997b, Malhotra, 1998, Malhotra vd., 2000, Malhotra, 2000, Shirmali ve Jangid, 2002a, Shirmali ve Jangid, 2002b, Shirmali ve Jangid, 2003). Ancak bu bölümde çıkarılan ifadelerde sıvının viskos olmadığı ve depo duvarının rijit olduğu kabülleri yapıldığı için devinimli bileşenin sönümü ihmal edilmiştir.

$$m_1\ddot{u}_1 + k_1(u_1 - u_b) = 0 \quad (3.71)$$

$$m_2\ddot{u}_2 + k_2(u_2 - u_b) = 0 \quad (3.72)$$

$$m_3\ddot{u}_3 + k_3(u_3 - u_b) = 0 \quad (3.73)$$

$$m_4\ddot{u}_4 + k_4(u_4 - u_b) = 0 \quad (3.74)$$

$$m_5\ddot{u}_5 + k_5(u_5 - u_b) = 0 \quad (3.75)$$

$$m_b\ddot{u}_b + m_1\ddot{u}_1 + m_2\ddot{u}_2 + m_3\ddot{u}_3 + m_4\ddot{u}_4 + m_5\ddot{u}_5 + F_b = 0 \quad (3.76)$$

Yukarıda verilen hareket denklemlerinde, m_j , k_j , ve u_j sırasıyla j.nci devinimli moda ait kütle, yanal rijitlik ve mutlak yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Buna ek olarak, m_b mesnetlerin üzerindeki toplam rijit kütle (3.77) ve F_b ise sismik yalıtım sisteminde oluşan yanal kuvveti (3.78) göstermektedir.

$$m_b = m_0 + m_t \quad (3.77)$$

Bu ifadede m_0 darbesel kütle, m_t ise mesnetlerin üzerindeki tabliyenin ve boş deponun toplam kütlelerini göstermektedir.

Hareket denklemlerinin görelî yer değıştirmeler cinsinden yeniden yazılması, sonuçların değeriendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Görelî yer değıştirmeler cinsinden hareket denklemleri (3.78), (3.79), (3.80), (3.81), (3.82) ve (3.83) ifadeleriyle verilmiştir.

$$m_1(\ddot{v}_1 + \ddot{u}_g) + k_1(v_1) = 0 \quad (3.78)$$

$$m_2(\ddot{v}_2 + \ddot{u}_g) + k_2(v_2) = 0 \quad (3.79)$$

$$m_3(\ddot{v}_3 + \ddot{u}_g) + k_3(v_3) = 0 \quad (3.80)$$

$$m_4(\ddot{v}_4 + \ddot{u}_g) + k_4(v_4) = 0 \quad (3.81)$$

$$m_5(\ddot{v}_5 + \ddot{u}_g) + k_5(v_5) = 0 \quad (3.82)$$

$$m_b \ddot{v}_b + m_1 \ddot{v}_1 + m_2 \ddot{v}_2 + m_3 \ddot{v}_3 + m_4 \ddot{v}_4 + m_5 \ddot{v}_5 + F_b = -M \ddot{u}_g \quad (3.83)$$

Yukarıda verilen hareket denklemlerinde v_j , j.nci devinimli kütlesinin sismik yalıtım sistemine göre görelî yer değıştirmesini (3.84), v_b sismik yalıtım sisteminin yere göre görelî yer değıştirmesini (3.85) ve M ise sismik yalıtım sistemi üzerindeki toplam kütleyi göstermektedir.

$$v_j = u_j - u_b \quad (3.84)$$

$$v_b = u_b - u_g \quad (3.85)$$

Sürtünmeli sarkaç sisteminde oluşan yanal kuvvet (3.86) ifadesinde verilmiştir. Bu ifadede, W sismik yalıtım sistemi üzerindeki toplam ağırlığı, R_{fps} mesnet eğrilik yarıçapını, μ sürtünme katsayısını ve Z ise boyutsuz çevrimsel değışkeni göstermektedir.

$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} v_b + \mu W Z \quad (3.86)$$

Boyutsuz çevrimsel değışkenin değeri Bouc-Wen denklemiyle (2.56) elde edilmektedir. Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin çevrimsel davranışını incelemek amacıyla yapılan deney sonuçları göz önüne alınırsa (2.56) ifadesi (3.87)'da verilen hali almaktadır (Constantinou ve diğ., 1990).

$$Y \dot{Z} + 0.90 |\dot{v}_b| Z |Z| + 0.10 \dot{v}_b |Z|^2 - \dot{v}_b = 0 \quad (3.87)$$

Yukarıdaki ifadede, Y kayıcı yüzeye temas eden PTFE kaplama malzemesinin akma yer değıştirmesini göstermektedir. Söz konusu yer değıştirme PTFE kaplama malzemesinin kalınlığına göre 0.13 – 0.25 mm arasında değışmektedir (Constantinou

ve diğ., 1990). Parametrik çalışmada akma yer değiştirmesinin değeri 0.15 mm olarak alınmıştır.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerde oluşan yanal kuvvet (3.88) ifadesinde verilmiştir. Bu ifadede, kurşun çekirdeğin akması öncesi rijitlik k_e , elastik rijitliği akma sonrası rijitliğe olan oranı α_{LRB} ve kurşun çekirdeğin akma yer değiştirmesi D_y ile gösterilmiştir. Söz konusu parametrelerin elde edilmeleri için kullanılan ifadeler Bölüm 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

$$F_{lr b} = \alpha_{lr b} k_e v_b + (1 - \alpha_{lr b}) k_e D_y Z \quad (3.88)$$

Boyutsuz çevrimsel değişkenin değeri Bouc-Wen denklemiyle elde edilmektedir. Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerinin çevrimsel davranışını incelemek amacıyla yapılan deney sonuçları göz önüne alınarak Bouc-Wen ifadesi (3.89)’de verilen şekilde düzenlenmiştir. Değişik üreticiler tarafından üretilen mesnetlerin kuvvet-yer değiştirme çevrimleri önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Bundan dolayı analizlerde, projede kullanılacak mesnetlerin üzerinde yapılacak deneylerle elde edilen çevrimlerin incelenmesiyle elde edilen Bouc-Wen parametrelerinin kullanılması sonuçların doğruluğunu arttıracaktır. Çevrimlerden Bouc-Wen parametrelerinin elde edilmesi (Konstantinidis, 2005) kaynağında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

$$D_y \dot{Z} + 0.50 |\dot{v}_b| Z |Z| + 0.50 \dot{u}_b |Z|^2 - \dot{v}_b = 0 \quad (3.89)$$

Farklı tipte sismik yalıtım sistemi bileşenlerinde oluşan yanal kuvveti elde etmekte kullanılabilecek ifadeler Bölüm 2’de verilmiştir.

Hareket denklemlerinin çözümü için durum-uzay formülasyonu kullanılacaktır. Bunun için hareket denklemleri 1. dereceden diferansiyel denklemlere indirgenmiştir. Durum vektörü (3.90) ifadesinde verilmiştir.

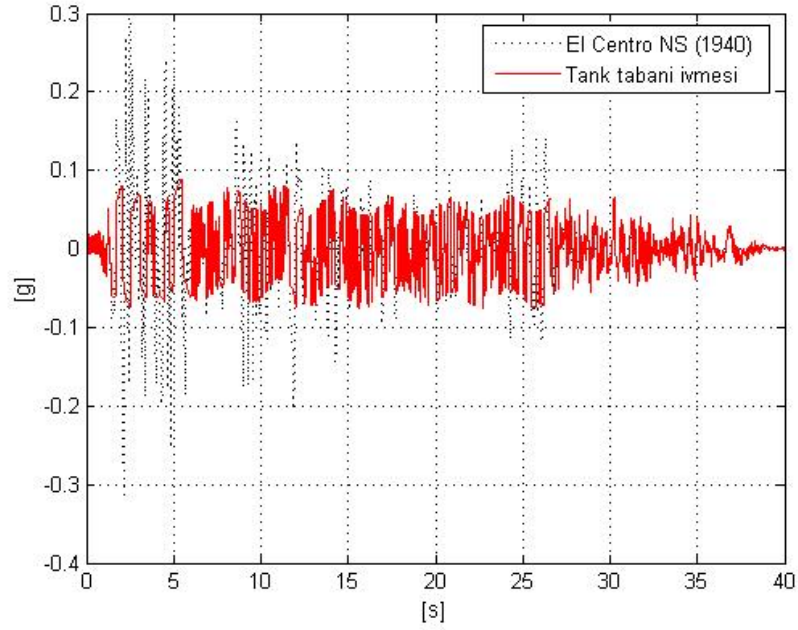
$$\vec{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_b \\ \dot{v}_b \\ v_1 \\ \dot{v}_1 \\ v_2 \\ \dot{v}_2 \\ v_3 \\ \dot{v}_3 \\ v_4 \\ \dot{v}_4 \\ v_5 \\ \dot{v}_5 \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin kullanılması durumunda hareket denklemlerinin durum değişkenleri aracılığıyla 1.dereceden diferansiyel denklemlere indirgenmesi (3.91) ifadesinde verilmiştir. Devinimli modların sönümleri ihmal edilmiştir.

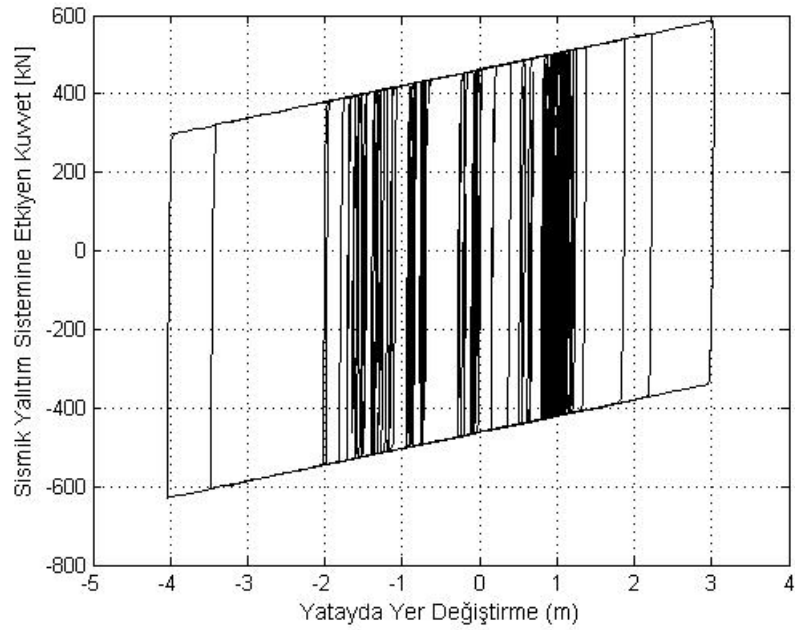
$$\dot{\vec{y}} = \begin{bmatrix} y_2 \\ -\frac{1}{m_b} \left[\ddot{u}_g - k_1 y_3 - k_2 y_5 - k_3 y_7 - k_4 y_9 - k_5 y_{11} + \frac{W}{R_{fps}} y_1 + \mu W y_{13} \right] \\ y_4 \\ -\frac{1}{m_1} [\ddot{u}_g + k_1 y_3] \\ y_6 \\ -\frac{1}{m_2} [\ddot{u}_g + k_2 y_5] \\ y_8 \\ -\frac{1}{m_3} [\ddot{u}_g + k_3 y_7] \\ y_{10} \\ -\frac{1}{m_4} [\ddot{u}_g + k_4 y_9] \\ y_{12} \\ -\frac{1}{m_5} [\ddot{u}_g + k_5 y_{11}] \\ \frac{1}{0.00015} [y_2 - 0.90|y_2|y_{13}|y_{13}| - 0.10y_2|y_{13}|^2] \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

Yukarıda verilen denklem takımının çözümünde Matlab’de bulunan ODE23S çözücüsü kullanılmıştır. Söz konusu çözücüde, 2. mertebe modifiye Rosenbrock algoritmasını kullanılmaktadır (Shampine ve diğ., 1997). Çözümde kullanılan programın kaynak kodları Ek-G’de verilmiştir.

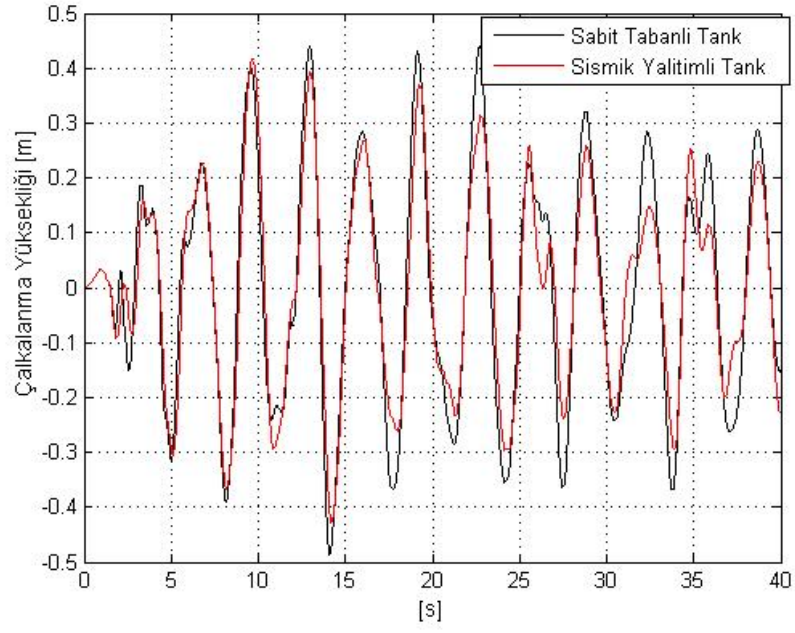
Yarıçapı 5 m ve sıvı yüksekliği 15 m olan yakıt deposunun altına periyodu 2 s ve sürtünme katsayısı 0.05 olan sürtünmeli sarkaç mesnetlerin yerleştirilmesi durumunda 1940 El Centro depremi ivme kaydı (Kuzey-Güney) ile yapılan analizin sonucunda depo tabanının ivme kaydı, yalıtım sisteminin yerdeğiştirmesi, depo içerisinde sıvı yükselmesi ve depo duvarı boyunca hidrodinamik basıncın dağılımı sırasıyla Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de verilmiştir.



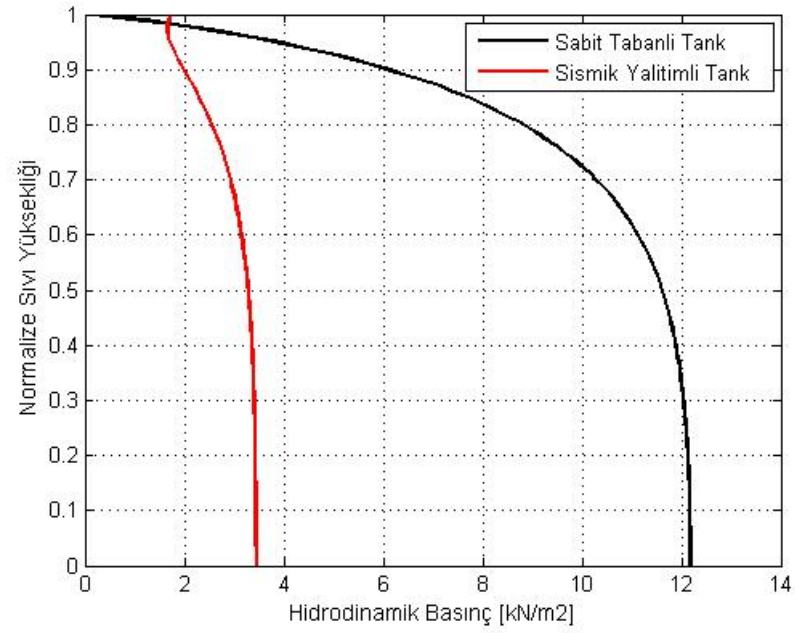
Şekil 3.9 : Sismik yalıtımlı depo tabanının ivme kaydı



Şekil 3.10 : Sismik yalıtım sisteminin kuvvet-yer değiştirme grafiği



Şekil 3.11 : Sismik yalıtımlı sıvı deposunda serbest sıvı yüzeyinin yer değiştirmesi



Şekil 3.12 : Depo duvarı boyunca hidrodinamik basıncın en elverişsiz dağılımı

4. FARKLI TİPTE SİSMİK YALITIMLI DEPOLARIN DEĞİŞİK ÖZELLİKTEKİ DEPREM ETKİLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

4.1. Giriş

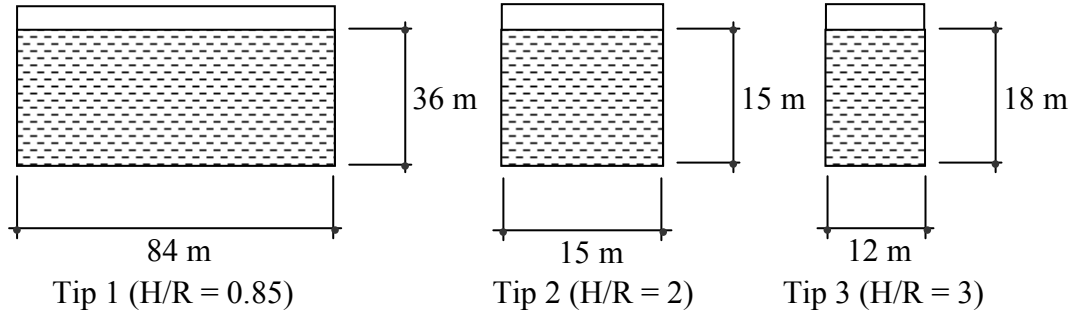
Sismik yalıtımlı yapıların tasarımı ve dinamik davranışlarının tahmini, genellikle yeni üretilen sismik yalıtıcılar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler doğrultusunda yapılmaktadır. Ancak yapının hizmet süresi içerisinde yaşlanma, çevre ve yükleme koşulları gibi faktörlerin etkisiyle sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özellikleri değişim gösterebilmektedir. Bu faktörlerden bazılarının etkilerinin ölçümü laboratuvar ortamında mümkün olurken diğerlerinin etkilerini kestirmek oldukça zor olabilmektedir. Örnek olarak, ortam sıcaklığının sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi laboratuvar ortamında gözlenebilmektedir. Ancak yaşlanmanın sismik yalıtım bileşenleri üzerindeki etkilerini belirlemek için güvenilir bir yöntem bulunmamaktadır (Constantinou ve diğ., 1999).

Bu bölümde, kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların ve sürtünmeli sarkaç mesnetlerin mekanik özelliklerindeki değişimin, sıvı depolarının davranışı ve sismik yalıtım sistemi tasarımı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yürütülen parametrik çalışmanın sonuçları sunulmuştur.

4.2. Parametrik Çalışmada Kullanılan Depo Tipleri

Günümüzde kullanılan endüstriyel sıvı depolarında, sıvı yüksekliğinin depo yarıçapına oranı genellikle 0.33 ile 3.00 arasında değişmektedir. Bu oranın 0.85'ten daha düşük olduğu depolarda, darbesel kütlelerin toplam sıvı kütesine oranı, Şekil 3.2'den de görülebileceği gibi %50'nin altında kalmaktadır. Buna ek olarak, özellikle yumuşak zemin üzerine mesnetlenen yayvan depolarda radyasyon sönümünün etkisiyle sağlanan eşdeğer viskos sönümün kritik sönüme oranı %30 mertebesine ulaşabilmektedir (Whittaker and Jury, 2000). Bu nedenlerden dolayı

parametrik çalışmada, sıvı yüksekliğinin depo yarıçapına oranı 0.85 ile 3.00 arasında olan depolar incelenmiştir (Şekil 4.1). Depo içerisindeki sıvının yoğunluğu ise tüm analizlerde 8000 N/m^3 olarak alınmıştır.



Şekil 4.1 : Parametrik çalışmada kullanılan depo tipleri

4.3. Parametrik Çalışmada Kullanılan Deprem Kayıtları

Çalışmada kullanılan deprem kayıtlarının mühendislik özellikleri Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Bu deprem kayıtlarına ait ivme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri ile görelî yer değiştirme, görelî hız, sözde görelî hız, maksimum ivme ve sözde maksimum ivme spektrumları Ek-B’de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 : Analizlerde kullanılan ivme kayıtlarının mühendislik özellikleri

	$\ddot{u}_{g,max}$ (g)	$\dot{u}_{g,max}$ (cm/s)	$u_{g,max}$ (cm)	Housner Şiddeti (cm)	Etkin Süre (s)
El Centro 1940 KG	0.31	29.69	13.04	132.92	24.10
El Centro (0.2g)	0.20	18.98	8.33	84.96	24.10
El Centro (0.4g)	0.40	37.96	16.67	169.92	24.10
El Centro (0.6g)	0.60	56.93	25.00	254.88	24.10
Erzincan 1992 DB	0.50	64.28	21.93	224.56	7.35
Erzincan (0.2g)	0.20	25.94	8.85	90.63	7.35
Erzincan (0.4g)	0.40	51.89	17.70	181.26	7.35
Erzincan (0.6g)	0.60	77.83	26.56	271.90	7.35
Yarımca 1999 KG	0.27	65.74	57.04	150.04	15.34
Yarımca (0.2g)	0.20	49.11	42.62	112.10	15.34
Yarımca (0.4g)	0.40	98.24	85.24	224.22	15.34
Yarımca (0.6g)	0.60	147.36	127.86	336.33	15.34

4.4. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi Üzerine Mesnetlenen Sıvı Depoları

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapı ve sürtünme katsayısının depo davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla, değişik depo geometrileri ve yer

ivmesi kayıtlarının kullanıldığı parametrik bir çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmada ele alınan parametreler Tablo 4.2’de özetlenmiştir.

Sürtünmeli sarkaç sisteminin yanal rijitliğinin belirlenmesinde etkili olan kayma yüzeyi eğrilik yarıçapı değerleri 1m, 1.55m ve 2.24m olarak alınmıştır. Bu değerler, teorik olarak sürtünmesiz kayma yüzeyi durumu için sürtünmeli sarkaç sistemi üzerinde bulunan rijit bir yapının titreşim periyodunun sırasıyla 2s, 2.5s ve 3s olmasını sağlamaktadır. (Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 2.3.1’de özetlenmiştir.) Ancak kayma yüzeyinin sürtünmeli olması ve üst yapının rijit olmaması durumları göz önüne alındığında sismik yalıtımlı depoların titreşim periyotları önemli ölçüde değişebilmektedir.

Sürtünmeli sarkaç sisteminde sürtünme sayesinde yapının rüzgar ve trafikten kaynaklanan titreşimler etkisinde hareket etmesi engellenmektedir. Kuvvetli deprem hareketi sırasında ise sürtünme, yapıya iletilen enerjinin ısıya dönüştürülerek sönmelenmesini sağlamaktadır. Ancak sürtünme katsayısının değeri, artan ortam sıcaklığına bağlı olarak hareket sırasında azalabilmektedir. Buna karşın çevre koşullarından dolayı kayma yüzeyinde oluşabilecek kirlenme ve korozyon da sürtünme katsayısının değerini arttırabilmektedir. Günümüzde kullanılan sürtünmeli sarkaç mesnetlerinde kayma yüzeyindeki sürtünme katsayısı 0.05 – 0.12 arasında değişmektedir ve buna göre üretilmektedir. Kayıcı yüzey üzerinde hareket eden malzemeye kayganlaştırıcılar enjekte edilmesiyle daha da düşük sürtünme katsayıları elde edilebilmektedir. Sürtünme katsayısının değişiminin mesnet yer değiştirmesi ve depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla sürtünme katsayısının değerleri 0.01 ile 0.12 arasında alınmıştır.

Tablo 4.2’de verilmiş olan depo geometrileri, sürtünmeli sarkaç sistemi parametreleri ve ivme kayıtları kullanılarak yürütülen parametrik çalışmanın sonuçları Ek-C’de grafikler aracılığıyla gösterilmiştir. Bu bölümde, söz konusu grafiklerin bir kısmı ele alınan depo tiplerinde sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmekte kullanılacaktır.

Tablo 4.2 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin sıvı depolarının dinamik davranışına olan etkilerinin saptanması için yürütülen çalışmada kullanılan analiz parametreleri

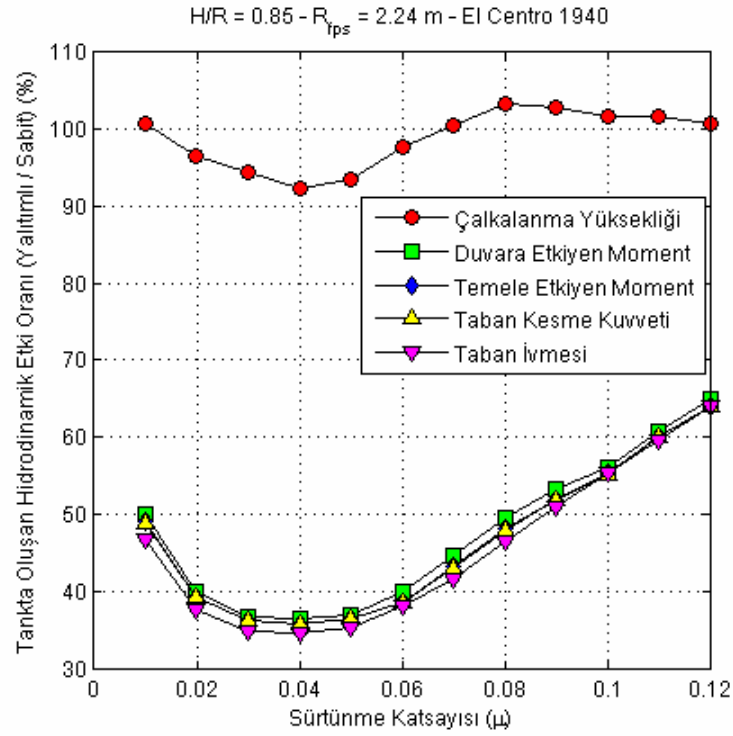
Depo geometrisi (H/R)	0.85 – 2.00 – 3.00
İvme kayıtları (İvme kayıtları 0.4 g'ye ölçeklenmiştir)	El Centro 1940 KG Erzincan 1992 DB Yarımca 1999 KG
Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin eğrilik yarıçapları	1 m – 1.55 m – 2.24 m
Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin sürtünme katsayıları	0.01 - 0.02 - 0.03 - 0.04 - 0.05 – 0.06 0.07 - 0.08 - 0.09 - 0.10 - 0.11 – 0.12

4.4.1. Depo Geometrisinin ve Sismik Yalıtım Sistemi Özelliklerinin Davranışa Etkilerinin İncelenmesi

Depo Tip-1 (H/R = 0.85)

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapının artması, sismik yalıtım sisteminin performansını da arttırmaktadır (Şekil C.1). Ancak performanstaki artışın miktarı sürtünme katsayısının artmasıyla azalmaktadır. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerleri için ele alınan tüm eğrilik yarıçaplarında mesnet yer değiştirmelerindeki ve depoda oluşan hidrodinamik etkilerdeki azalmanın neredeyse aynı olduğu görülmektedir. El Centro depremi ivme kaydı için depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.04 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı durum için elde edilenlerin yaklaşık %35 mertebesine inmektedir. Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi de 6 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.3).

Sürtünme katsayısının değişimi, özellikle düşük sürtünmeli mesnetlerde mesnet yer değiştirmelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi sürtünme katsayısının 0.01'den 0.05'e yükselmesi sonucu mesnet yer değiştirmelerinin üstel olarak azaldığı, 0.05'ten yüksek sürtünme katsayıları için azalma miktarının düştüğü görülmektedir.

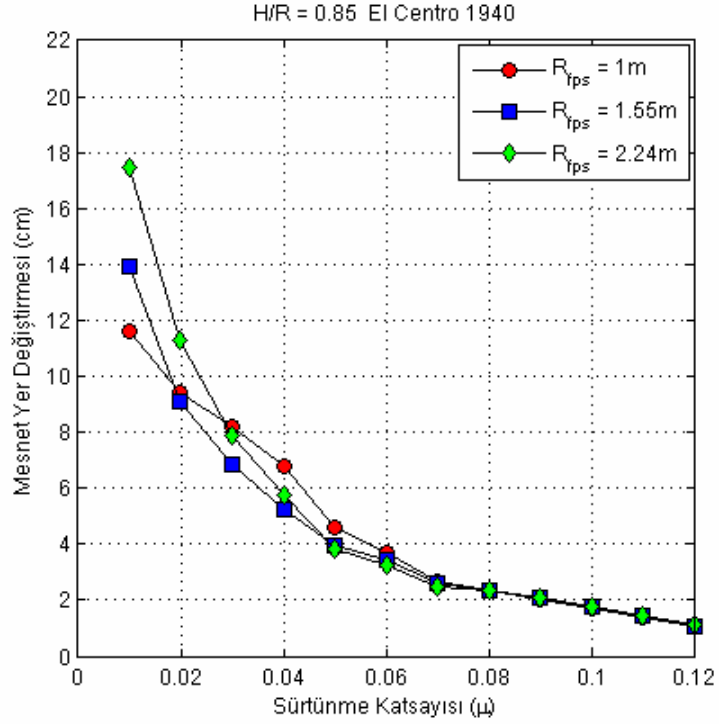


Şekil 4.2 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85 - R_{yps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40g$)

El Centro depremi ivme kaydı için sürtünme katsayısının 0.03 - 0.05 arasındaki değerleri için sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametrelerinin üzerindeki olumlu etkisinin en yüksek olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliğinin, ele alınan bütün sürtünme değerleri için sabit tabanlı durumda elde edilen değerlere yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.2) (Şekil C.1).

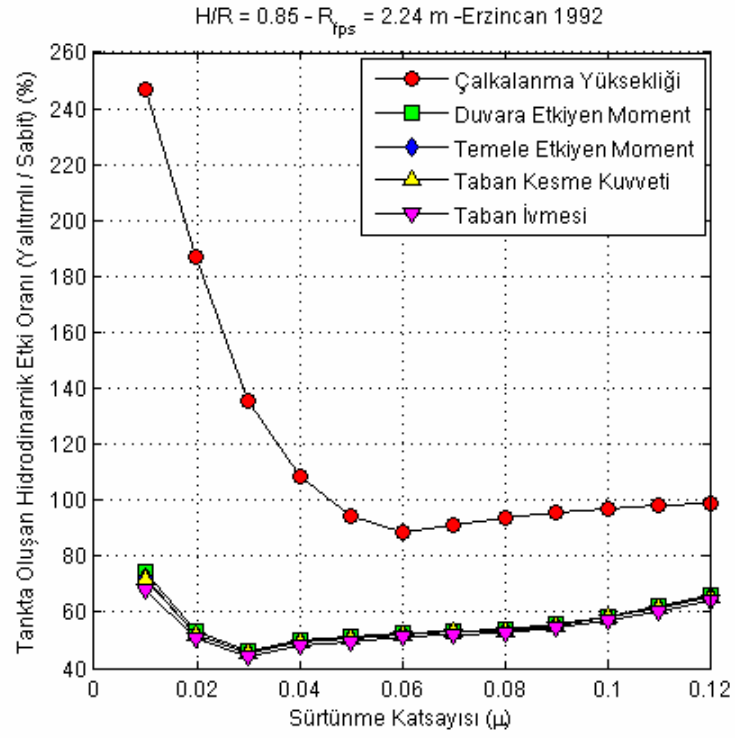
El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde, taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerindeki değişim, taban ivmesindeki değişimle benzer oranlarda gerçekleşmektedir.

Erzincan depremi ivme kaydı için tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı depo için elde edilenlerin yaklaşık %50 mertebesine inmektedir (Şekil 4.4). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi de 10 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.5).

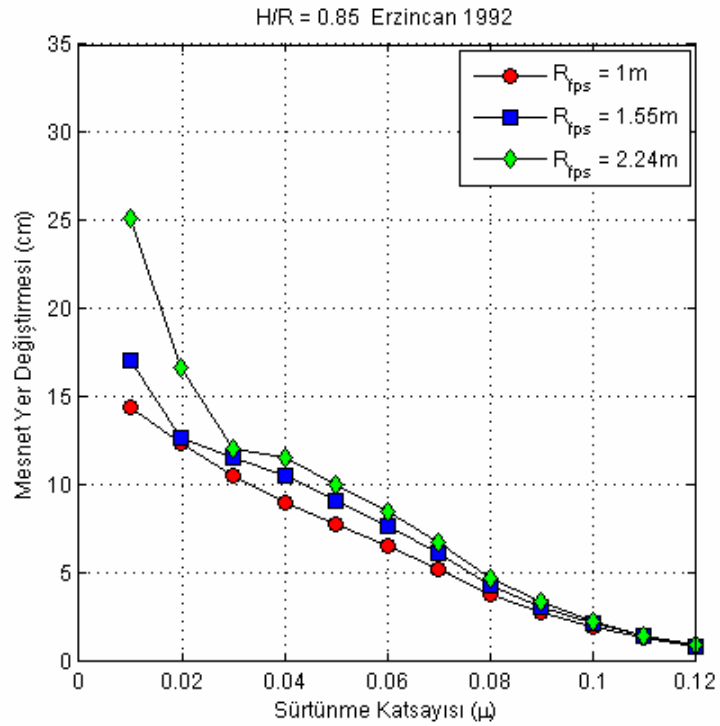


Şekil 4.3 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
(H/R = 0.85– El Centro 0.40g)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde, özellikle düşük sürtünmeli mesnetlerde eğrilik yarıçapının artırılması, mesnet yer değiştirmesi ve çalkalanma yüksekliği üzerinde etkili olmaktadır. Sürtünme katsayısı 0.03'ten küçük olan mesnetlerde eğrilik yarıçapının artmasıyla mesnet yer değiştirmeleri önemli ölçüde artmakta ve çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı depo için elde edilen değerlerin %250'sini aşabilmektedir (Şekil 4.4) (Şekil C.4). Bununla beraber, sürtünme katsayısının 0.05 ve daha yüksek değerlerinde çalkalanma yüksekliği, sabit tabanlı depo için elde edilen değerler ile aynı seviyeye düşmektedir. Taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerindeki değişim, taban ivmesindeki değişim ile benzer oranlarda gerçekleşmektedir. Sürtünme katsayısının 0.02'den büyük değerleri için depoda oluşan hidrodinamik etkiler önemli ölçüde değişmemektedir.



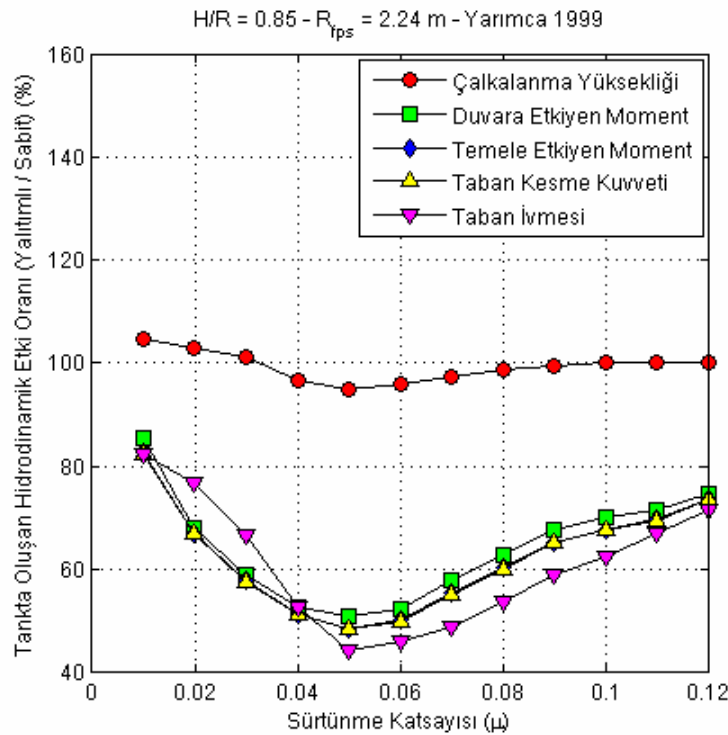
Şekil 4.4 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - R_{yps} = 2.24 \text{ m} - \text{Erzincan } 0.40g$)



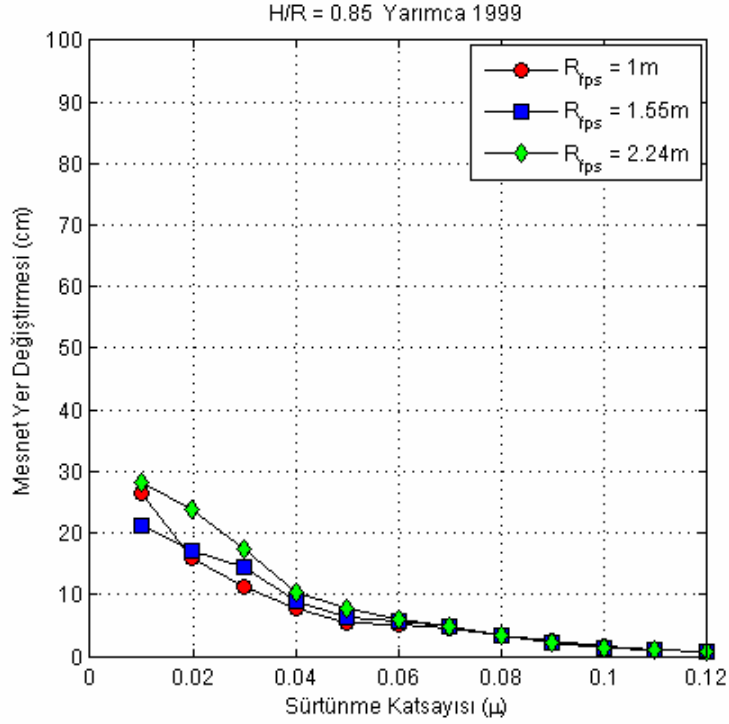
Şekil 4.5 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan } 0.40g$)

Yarımca depremi ivme kaydı için depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı depo için elde edilenlerin yaklaşık %50 mertebesine inmektedir (Şekil 4.6). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi de 8 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.7).

Sürtünme katsayısının değişimi, özellikle düşük sürtünmeli mesnetlerde mesnet yer değiştirmelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 4.7'den de görülebileceği gibi sürtünme katsayısının 0.01'den 0.05'e yükselmesi sonucu mesnet yer değiştirmelerinin hızla azaldığı, 0.05'ten yüksek sürtünme katsayıları için azalma miktarının düştüğü görülmektedir. Yarımca depremi ivme kaydı için sürtünme katsayısının 0.04 - 0.06 arasındaki değerleri için sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametrelerinin üzerindeki olumlu etkisinin en yüksek olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliği, ele alınan sürtünme değerleri için sabit tabanlı durumda elde edilenlere oldukça yakın olduğu görülmektedir (Şekil 4.6) (Şekil C.7).



Şekil 4.6 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Yarımca } 0.40g$)

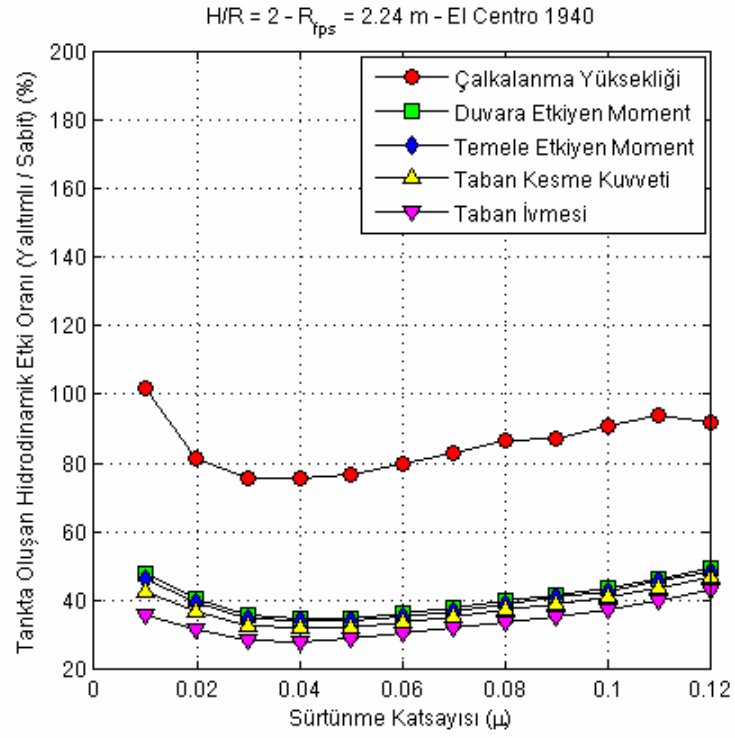


Şekil 4.7. Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85$ – Yarımcı 0.40g)

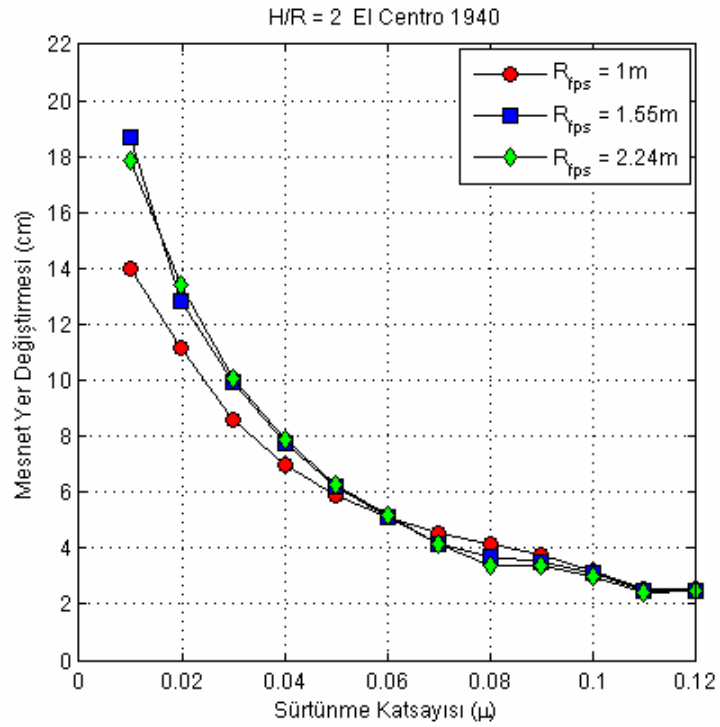
Depo Tip-2 ($H/R = 2$)

El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapının artması, sismik yalıtım sisteminin performansını da arttırmaktadır (Şekil C.2). Sürtünme katsayısının 0.06'dan büyük değerleri için ele alınan tüm eğrilik yarıçaplarında mesnet yer değiştirmelerindeki ve depoda oluşan hidrodinamik etkilerdeki azalmanın neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.04 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı depo için elde edilenlerin yaklaşık %35 mertebesine inmektedir (Şekil 4.8). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi de 8 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.9).

Düşük sürtünmeli mesnetlerde eğrilik yarıçapının artırılması çalkalanma yüksekliğinin azaltmaktadır. Sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerleri için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durumda hesaplanan değerden daha düşük olmaktadır.



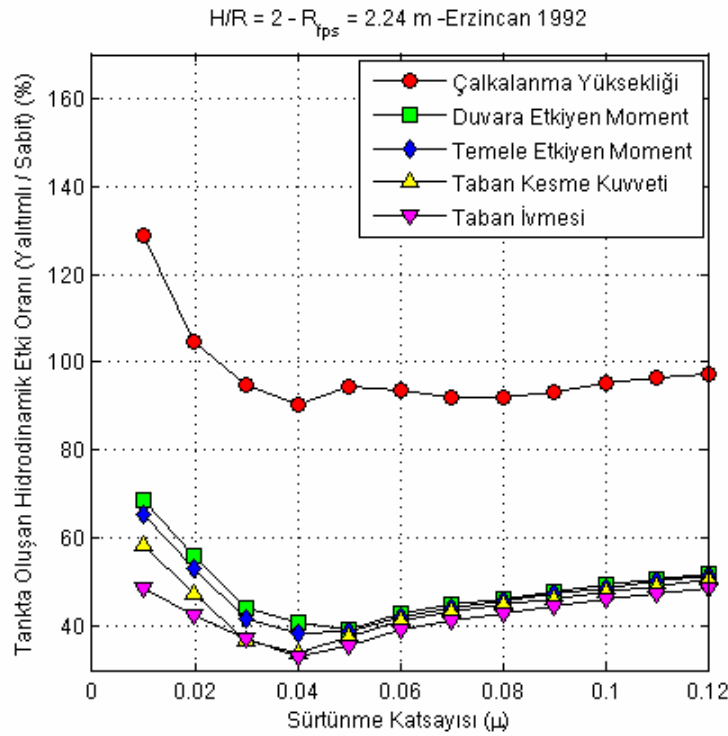
Şekil 4.8 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 2 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40g$)



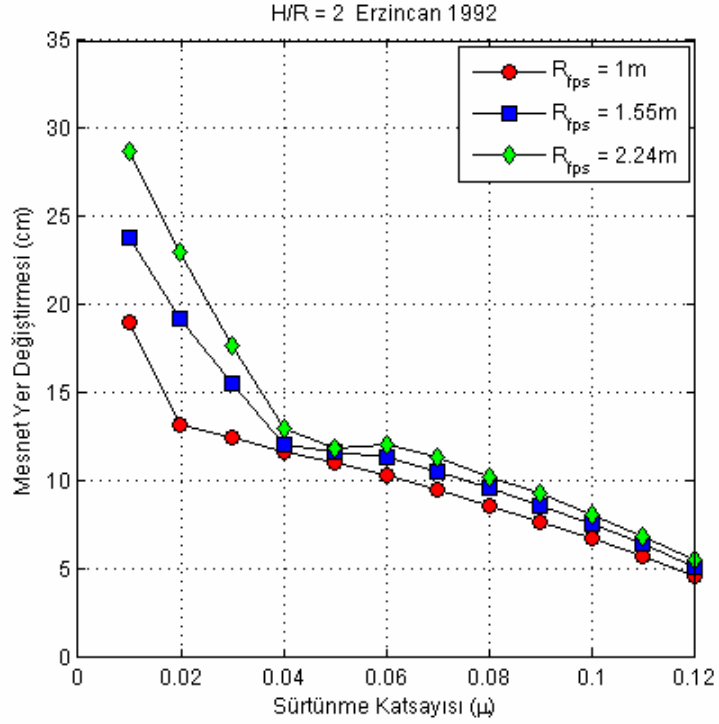
Şekil 4.9 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 2 - \text{El Centro } 0.40g$)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı durum için elde edilenlerin yaklaşık %40 mertebesine inmektedir (Şekil 4.10). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi de 13 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.11). Sürtünme katsayısının 0.02'den büyük değerleri için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durumda hesaplanan değerden daha düşük olmaktadır.

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapının artması, sismik yalıtım sisteminin performansını da arttırmaktadır (Şekil C.5). Düşük sürtünmeli mesnetlerde depoda oluşan hidrodinamik etkilerde azalma oranı taban ivmesindeki azalma oranına göre daha düşük olmaktadır (Şekil 4.10). Sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerleri için ele alınan tüm eğrilik yarıçaplarında mesnet yer değiştirmelerindeki ve depoda oluşan hidrodinamik etkilerdeki azalmanın neredeyse aynı olduğu görülmektedir.

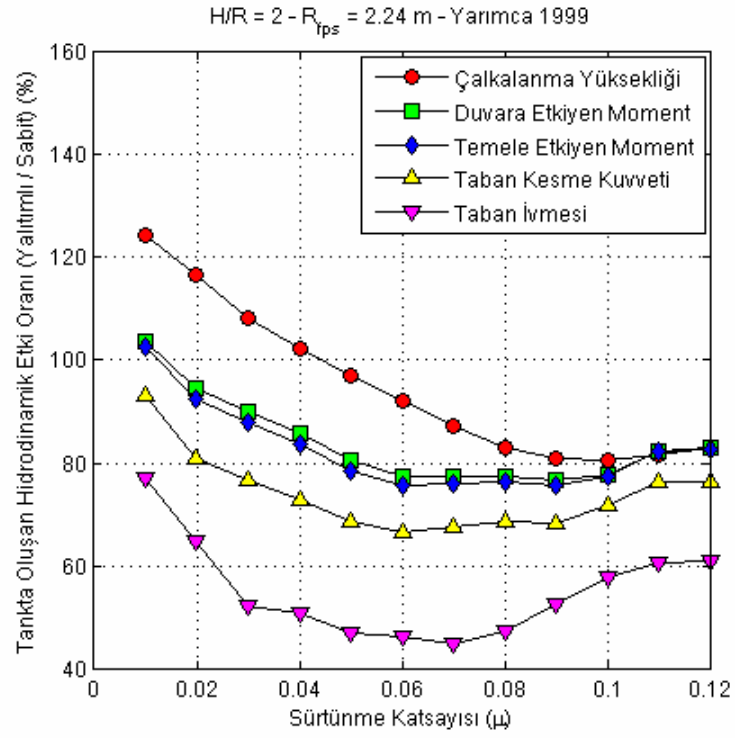


Şekil 4.10. Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - R_{tps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro } 0.40g$)

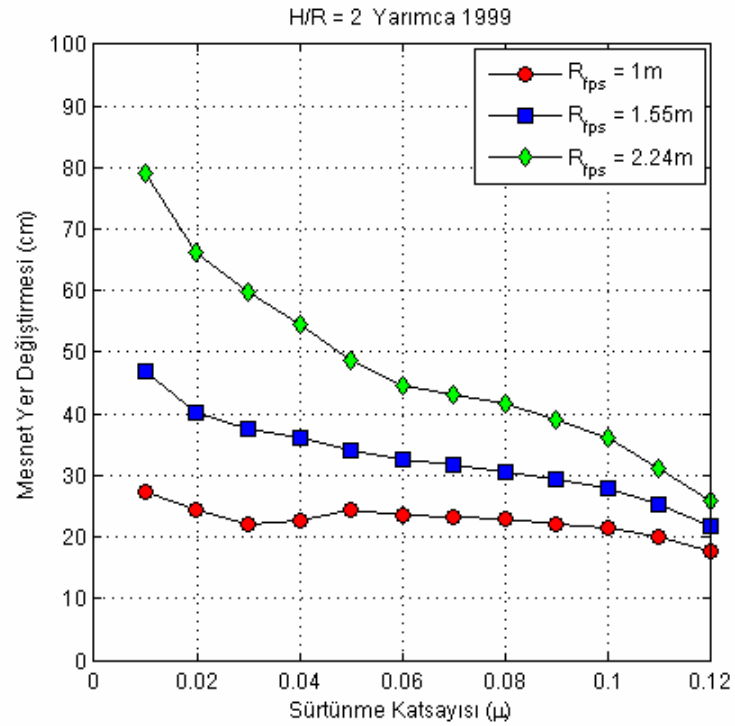


Şekil 4.11 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 2$ – Erzincan 0.40g)

Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tasarım parametrelerindeki değişim tabanda oluşan ivme oranındaki değişimden oldukça farklı olabilmektedir (Şekil 4.12). Eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılması durumunda taban ivmesi yer ivmesinin %45'ine inmesine karşın, taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %70'ine inmektedir. Depo duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %80'ine inmektedir. Bu durumda mesnet yer değiştirmesinin en büyük değerinin yaklaşık 50 cm civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.13). Çalkalanma yüksekliği ise ele alınan sürtünme değerleri için sabit tabanlı durumda elde edilenlere oldukça yakın olmaktadır.



Şekil 4.12 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 2 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Yarımca } 0.40g$)

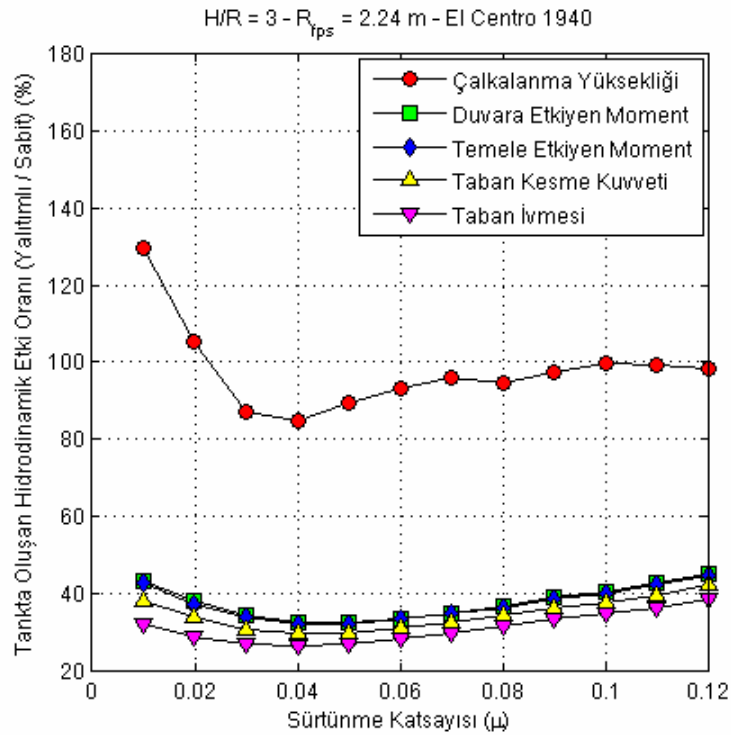


Şekil 4.13 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 2 - \text{Yarımca } 0.40g$)

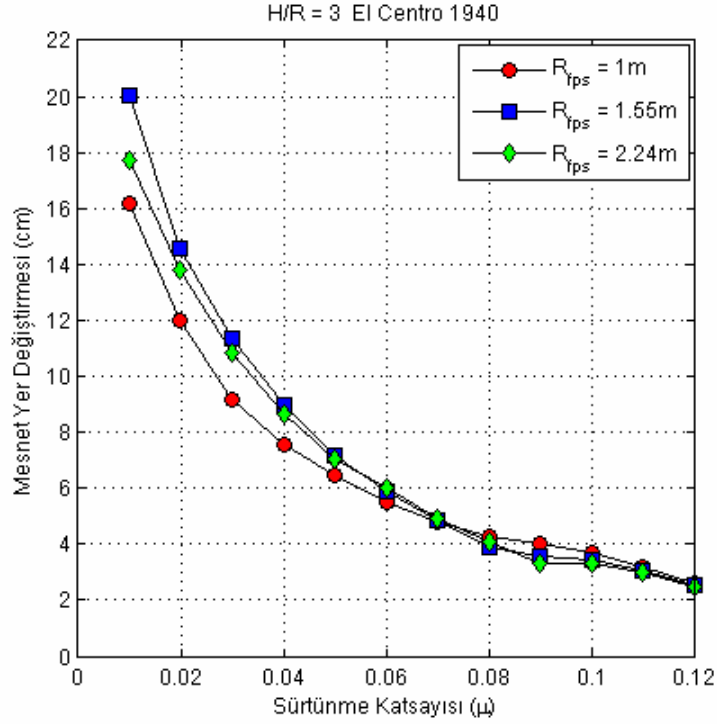
Depo Tip-3 ($H/R = 3$)

El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı durum için elde edilenlerin yaklaşık %30 mertebesine inmektedir (Şekil 4.14). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi ise 7 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.15).

Sürtünme katsayısının 0.08'den büyük değerleri için ele alınan tüm eğrilik yarıçaplarında mesnet yer değiştirmelerindeki ve depoda oluşan hidrodinamik etkilerdeki azalmanın neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının 0.02'den büyük değerleri için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durumda hesaplanan değere yakın olmaktadır.



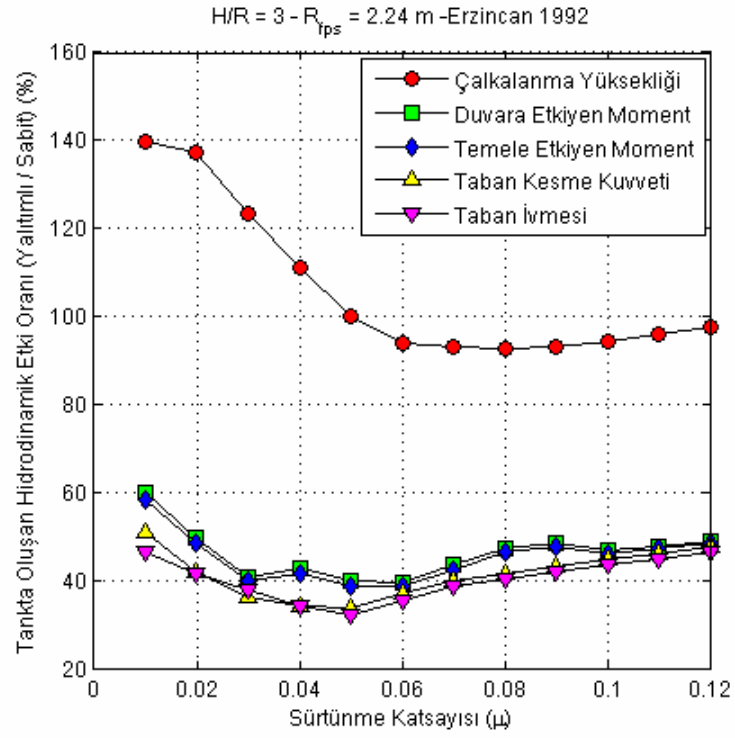
Şekil 4.14 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3 - R_{yps} = 2.24 \text{ m} - \text{El Centro 0.40g}$)



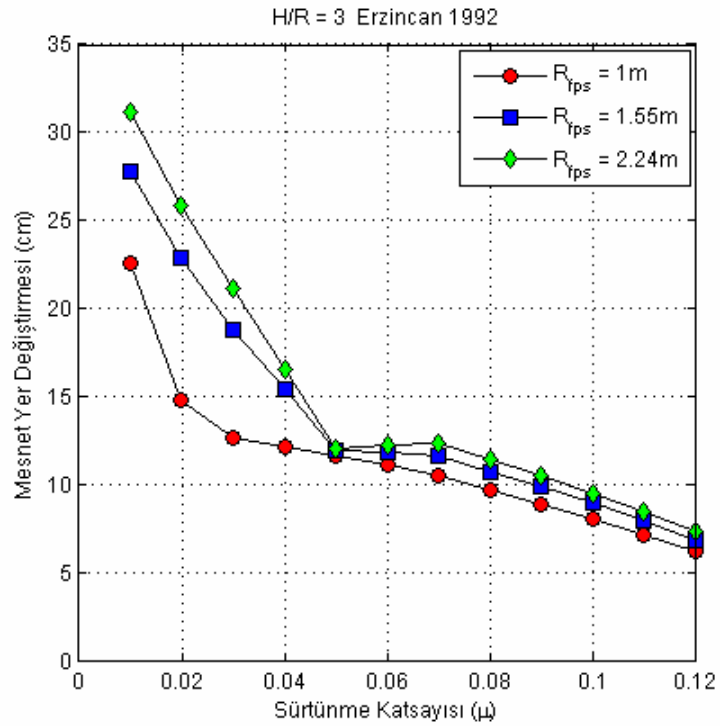
Şekil 4.15 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – El Centro 0.40g)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tasarım parametrelerindeki en büyük azalma, eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan mesnetlerin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu durumda, sismik yalıtımlı deponun tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı durum için elde edilenlerin yaklaşık %30-40 mertebesine inmektedir (Şekil 4.16). Sismik yalıtım sisteminin en büyük yer değiştirmesi ise 12 cm'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.17). Çalkalanma yüksekliğinde sabit tabanlı duruma göre belirgin bir artış görülmemektedir.

Sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerleri için ele alınan tüm eğrilik yarıçaplarında mesnet yer değiştirmelerindeki ve depoda oluşan hidrodinamik etkilerdeki azalmanın neredeyse aynı seviyede olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerleri için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durumda hesaplanan değere yakın olmaktadır.



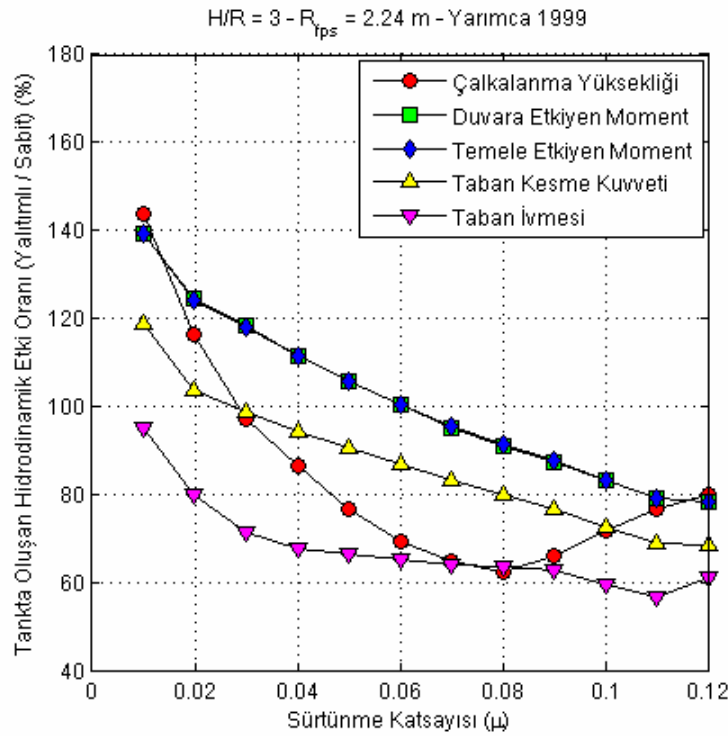
Şekil 4.16 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - R_{fps} = 2.24 \text{ m} - \text{Erzincan } 0.40g$)



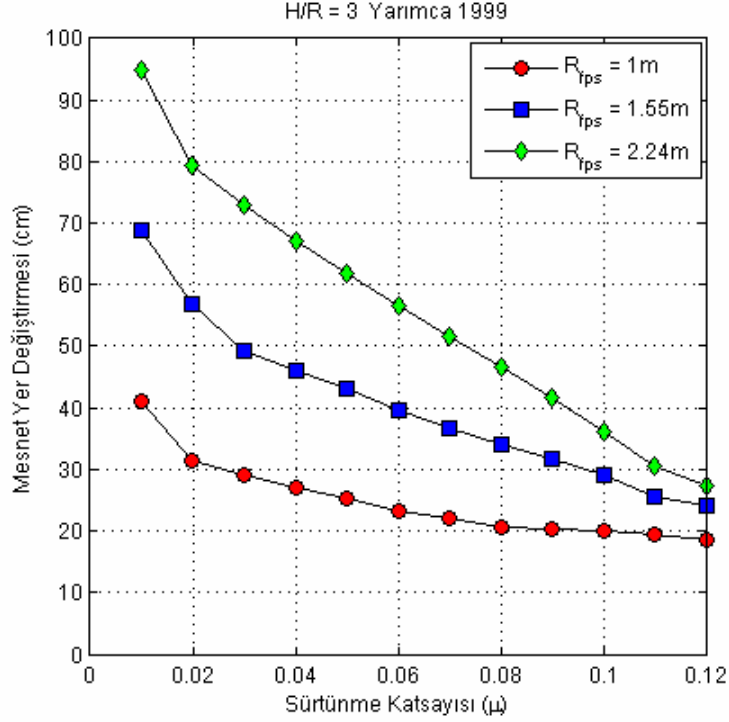
Şekil 4.17 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Erzincan } 0.40g$)

Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tasarım parametrelerindeki değişim tabanda oluşan ivme oranındaki değişimden oldukça farklı olabilmektedir (Şekil 4.18). Eğrilik yarıçapı 2.24 m ve sürtünme katsayısı 0.12 olan mesnetlerin kullanılması durumunda taban ivmesi yer ivmesinin %60'ına inmesine karşın, taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %70'ine inmektedir. Depo duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %80'ine inmektedir. Bu durumda mesnet yer değiştirmesinin en büyük değerinin yaklaşık 30 cm civarında olduğu görülmektedir (Şekil 4.19). Çalkalanma yüksekliği ise ele alınan sürtünme değerleri için sabit tabanlı durumda elde edilenlere oldukça yakın olmaktadır.

İncelenen mesnet eğrilik yarıçapları ve sürtünme katsayıları için sürtünmeli sarkaç sisteminin depoda oluşan hidrodinamik etkileri en fazla %30 mertebesinde azalttığı görülmektedir. Dolayısıyla sürtünmeli sarkaç sisteminin söz konusu depo geometrisi ve yer ivmesi kaydı için tasarım parametreleri üzerinde önemli bir fayda sağlamadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.18 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3 - R_{tps} = 2.24 \text{ m} - \text{Yarımca } 0.40g$)

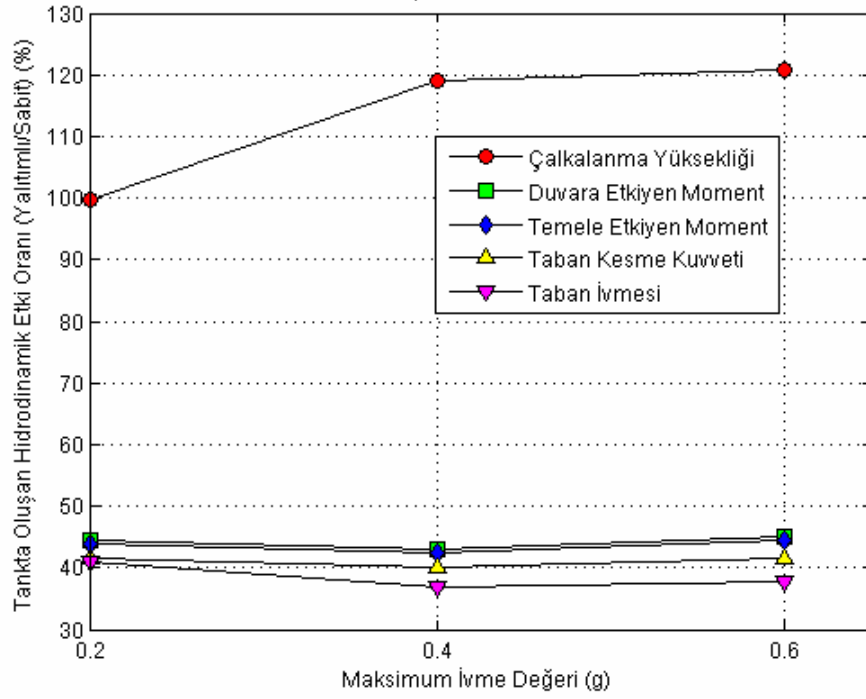


Şekil 4.19 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – Yarımca 0.40g)

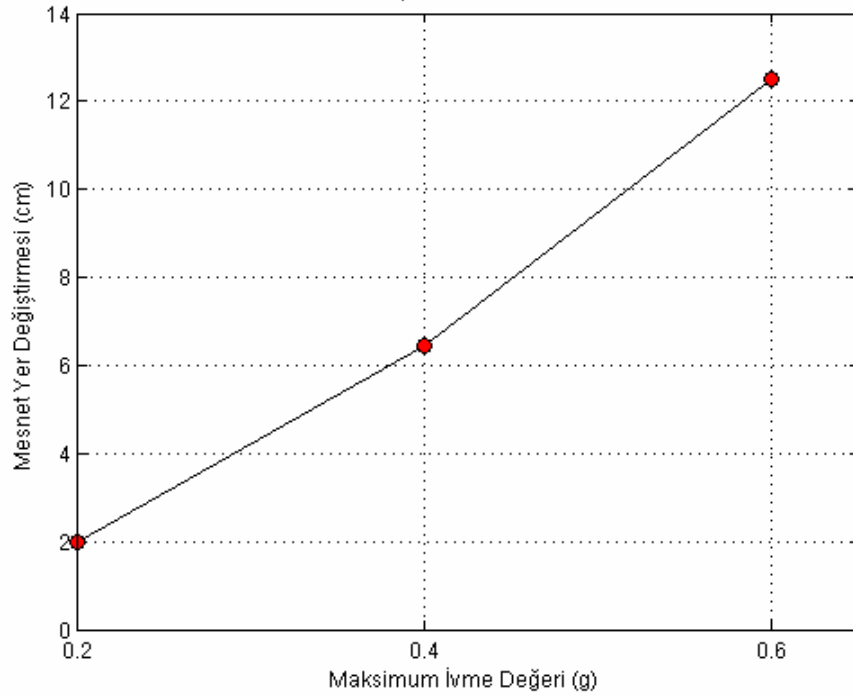
4.4.2. Yer İvmesinin En Büyük Değerinin Depo Davranışına olan Etkilerinin İncelenmesi

Yer ivmesinin en büyük değerinin sürtülmeli sarkaç sistemi üzerine mesnetlenen sıvı depolarının davranışına etkilerini saptamak amacıyla eğrilik yarıçapı 1 m ve sürtünme katsayısı 0.05 olan sürtülmeli sarkaç mesnetlerinin üzerinde bulunan Tip 3 ($H/R = 3$) geometrisindeki sıvı deposunda oluşan hidrodinamik etkiler sırasıyla 0.20g, 0.40g ve 0.60g en büyük yer ivmelerine göre ölçeklenmiş El Centro, Erzincan ve Yarımca depremlerinin ivme kayıtları kullanılarak incelenmiştir. Artan en büyük yer ivmesi değerleri için elde edilen hidrodinamik etki oranları, en büyük mesnet yer değiştirmeleri ve mesnet çevrimleri Ek-C’de grafikler aracılığıyla sunulmuştur. El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde en büyük yer ivmesinin 0.20g’den 0.60g’ye arttırılması sonucu mesnet yer değiştirmeleri 2 cm’den 12 cm’ye doğrusal olarak artmaktadır (Şekil C.13), (Şekil 4.20). Depoda oluşan hidrodinamik etki oranları en büyük yer ivmesinin artışından önemli derecede etkilenmemektedir. En büyük yer ivmesinin 0.20 g olduğu durum için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durumda elde edilen değerle aynı olmaktadır. En büyük yer ivmesinin 0.40 g

ve 0.60 g olduğu kayıtlarda ise çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı depo için elde edilen değerden %20 daha yüksek olmaktadır (Şekil 4.21).



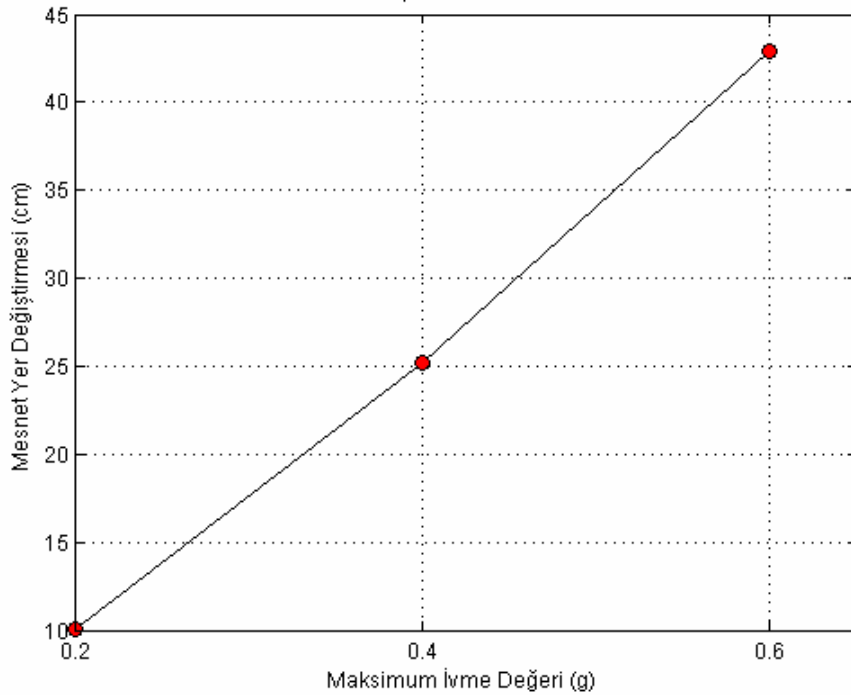
Şekil 4.20 : En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – El Centro)



Şekil 4.21 : En büyük yer ivmesinin mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – El Centro)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde en büyük yer ivmesinin 0.20g'den 0.60g'ye arttırılması sonucu mesnet yer değiştirmeleri 4 cm'den 18.5 cm'ye doğrusal olarak artmaktadır (Şekil C.14). Depoda oluşan hidrodinamik etki oranları en büyük yer ivmesinin artışından önemli derecede değişmemektedir. Ancak, en büyük yer ivmesinin artan değerleri için depo duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentlerindeki azalma miktarı taban ivmesindeki göre daha düşük olmaktadır. En büyük yer ivmesinin 0.20 g olduğu durum için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı depo için elde edilen değerle aynı olmaktadır. En büyük yer ivmesinin 0.40 g ve 0.60 g olduğu kayıtlarda ise çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değerden %10-15 mertebesinde yüksek olmaktadır.

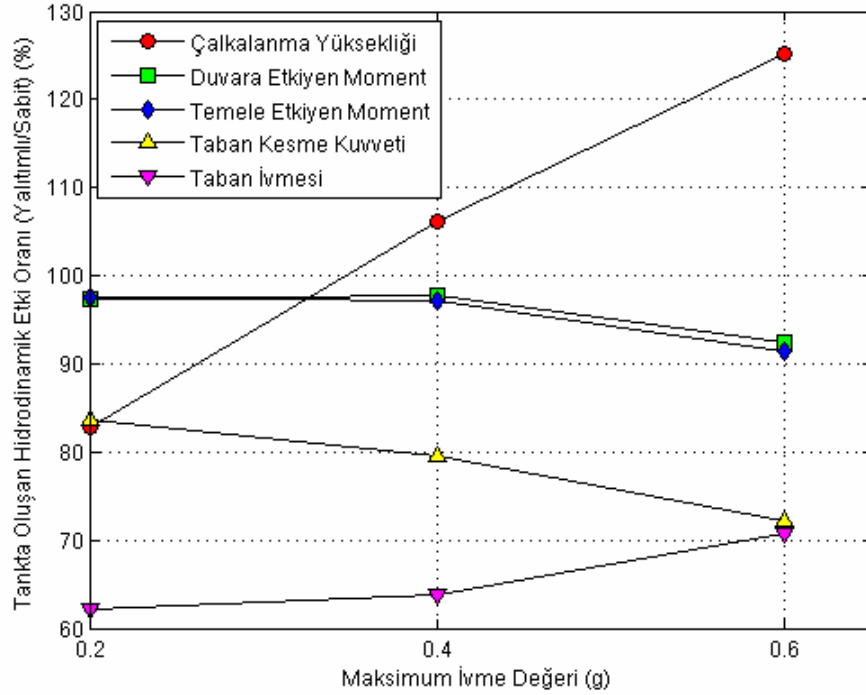
Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde en büyük yer ivmesinin 0.20g'den 0.60g'ye arttırılması sonucu mesnet yer değiştirmeleri 10 cm'den 43 cm'ye doğrusal olarak artmaktadır (Şekil C.15) (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : En büyük yer ivmesinin mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – Yarımca)

Ele alınan tüm ivme kayıtları için depo duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentlerindeki azalma miktarının taban ivmesindeki azalmaya göre önemli ölçüde düşük olduğu görülmektedir. En büyük yer ivmesinin 0.20 g olduğu durum için çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değer %85'i mertebesinde dir. En büyük yer ivmesinin 0.40 g ve 0.60 g olduğu kayıtlarda ise

çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değerden %7-25 mertebesinde yüksek olmaktadır (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 : En büyük yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 3$ – $R_{fps} = 1$ m – $\mu = 0.05$ – Yarımca)

4.4.3. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi Üzerine Mesnetli Sıvı Depolarının Davranışını İncelenmesi İçin Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin eğrilik yarıçapının artması, sismik yalıtımlı deponun periyodunun uzamasına ve dolayısıyla darbesel hidrodinamik etkilerin azalmasına sebep olmaktadır. Ancak eğrilik yarıçapındaki artışa bağlı hidrodinamik etkilerdeki azalmanın miktarı sürtünme katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Sürtünme katsayısının 0.05'ten büyük değerlerinde tüm eğrilik yarıçapları için hidrodinamik etkilerde birbirine oldukça yakın azalma oranları elde edilmiştir. Bunun nedeni, artan sürtünmenin mesnet yer değiştirmelerini önemli ölçüde kısıtlaması ve mesnetlerin yanal rijitliklerinin artmasıdır. Özellikle, El Centro ve Erzincan depremlerine ait ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerin sonuçlarının incelendiğinde yüksek sürtünmeli mesnetlerin eğrilik yarıçaplarından bağımsız olarak en büyük yer değiştirmeleri neredeyse aynı olmaktadır.

Sürtünme katsayısının 0.03 - 0.05 arasındaki değerlerinde sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisinin en olumlu olduğu görülmektedir. Daha yüksek sürtünme değerleri için mesnetlerin hareket etme yeteneği azalmakta ve

yapıya aktarılan kuvvetler artmaktadır. Sürtünme katsayısının 0.03'ten küçük olduğu mesnetlerde ise eğrilik yarıçapının artmasıyla mesnet yer değiştirmeleri önemli ölçüde artmaktadır. En büyük yer değiştirmesi değerinin artması da kullanılacak mesnet boyutlarının büyümesine ve sismik yalıtım sisteminin maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Buna ek olarak, kuvvetli rüzgarların etkisiyle deponun hareketinin kısıtlanması için özel önlemlerin de alınması gerekebilmektedir. Çok düşük sürtünmeli mesnetlerde, hidrodinamik etkilerdeki azalma oranı da devinimli bileşenin etkisinin artması nedeniyle daha düşük olmakta ve çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değerin %250'sini aşabilmektedir.

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin sürtünme katsayısı, basınç, ortam sıcaklığı ve yükleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak, zamanla kayma yüzeyinde oluşabilecek kirlenme ya da korozyon gibi etmenler sürtünme katsayısının artmasına neden olabilmektedir. Analizlerde, sürtünme katsayısının 0.05 ya da daha yüksek olması durumunda küçük sürtünme değişimlerinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ancak düşük sürtünmeli mesnetlerin kullanıldığı depolarda, tasarım parametrelerinin sürtünme değişimlerine oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sürtünme katsayısındaki olası değişimin tasarım parametrelerinin üzerinde etkisi tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.

Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin kullanıldığı sıvı depolarda sismik yalıtım sistemi performansının depremin frekans içeriğinden etkilendiği görülmektedir. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının Housner şiddetleri Tablo 4.1'de özetlenmiştir. Ölçeklenmiş ivme kayıtları içerisinde Housner şiddeti en düşük olanı El Centro kaydı ve en büyük olanı ise Yarımca kaydıdır. Ölçeklenmemiş kayıtlar ile yapılan analizlerde de sismik yalıtım sisteminin tasarım parametrelerinde sağladığı en yüksek azalma oranı El Centro kaydının kullanıldığı analizlerde ve en düşük azalma oranı ise Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde olmuştur. İvme kaydının en büyük hız ve en büyük yer değiştirmesi de depo davranışı üzerinde etkili olmaktadır. Özellikle, yakın fay etkisinin kuvvetli olarak hissedildiği Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde, sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerinde önemli bir azalma yaratmadığı ve hatta bazı durumlarda daha kötü sonuçların alınmasına neden olduğu görülmüştür.

El Centro ve Erzincan depremlerine ait ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerde en büyük yer ivmesinin 0.2 g olması halinde çalkalanma yüksekliğinin sabit tabanlı

durum için elde edilen değerle aynı olduğu görülmektedir. Ancak en büyük yer ivmesinin 0.4g ve 0.6g olması halinde çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değerden %20 mertebesinde fazla olmaktadır. En büyük yer ivmesinin 0.2 g'ye ölçeklendiği El Centro ve Erzincan depremlerine ait ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerde en büyük mesnet yer değiştirmeleri sırasıyla 2 cm ve 4 cm olmaktadır. En büyük yer ivmesinin 0.6 g'ye ölçeklendiği El Centro ve Erzincan depremlerine ait ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerde ise en büyük mesnet yer değiştirmeleri sırasıyla 12.5 cm ve 18.5 cm olmaktadır. Mesnet yer değiştirmelerinin artmasıyla, sürtünmeli sarkaç sisteminin etkili rijitliği azalmakta ve sismik yalıtımlı deponun titreşim periyodu uzamaktadır. Bu periyod uzaması sonucu depo içerisindeki devinimli bileşenin etkisi artmaktadır. Artan en büyük ivme değerleri için devinimli bileşenin etkisinin artışı, depo tasarım parametrelerindeki azalma oranlarında da görülmektedir. El Centro ve Erzincan depremlerine ait ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerde en büyük ivme değerinin 0.2 g'den 0.6 g'ye çıkmasıyla en büyük taban ivmesindeki azalma, depo duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentlerindeki azalmaya göre giderek daha yüksek olmaktadır.

4.5. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetli Sıvı Depoları

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin depo davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla, değişik depo geometrileri ve yer ivmesi kayıtlarının kullanıldığı parametrik bir çalışma yapılmıştır. Söz konusu çalışmada ele alınan parametreler Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerden oluşan sismik yalıtım sisteminin akma sonrası yanal rijitliği, toplam depo kütlesi ve hedef yalıtım periyodu kullanılarak hesaplanmıştır. Kurşun çekirdekli mesnetlerin tasarımında elastik rijitlik, akma sonrası rijitliğin 8-10 misli olarak seçilmektedir. Ancak mesnedin yanal hareketi sırasında kurşun çekirdek ısınmaktadır. Bu sıcaklık artışı nedeniyle kurşun çekirdeğin rijitliği azalabilmektedir (Constantinou and Whittaker, 2004). Bu nedenle, mesnetin elastik rijitliği hareket esnasında akma sonrası rijitliğin 5-6'da biri mertebesine inebilmektedir. Bu değişimin, davranışa olan etkilerinin incelenebilmesi için parametrik çalışmada akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının 0.1 ile 0.2 arasındaki değerleri kullanılmıştır.

Elastomer mesnetlerin içerisinde bulunan kurşun çekirdek, kuvvetli deprem hareketi sırasında yapıya iletilen enerjinin ısıya dönüştürülerek sönmelenmesini

sağlamaktadır. Buna ek olarak, kurşun çekirdeğin bir görevi de yapının rüzgar ve trafikten kaynaklanan titreşimler etkisinde hareket etmesini engellemektedir. Tasarımda, kurşun çekirdeğin akma kuvveti yapının ağırlığının bir yüzdesi olarak belirlenmektedir. Belirlenen akma kuvvetinin elde edilebilmesi için kurşun çekirdeklerin çapları arttırılmaktadır.

Elastomer mesnetlerin içerisinde bulunan kurşun çekirdeklerin akma kuvvetlerinin arttırılmasının davranış üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılan analizlerde yapı ağırlığının %5 ile %19'u arasındaki akma kuvvetleri göz önüne alınmıştır.

Tablo 4.3'de verilmiş olan depo geometrileri, yalıtım sistemi parametreleri ve ivme kayıtları kullanılarak yürütülen parametrik çalışmanın sonuçları Ek-D'de grafikler aracılığıyla gösterilmiştir. Bu bölümde, söz konusu grafiklerin bir kısmı ele alınan depo tiplerinde sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmekte kullanılacaktır.

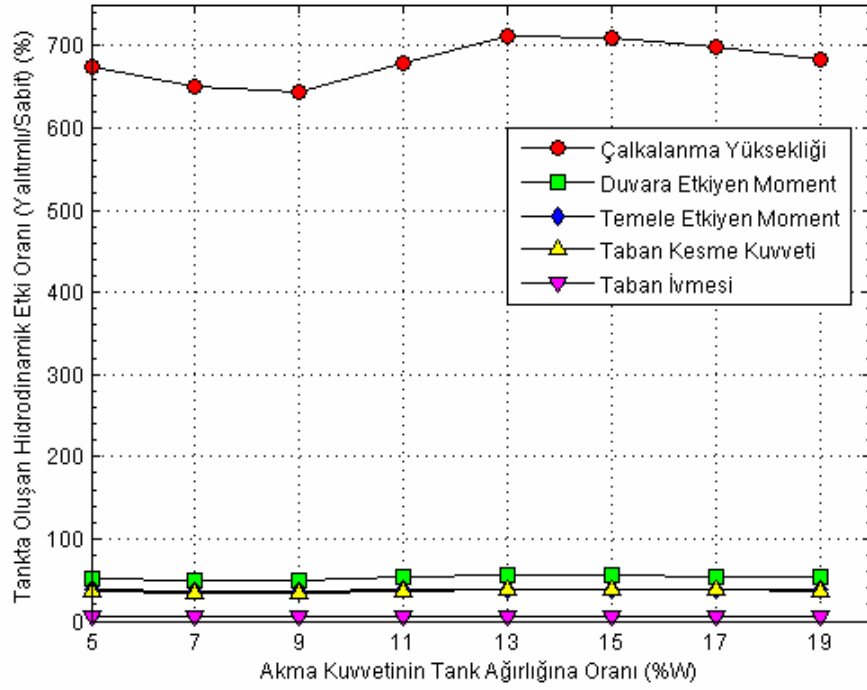
Tablo 4.3 : Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin davranışa olan etkilerinin saptanması için yürütülen çalışmada kullanılan analiz parametreleri

Depo geometrisi (H/R)	0.85 – 2.00 – 3.00
İvme kayıtları (İvme kayıtları 0.4 g'ye ölçeklenmiştir)	El Centro 1940 KG Erzincan 1992 DB Yarımca 1999 KG
Akma sonrası rijitlikten elde edilen titreşim periyodu (T_p)	2 s – 2.5 s – 3s
Kurşun çekirdeklerin akma kuvvetinin toplam depo ağırlığına yüzdesi	%5 - %7 - %9 - %11 %13 - %15 – %17 - %19

4.5.1. Depo Geometrisinin ve Sismik Yalıtım Sistemi Özelliklerinin Davranışa Etkilerinin İncelenmesi

Depo Tip-1 (H/R = 0.85)

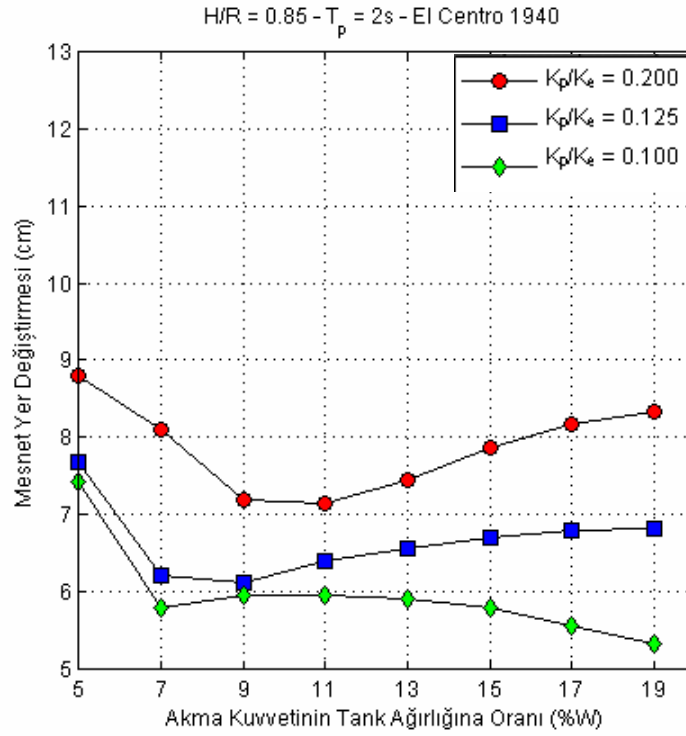
El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sismik yalıtım sistemi sayesinde yaklaşık 10 katı azalmaktadır. Ancak depo tasarım parametrelerindeki azalma oranı daha düşük olmaktadır. İncelenen tüm parametreler için taban kesme kuvveti ve eğilme momentleri sırasıyla sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %40'ı ve %60'ı seviyesinde kalmaktadır. Çalkalanma yüksekliğinde ise sabit tabanlı duruma göre %600-%700 oranında bir artış görülmektedir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – El Centro $0.40g$)

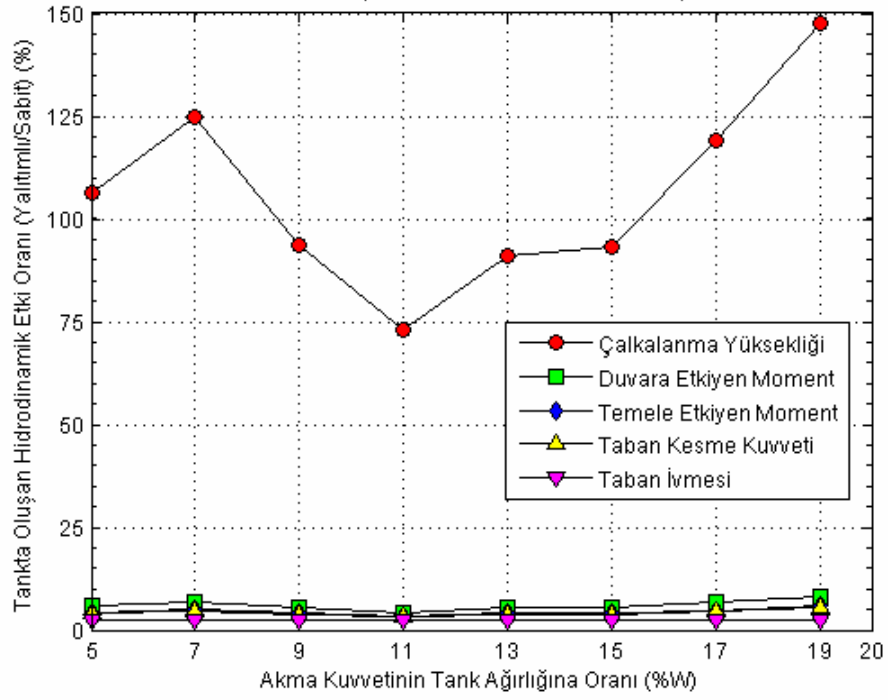
Kurşun çekirdeğin akma kuvvetindeki artış, en çok çalkalanma yüksekliği üzerinde etkili olmaktadır. Depoda oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerindeki değişim çalkalanma yüksekliğine paralel olarak değişmektedir. Ancak depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentlerindeki değişimin mertebesi daha küçük olmaktadır.

Benzer şekilde akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe olan oranının da çalkalanma yüksekliğininin değişimine olan etkisi, depoda oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki değişime göre daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu oranın en önemli etkisi mesnet yer değiştirmeleri üzerinde olmaktadır. Elastik rijitliğin akma sonrası rijitliğe olan oranının 0.2 olması durumunda mesnet yer değiştirmelerinin en yüksek olduğu, 0.1 olması durumunda ise en düşük olduğu görülmektedir. Buradan, kurşun çekirdeğin ısınması sonucu mesnet yer değiştirmelerinin artabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. En büyük mesnet yer değiştirmesinin hesaplanmasında bu oranın büyük değerinin kullanılması tasarımdaki emniyet seviyesini arttıracaktır (Şekil 4.25).

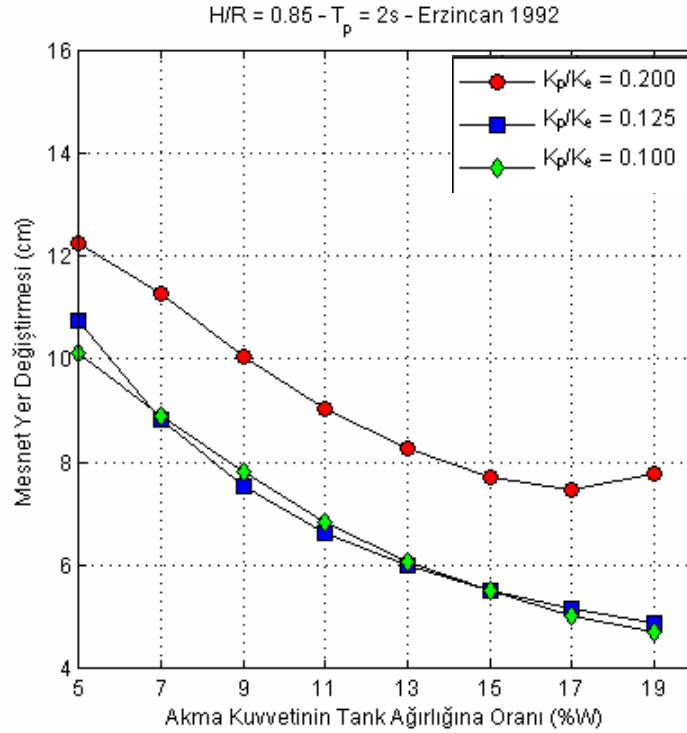


Şekil 4.25 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{El Centro 0.40g}$)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %5'inin altında kalmaktadır. Taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarının da aynı mertebede olduğu görülmüştür (Şekil 4.26). Mesnet yer değiştirmeleri, k_p/k_e oranının büyümesiyle artmaktadır (Şekil 4.27). Çalkalanma yüksekliği ise akma sonrası rijitliğin azalmasına bağlı olarak sabit tabanlı duruma göre %190 seviyesinde artabilmektedir (Şekil D.4)(Şekil D.5)(Şekil D.6).



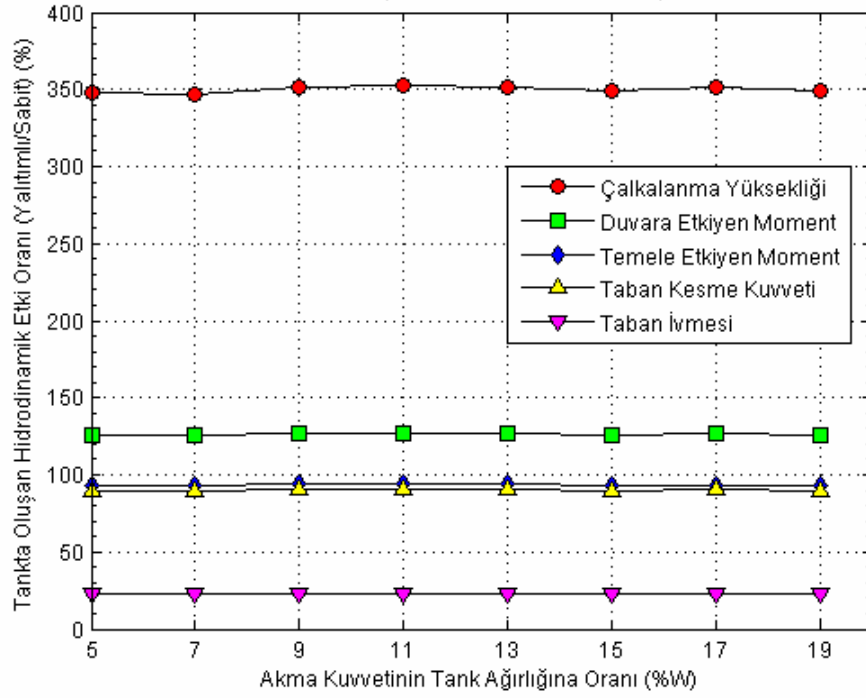
Şekil 4.26 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Erzincan 0.40g)



Şekil 4.27 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – Erzincan 0.40g)

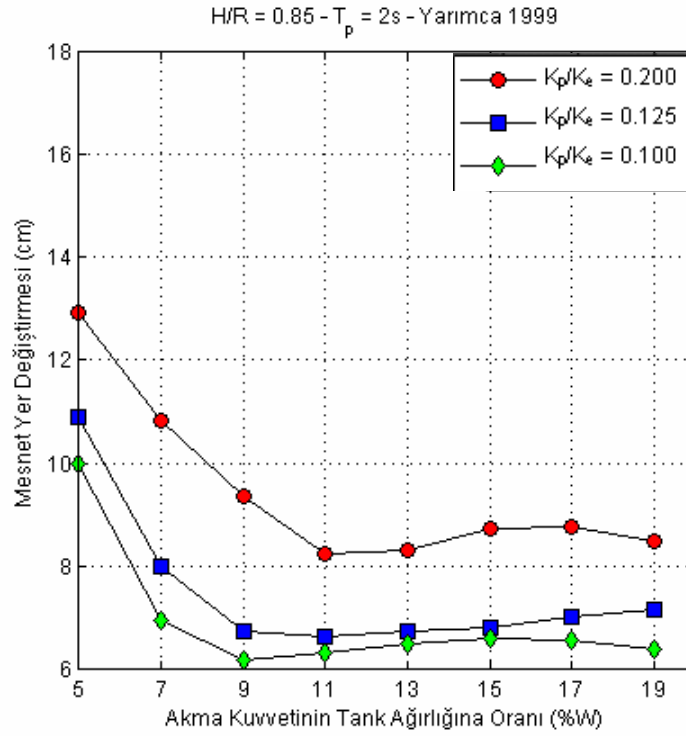
Yarımcı depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değer %25'inin

altında kalmaktadır. Taban kesme kuvveti ve tabanda oluşan eğilme momenti değerleri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlere göre sadece %10 azalmaktadır. Depo duvarında oluşan eğilme momenti ise sabit tabanlı duruma göre yaklaşık %125 oranında artmaktadır. Çalkalanma yüksekliğinin de sabit tabanlı durum için elde edilen değer %350'si mertebesinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.28).



Şekil 4.28 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Yarımcı $0.40g$)

Kurşun çekirdeğin akma kuvveti değerinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının değişiminin taban kesme kuvveti, depoda oluşan eğilme momentleri ve çalkalanma yüksekliği üzerinde etkili olmamaktadır. Ancak analizlerde mesnet yer değiştirmelerinin, akma kuvvetinin büyüklüğünden ve elastik rijitliğin akma sonrası rijitliğe oranından etkilendiği görülmektedir. Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının en düşük değeri için mesnet yer değiştirmelerinin değeri en büyük olmaktadır. Herhangibir rijitlik oranı için mesnet yer değiştirmelerinin en büyük değeri ise akma kuvvetine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 4.29).

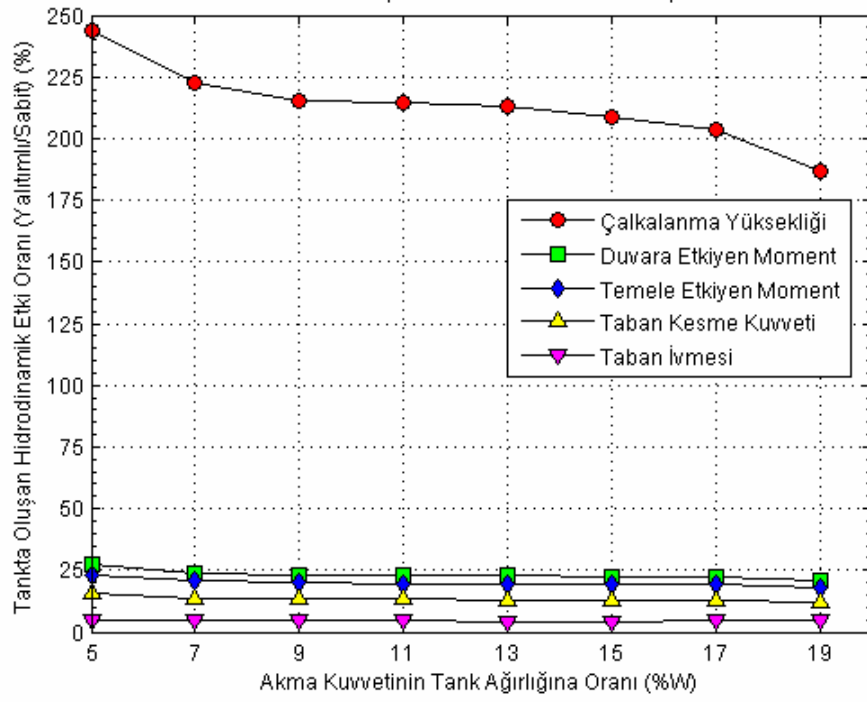


Şekil 4.29 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - \text{Yarımca } 0.40g$)

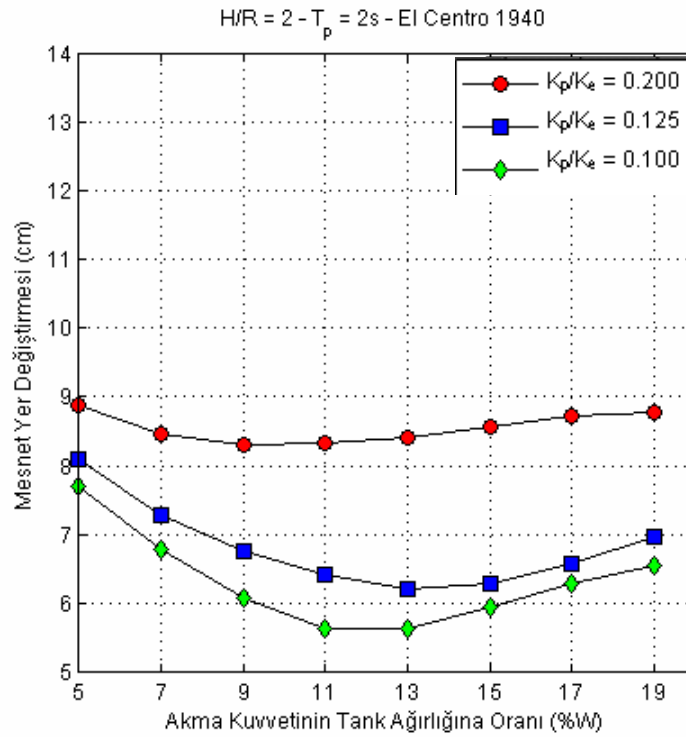
Depo Tip-2 ($H/R = 2$)

El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %5'i mertebesinde dir. Taban kesme kuvveti ve eğilme momentleri de sırasıyla sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %15'i ve %25'i seviyesinde kalmaktadır (Şekil 4.30). Çalkalanma yüksekliği ise sabit tabanlı duruma göre %150-%300 oranında artmaktadır (Şekil D.10)(Şekil D.11)(Şekil D.12).

Kurşun çekirdekli mesnetlerin akma sonrası rijitliklerinin azalmasıyla mesnet yer değiştirmeleri artmaktadır (Şekil D.31). Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının büyümesi de mesnet yer değiştirmelerinin artmasına neden olmaktadır (Şekil 4.31).



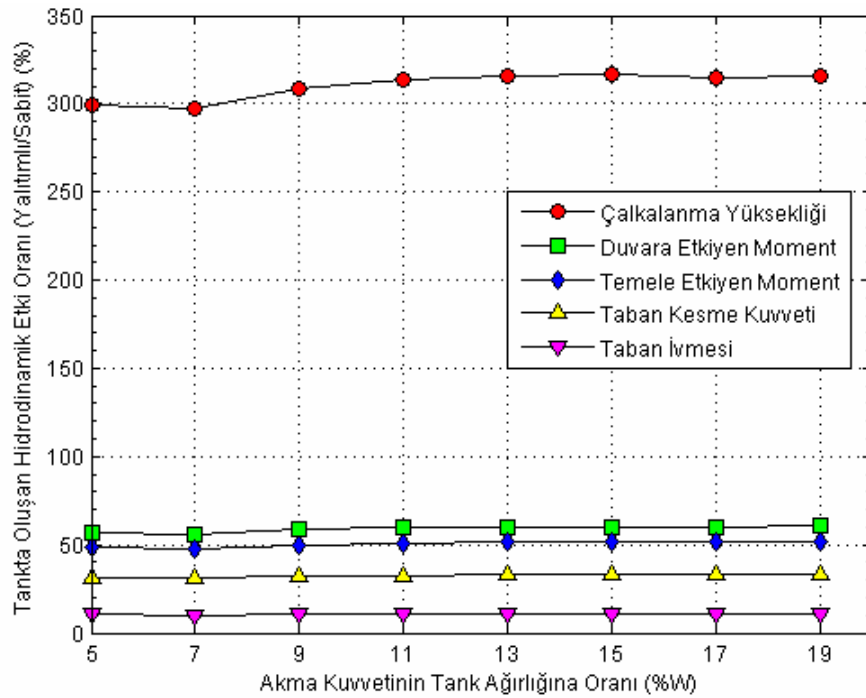
Şekil 4.30 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.20$ – El Centro 0.40g)



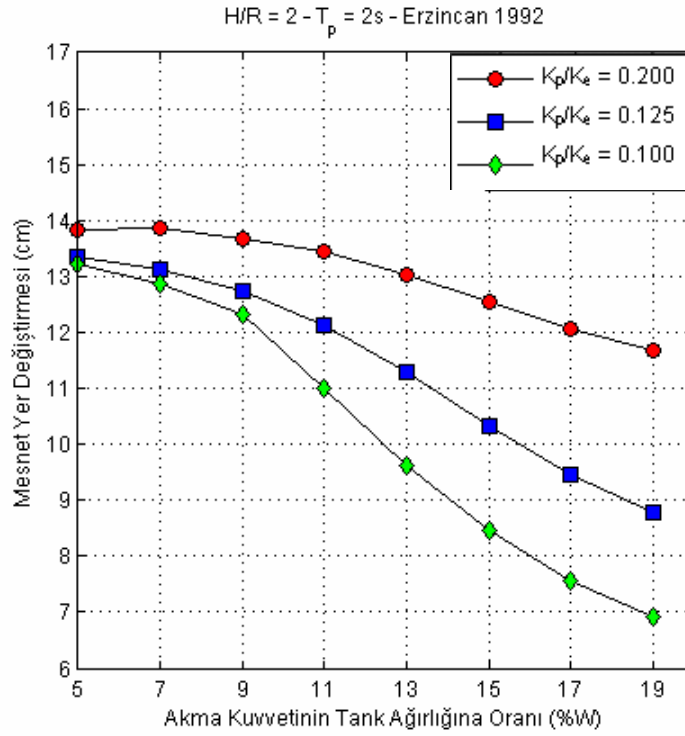
Şekil 4.31 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – El Centro 0.40g)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %10'unun altında kalmaktadır. Taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranları taban ivmesindeki azalma oranına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %30'u mertebesinde kalmaktadır (Şekil 4.32). Depo temelinde ve duvarında oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin yaklaşık %40 - %60 seviyesine inmektedir. Çalkalanma yüksekliği ise akma sonrası rijitliğin azalmasına bağlı olarak sabit tabanlı duruma göre yaklaşık %300 seviyesinde artabilmektedir (Şekil D.13)(Şekil D.14)(Şekil D.15).

Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin değişiminin depoda oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerinde azalma oranlarının üzerindeki etkisinin zayıf olduğu görülmektedir (Şekil D.13)(Şekil D.14)(Şekil D.15). Benzer şekilde, akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının değişiminin de depoda oluşan kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin azalma oranlarına önemli ölçüde etkisi olmamaktadır. Mesnet yer değiştirmeleri, k_p/k_e oranının büyümesiyle artmaktadır(Şekil 4.33).



Şekil 4.32 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Erzincan $0.40g$)

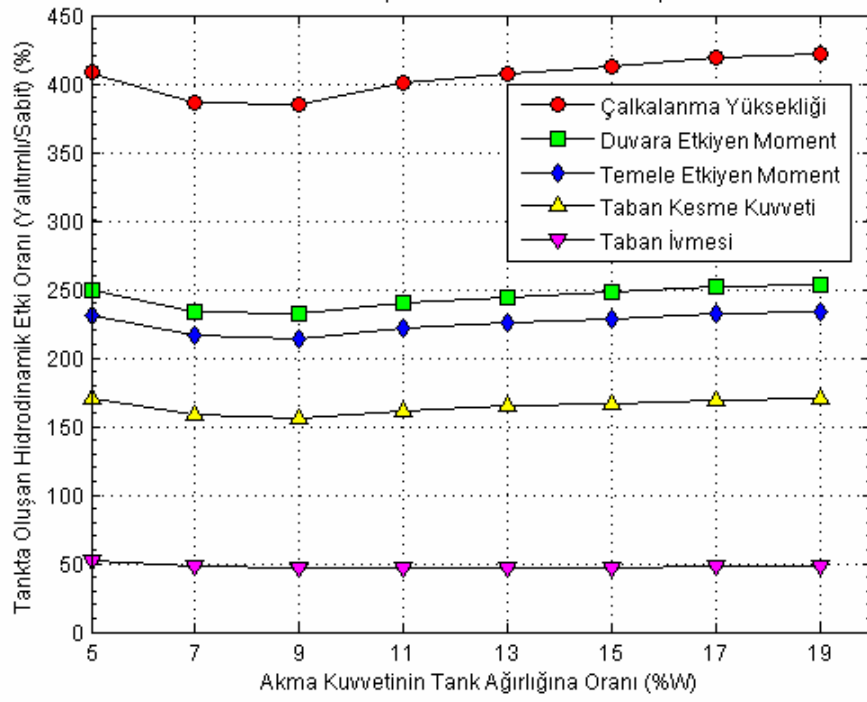


Şekil 4.33 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2 \text{ s} - \text{Erzincan } 0.40g$)

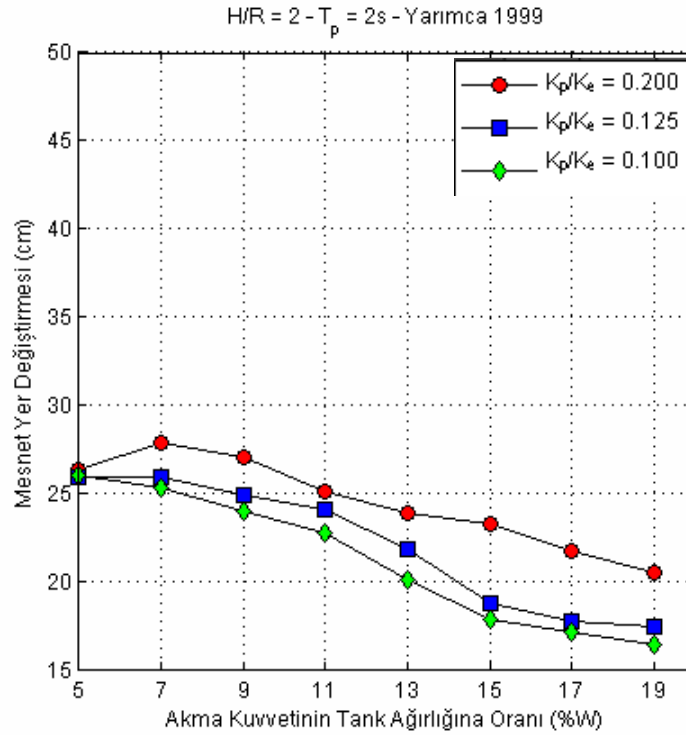
Yarımcı depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değer yarısı seviyesinde kalmaktadır. Buna karşın taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ele alınan tüm parametreler için sabit tabanlı duruma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %150'si mertebesine yükselmektedir (Şekil 4.34). Depo temeline ve duvarında oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin yaklaşık %200 seviyesine çıkmaktadır. Çalkalanma yüksekliği ise akma sonrası rijitliğin azalmasına bağlı olarak sabit tabanlı duruma göre yaklaşık %300 oranında artmaktadır (Şekil D.16) (Şekil D.17) (Şekil D.18).

Mesnet yer değiştirmeleri akma kuvvetinin artmasına bağlı olarak düşmektedir. Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının artması da mesnet yer değiştirmelerinin artmasına neden olmaktadır (Şekil 4.35).

Analiz sonuçlarından da görülebileceği gibi kurşun çekirdekli mesnetlerin kullanılması ele alınan depo geometrisi ve yer ivmesi kaydı için depo tasarım parametrelerini olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 4.34 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Yarımca 0.40g)

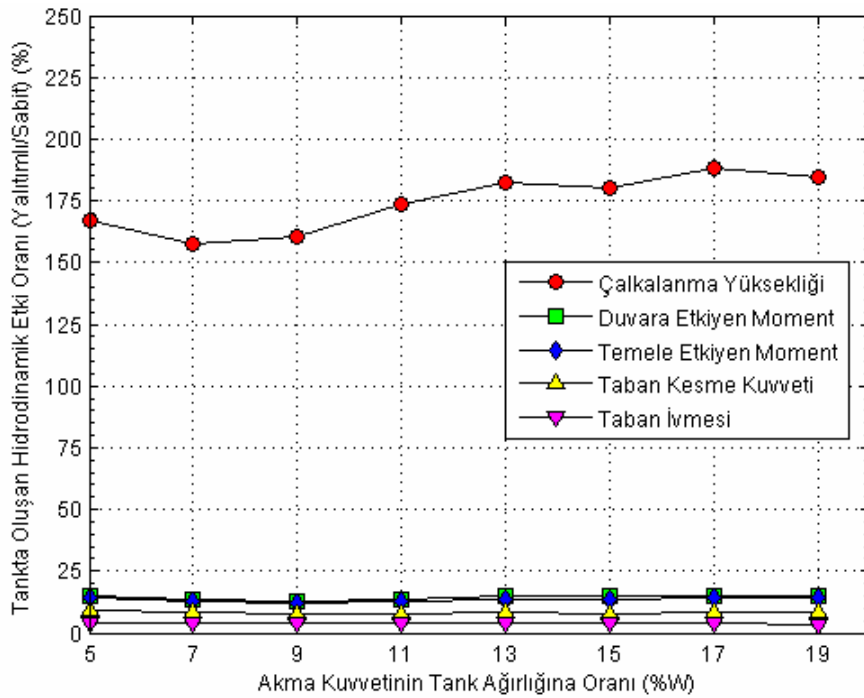


Şekil 4.35 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – $T_p = 2$ s – Yarımca 0.40g)

Depo Tip-3 (H/R = 3)

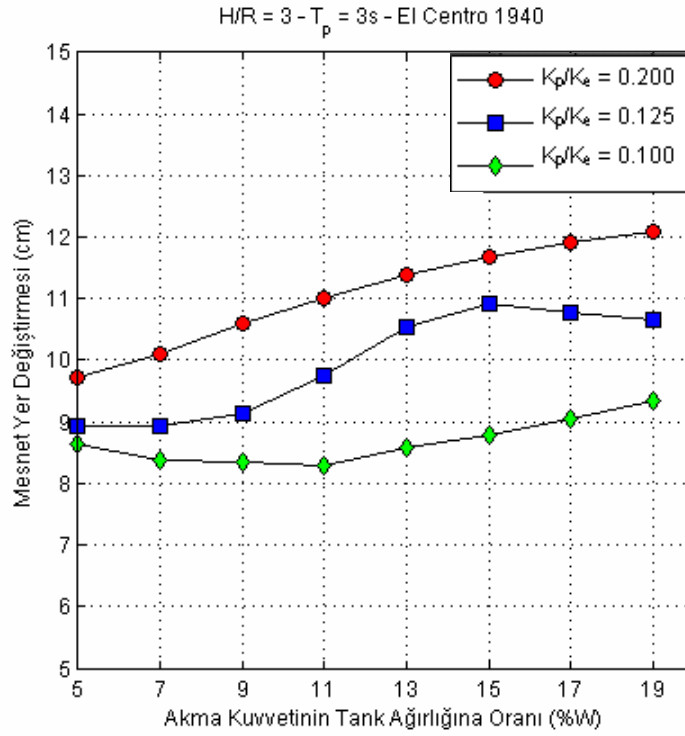
El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değer %5'i mertebesindedir. Taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentleri de sırasıyla sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %15'i ve %25'i seviyesinde kalmaktadır (Şekil 4.36). Akma kuvvetinin artışının depoda oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerinin azalma oranları üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır.

Çalkalanma yüksekliğinin sabit tabanlı duruma göre artışı, akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranından ve akma kuvveti seviyesinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde çalkalanma yüksekliğinin sabit tabanlı duruma göre %125-%285 oranında arttığı görülmektedir (Şekil D.10) (Şekil D.11)(Şekil D.12).



Şekil 4.36 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 3 – $T_p = 3$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – El Centro 0.40g)

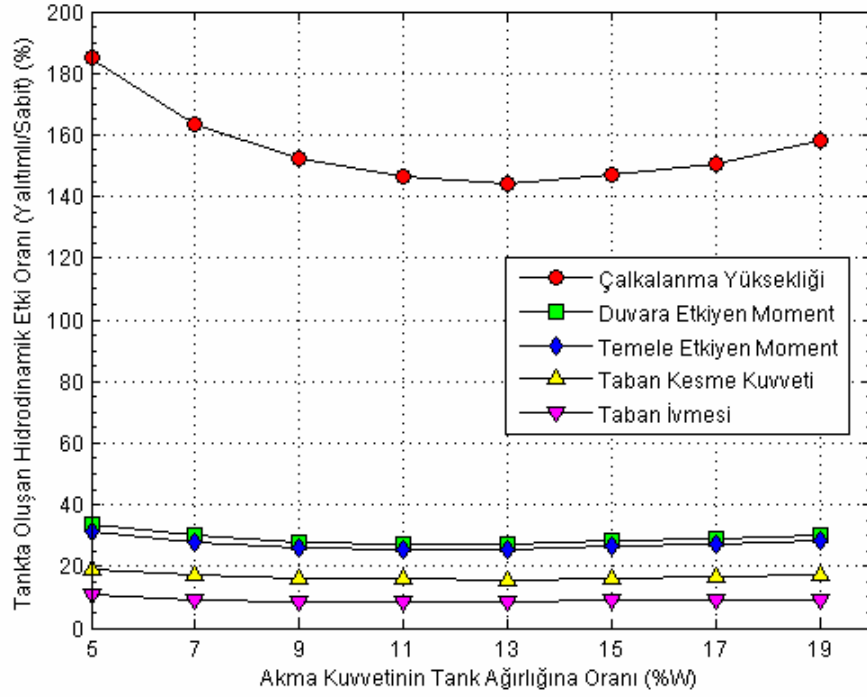
Kurşun çekirdekli mesnetlerin akma sonrası rijitliklerinin azalmasıyla mesnet yer değiştirmeleri artmaktadır (Şekil D.34). Akma sonrası rijitliğin aynı olması durumunda en büyük mesnet yer değiştirmeleri, akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının (k_p/k_e) en büyük olduğu mesnetlerde görülmektedir. (Şekil 4.37).



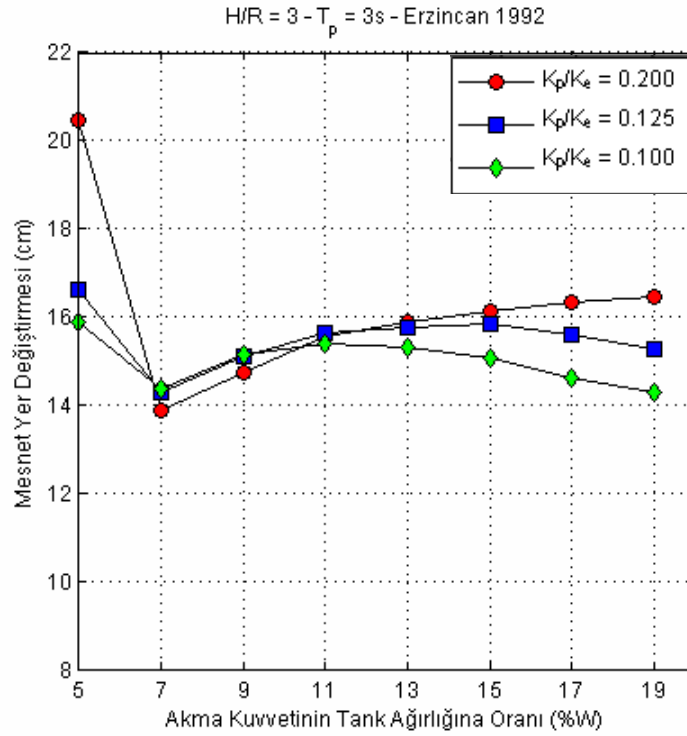
Şekil 4.37 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - \text{El Centro 0.40g}$)

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %10'unun altında kalmaktadır. Taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranları taban ivmesindeki azalma oranına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %20'si mertebesinde kalmaktadır (Şekil 4.38). Depo temelinde ve duvarında oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin yaklaşık %35'i seviyesine inmektedir. Çalkalanma yüksekliği ise akma sonrası rijitliğin azalmasına bağlı olarak sabit tabanlı duruma göre artışı çoğunlukla %200 seviyesininin altında kalmaktadır (Şekil D.22)(Şekil D.23)(Şekil D.24).

Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin değişiminin depoda oluşan taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerinde azalma oranlarının üzerindeki etkisinin zayıf olduğu görülmektedir (Şekil D.22)(Şekil D.23)(Şekil D.24). Benzer şekilde, akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının değişiminin de depoda oluşan kuvvetlerin ve eğilme momentlerinin azalma oranlarına önemli ölçüde etkisi olmamaktadır. Mesnet yer değiştirmeleri, çoğunlukla k_p/k_e oranına bağlı olarak artmaktadır (Şekil 4.39).



Şekil 4.38 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $T_p = 3$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Erzincan 0.40g)



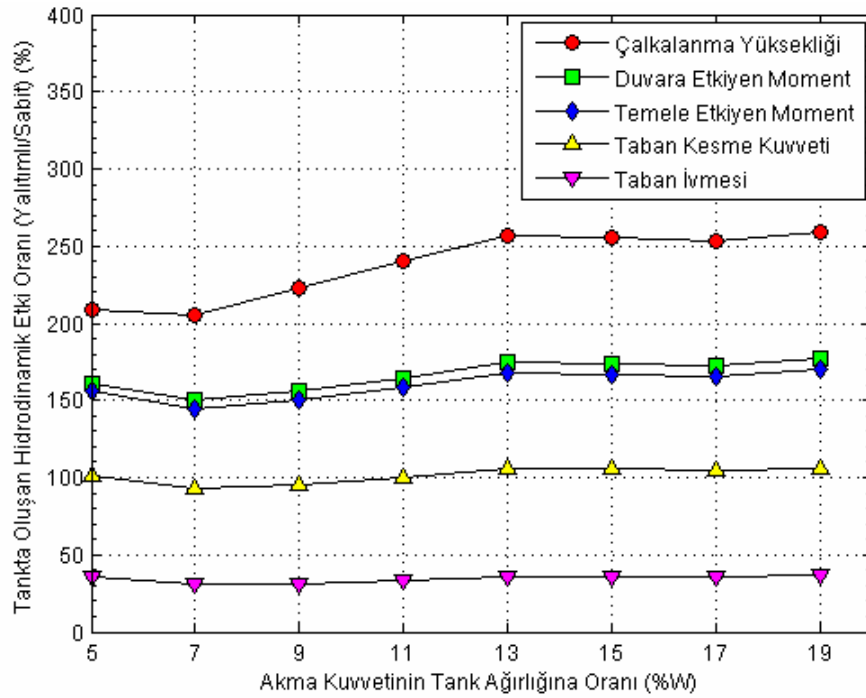
Şekil 4.39 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $T_p = 3$ s – Erzincan 0.40g)

Yarımcı depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde depo tabanında oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değer %40'ı

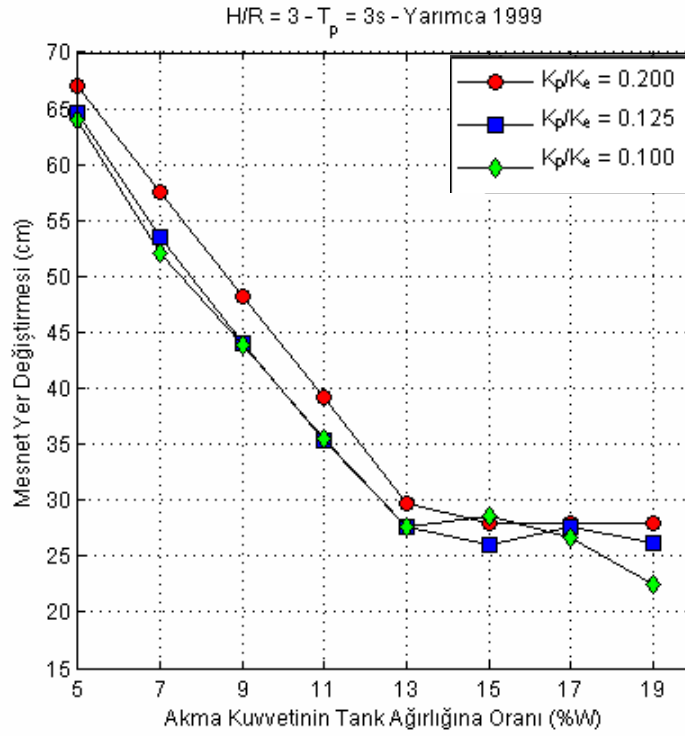
seviyesinde kalmaktadır. Buna karşın taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri ele alınan tüm parametreler için sabit tabanlı duruma göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Taban kesme kuvveti sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %120'si mertebesine yükselmektedir (Şekil 4.40). Depo temelinde ve duvarına oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin yaklaşık %150-200 seviyesine çıkmaktadır. Çalkalanma yüksekliği ise akma sonrası rijitliğin azalmasına bağlı olarak sabit tabanlı duruma göre yaklaşık %300 oranında artmaktadır (Şekil D.25) (Şekil D.26) (Şekil D.27).

Mesnet yer değiştirmeleri akma kuvvetinin artmasına bağlı olarak düşmektedir. Akma sonrası rijitliğin aynı olması durumunda en büyük mesnet yer değiştirmeleri, akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının (k_p/k_e) en büyük olduğu mesnetlerde görülmektedir (Şekil 4.41).

Ele alınan depo geometrisi ve yer ivmesi kaydı için kurşun çekirdekli mesnetlerden oluşan bir sismik yalıtım sisteminin kullanılması uygun görülmemektedir.



Şekil 4.40 : Kurşun çekirdeğin akma kuvvetinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – $T_p = 3$ s – $k_p/k_e = 0.10$ – Yarımca 0.40g)



Şekil 4.41 : Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3 \text{ s} - \text{Yarımca } 0.40g$)

4.5.2. Kurşun Çekirdekli Elastomer Mesnetli Sıvı Depolarının Davranışının İncelenmesi İçin Yapılan Çalışmanın Değerlendirilmesi

Sismik yalıtım sisteminin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi, yalıtım sisteminin mekanik özelliklerine, depo geometrisine ve kullanılan depremi ivme kaydına bağlı olarak değişmektedir.

El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerin sonuçları değerlendirildiğinde, sismik yalıtımlı tüm depo geometrileri için taban ivmesinin en büyük değerlerinin, sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %5-10'u mertebesine indirilebildiği görülmektedir. Ancak taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarında depo geometrisine bağlı farklılıklar görülmektedir. Örnek olarak, Depo tip-1 için El Centro kaydının kullanılması durumunda taban ivmesi yer hareketi ivmesinin %10'una inmesine karşın depo duvarında oluşan eğilme momenti sabit tabanlı durum için elde edilen değer sadece %60'ına indirilebilmektedir. Buna ek olarak, çalkalanma yüksekliği de sabit tabanlı duruma göre 7 misli artmaktadır. Buradan, sadece taban ivmesine bağlı olarak performansın değerlendirilmesinin doğru olmadığı görülmektedir. Periyot uzatması etkisiyle darbesel hidrodinamik basınçların azalmasına karşın uzun periyotlu

devinimli bileşenden kaynaklanan hidrodinamik basınçların etkisi artmaktadır. Devinimli bileşenin etkisi çalkalanma yüksekliğindeki artışlarda da ortaya çıkmaktadır.

Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde taban ivmesinin en büyük değerinin sabit tabanlı durumda elde edilen değerlerin yaklaşık %50 seviyesine indirilebilmesine karşın Depo tip-1 için taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentlerinde önemli azalma görülmemektedir. Depo tip-2 ve Depo tip-3 için ise taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sabit tabanlı duruma göre daha yüksek olmaktadır. Dolayısıyla, yakın fay etkisiyle yüksek hız ve yer değiştirmelerin oluşabileceği bölgelerde sıvı depolarının kurşun çekirdekli elastomer mesnetler ile korunmasının olumsuz sonuçlar doğurabileceği sonucuna varılmıştır.

Erzincan depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde sismik yalıtım sistemi tüm depo geometrileri için taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentleri önemli mertebede indirilebilmektedir. Özellikle Depo tip-1’de ($H/R=0.85$) tabanda oluşan ivmenin en büyük değeri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %3 mertebesine indirilebildiği görülmektedir. Taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentleri ise sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %5-7’si seviyesinde kalmaktadır. Çalkalanma yüksekliği ise sabit tabanlı duruma göre sadece %20 artmaktadır.

Kurşun çekirdeğin akma kuvvetindeki artış, sismik yalıtım sistemi tarafından taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momenti değerlerinde sağlanan azalma oranlarını önemli ölçüde etkilememektedir. Akma kuvvetinin artması en çok çalkalanma yüksekliği üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliğindeki değişime paralel olarak taban kesme kuvveti ve eğilme momenti azalma oranlarında düşük mertebelerde değişim gözlenmiştir.

Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe olan oranının taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki değişime olan etkisinin önemsiz mertebede olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliğininin değişimine olan etkisi ise daha belirgin olmaktadır. Bu oranın en önemli etkisi mesnet yer değiştirmeleri üzerinde olmaktadır. Çoğu durumda akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe olan oranının 0.2 olması durumunda mesnet yer değiştirmelerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, kurşun çekirdeğin ısınması sonucu mesnet yer değiştirmelerinin artabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.

En büyük mesnet yer değiştirmesinin hesaplanmasında bu oranın büyük değerinin kullanılması tasarımdaki emniyet seviyesini arttıracaktır.

4.6. Örnek Uygulama

Sismik yalıtım sistemi parametrelerinin seçimi ve depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentlerinin elde edilmesinde parametrik yaklaşımın kullanımı bu bölümde örnek bir uygulama çalışması ile gösterilmiştir. Bu çalışmada, İzmir- Aliğa Egegaz tesislerinde bulunan sismik yalıtımlı LNG depolarınının geometrik özellikleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda depolanan sıvı yüksekliği 36 m ve depo yarıçapı 42 m olarak alınmıştır. Söz konusu LNG deposunun 0.6 g en büyük ivmeye dayanıklı olarak tasarlanması istenmektedir. Bu doğrultuda, sahaya özel olarak türetilen ivme kaydı olarak Erzincan 1992 Doğu-Batı bileşeninin 0.6 g'ye ölçeklenmiş hali kullanılmıştır. İnşaat alanının sismolojik özelliklerine göre türetilen birden fazla ivme kaydının kullanılması durumunda, aşağıda izlenen süreç her kayıt için tekrar edilerek sismik yalıtım sistemi parametreleri ve depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentleri hesaplanabilir. Bu çalışmada, sismik yalıtım sistemi olarak sürtünmeli sarkaç sistemi seçilmiştir.

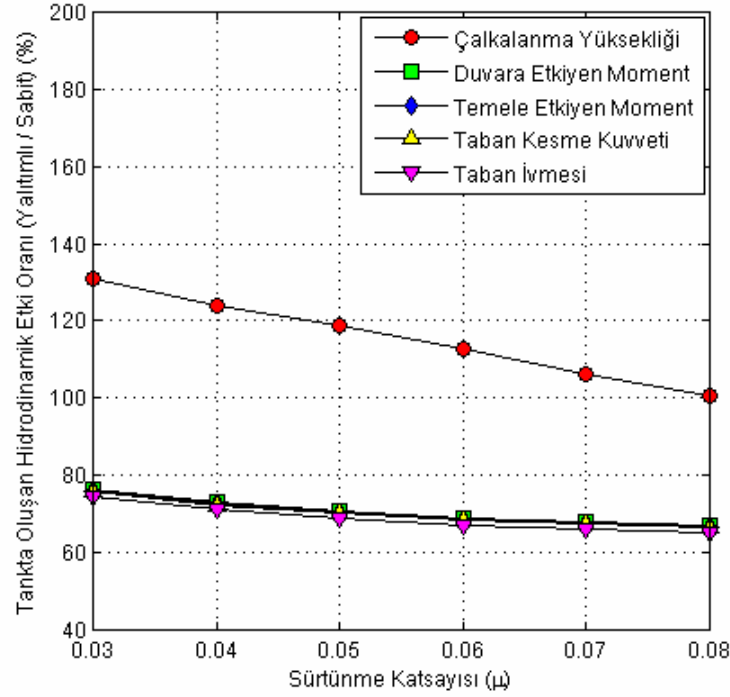
İlk aşamada sürtünmeli sarkaç mesnet yarıçapı ve sürtünme katsayısının depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentleri üzerindeki etkilerinin izlenebilmesi için parametrik bir çalışma yapılmış ve bu çalışmanın sonuçları sabit tabanlı durum için elde edilen değerlere göre normalize edildiği grafikler aracılığıyla Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'de gösterilmiştir. Sabit tabanlı durum için depo tasarım parametrelerinin değerleri Tablo 4.4'de özetlenmiştir.

Tablo 4.4 : Sabit tabanlı depo için elde edilen depo tasarım parametreleri (H = 36m, R = 42 m, $\rho_l = 8000 \text{ N/m}^3$, Erzincan 1992 DB (0.6 g'ye ölçeklenmiş))

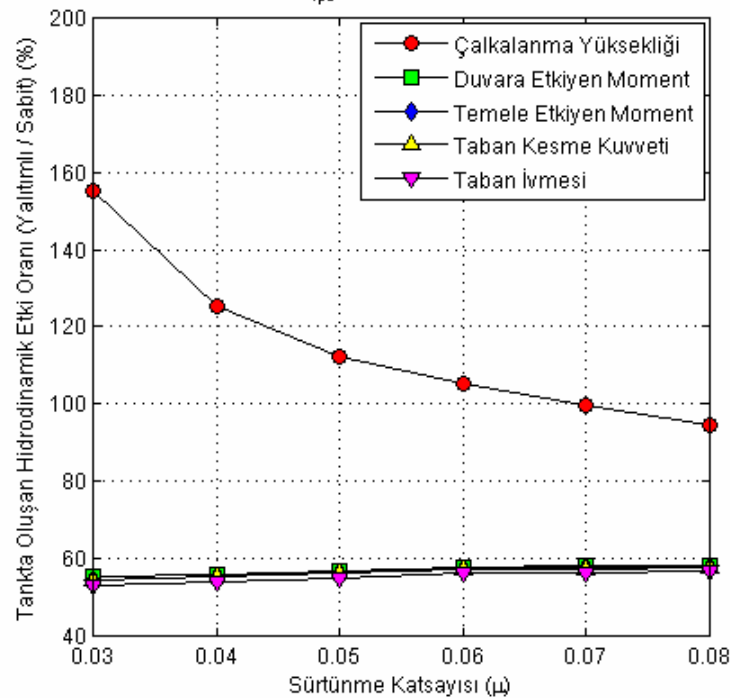
Depo duvarında oluşan eğilme momenti, (MNm)	Depo temelinde oluşan eğilme momenti (MNm)	Taban kesme kuvveti (MN)	Çalkalanma yüksekliği (m)
6656	13661	460	0.75

Bu bölümde sürtünmeli sarkaç mesnetli sıvı depoları için genel olarak sürtünme katsayısının 0.03 ile 0.05 arasındaki değerleri için en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Yükleme ve çevre koşulları göz önüne alınarak parametrik analizde

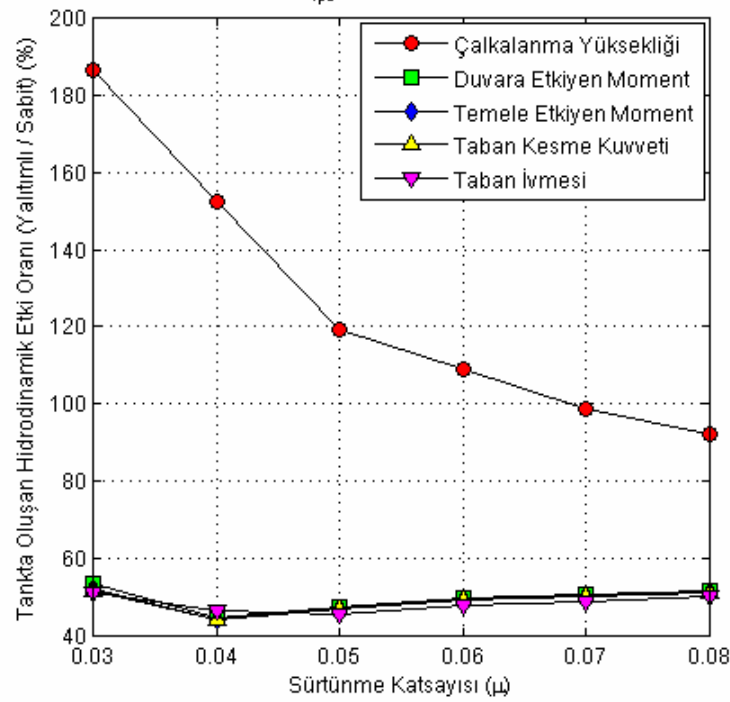
sürtünme katsayısının 0.03 – 0.08 arasındaki değerleri ele alınmıştır. Mesnet eğrilik yarıçapı olarak sırasıyla 1 m, 1.55 m ve 2.24 m kullanılmıştır.



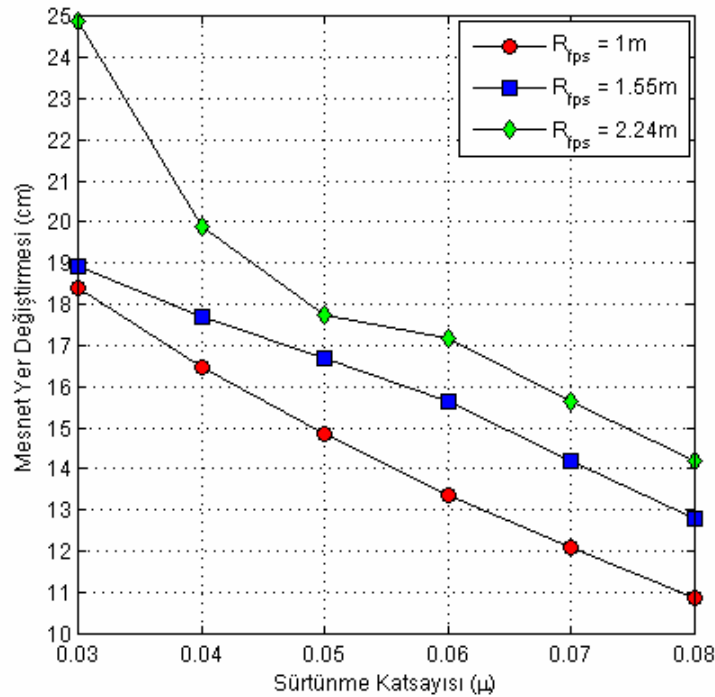
Şekil 4.42 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85$ – $R_{fps} = 1$ m – Erzincan 1992 DB 0.60g)



Şekil 4.43 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85$ – $R_{fps} = 1.55$ m – Erzincan 1992 DB 0.60g)



Şekil 4.44 : Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85$ – $R_{fps} = 2.24$ m – Erzincan 1992 DB 0.60g)



Şekil 4.45 : Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi
($H/R = 0.85$ – Erzincan 1992 DB 0.60g)

Analiz sonuçlarının incelendiğinde 2.24 m eğrilik yarıçapına ve 0.04 sürtünme katsayısına sahip mesnetlerle depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentlerinde

sağlanabilecek azalma en yüksek olmaktadır (Şekil 2.44). Çalkalanma yüksekliği ve mesnet yerdeğiştirmesi parametrelerinin de göz önüne alınması durumunda daha yüksek sürtünme katsayısına sahip mesnetlerin kullanılmasının daha avantajlı olacağı görülmektedir. Ancak Bölüm 2.3.1’de belirtilen merkezleme kontrolü yapıldığında sürtünme katsayısının 0.08’den büyük değeri için yalıtım sisteminin geri döndürücü bir mekanizma ile takviye edilmesi gerektiğı görülmektedir. Bu doğrultuda, sürtünme katsayısı 0.06 olarak seçilmiş ve ± 0.02 bir değışim göz önüne alınmıştır.

En büyük çalkalanma yüksekliği ve mesnet yerdeğiştirme değeri sürtünme katsayısının 0.04 değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu durumda, en büyük mesnet yer değıştirmesinin 20 cm olarak seçilebileceğı Şekil 4.45’de görülmektedir. Sismik yalıtımlı depoda oluşacak en büyük çalkalanma yüksekliği, sabit durum için elde edilen değerin 1.5 ile çarpılmasıyla (4.1) ifadesinde elde edilmiştir. Tasarımda en büyük çalkalanma yüksekliğinin 115 cm olarak alınması uygun olacaktır.

$$d_{\max} = 0.75 \times 1.5 = 1.125 \text{ m} \quad (4.1)$$

Depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentleriye sürtünme katsayısının 0.08 değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısının bu değeri için sismik yalıtımlı depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentlerinin sabit tabanlı durum için elde edilen değeri %50 mertebesinde olduğu Şekil 4.44’ten görülebilir. Bu durumda, sismik yalıtımlı durum için depo tasarım parametrelerinin değeri Tablo 4.5’de özetlenmiştir.

Tablo 4.5 : Sismik yalıtımlı depo için elde edilen depo tasarım parametreleri (H = 36m, R = 42 m, $\rho_l = 8000 \text{ N/m}^3$, Erzincan 1992 DB (0.6 g’ye ölçeklenmiş))

	Depo duvarında oluşan eğilme momenti (MNm)	Depo temelinde oluşan eğilme momenti (MNm)	Taban kesme kuvveti (MN)	Çalkalanma yüksekliği (m)
Sabit Tabanlı	6656	13661	460	0.75
Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli ($R_{\text{fps}} = 2.24\text{m}$)	3328	6830	230	1.15

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kritik öneme sahip düşey silindirik sıvı depolarında deprem etkisiyle oluşabilecek hasarları azaltmak amacıyla kullanılan kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların ve sürtünmeli sarkaç mesnetlerin mekanik özelliklerinin, yükleme koşulları ya da zaman içerisinde çevresel etkiler nedeniyle değişmesinin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkileri MATLAB’de geliştirilen bir program yardımıyla incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- İlk aşamada, günümüz itibariyle inşa edilmiş ya da inşaatı devam eden sismik yalıtımlı sıvı depo projeleri, bu projelerde kullanılan sismik yalıtım sistem tipleri ve depo tasarımında kullanılan yönetmelikler incelenmiştir. Dünyanın çeşitli yerlerinde inşa edilen 22 sismik yalıtımlı depo projesi göz önüne alındığında bu sistemin büyük çoğunlukla silindirik yakıt depolarında uygulandığı ve en çok kullanılan sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin ise sürtünmeli sarkaç ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetler olduğu belirlenmiştir.
- Sürtünmeli sarkaç sistemi ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetleri Bouc-Wen modeli ile modellenmiştir. Model parametrelerinin tespitinde State University of New York at Buffalo MCEER laboratuvarında yürütülen Highway Project Task 106-F-4.2.1(a) araştırma projesi kapsamında sismik yalıtım bileşenleri üzerinde yapılan deneylerden elde edilen bilgiler kullanılmıştır (Constantinou ve diğ, 1999).
- Sıvı depolarında taban hareketi nedeniyle oluşan hidrodinamik etkilerin hesaplanmasında kullanılan analitik modeller incelenmiş ve yürütülmesi düşünülen parametrik çalışma için en uygun modellerin Veletsos ve Chalhoub tarafından geliştirilen modellerin olduğuna karar verilmiştir.
- Sismik yalıtımlı sıvı depolarında hidrodinamik etkilerin belirlenebilmesi için MATLAB programlama ortamında bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.

(Söz konusu programın kaynak kodları Ek-G’de verilmiştir.) Geliştirilen program, depo içerisinde oluşan hidrodinamik basınç ve sıvı yüzeyi hareketinin zamana göre değişiminini analitik ifadelerden yararlanarak hesaplayabilmektedir. Buna ek olarak, parametrik olarak çalıştırıldığında sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerindeki değişiminin depo tasarım parametreleri üzerinde olan etkilerini grafikler aracılığıyla gösterebilme yeteneğine sahiptir.

Sıvı deposu tasarımında kullanılan ana parametreler, depo duvarında oluşan eğilme momenti, depo tabanında oluşan eğilme momenti, taban kesme kuvveti ve en büyük çalkalanma yüksekliğidir. Duvarda oluşan eğilme momenti ve taban kesme kuvveti, depo duvarının; tabanında oluşan eğilme momenti ise temelin boyutlandırılmasında kullanılmaktadır. En büyük çalkalanma yüksekliği ise serbest sıvı yüzeyi ile depo çatısı arasında bırakılması gereken boşluğun belirlenmesinde önemli role sahiptir. Bilgisayar programı tarafından üretilen grafiklerde depo tasarım parametrelerinin değerleri sabit tabanlı durum için elde edilen değerlere göre normalize edilmektedir. Bu sayede, sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin arttığı ya da azaldığı durumlar rahatlıkla görülebilmektedir.

- Bu çalışma kapsamında ele alınan sismik yalıtım sistemlerinin mekanik özelliklerinin değişiminin farklı geometrilere sahip depoların tasarım parametreleri üzerindeki etkileri parametrik olarak incelenmiştir. İlk aşamada, ele alınan sismik yalıtım sistemlerinin mekanik özelliklerini belirleyen ana parametreler ve değişim aralıkları belirlenmiştir. Daha sonra, çalkalanmaya neden olan devinimli kütlesinin toplam sıvı kütlesine oranı ve günümüzde sismik yalıtım sisteminin uygulandığı depo projeleri göz önünde bulundurularak, sıvı yüksekliğinin depo yarıçapına oranı 0.85, 2 ve 3 olan üç karakteristik depo geometrisi seçilmiştir. Analizlerde kullanılan 3 deprem ise kayıtların frekans içerikleri ile yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin en büyük değerleri doğrultusunda belirlenmiştir. Depremlerin sismik yalıtım sisteminin performansı üzerindeki etkilerinin kıyaslanabilmesi için kayıtların en büyük ivmeleri 0.40g’ye ölçeklenmiştir. En büyük ivmenin 0.20g ile 0.60g arasındaki değişiminin sürtünmeli sarkaç sistemi ve depo davranışı üzerindeki etkileri seçilen bir örnek depo üzerinde gösterilmiştir. Buna ek

olarak ölçeklenmemiş ivme kayıtlarının kullanıldığı analiz sonuçları Ek-E ve Ek-F’de özetlenmiştir.

Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar özet olarak aşağıda sunulmuştur:

- Sürtünmeli sarkaç sisteminin mekanik özelliklerini belirleyen ana parametreler, mesnet eğrilik yarıçapı ve kayma yüzeyinin sürtünme katsayısıdır.
- Sürtünmeli sarkaç mesnetlerin eğrilik yarıçapının artması, sismik yalıtımlı deponun periyodunun uzamasına ve dolayısıyla darbesel hidrodinamik etkilerin azalmasına sebep olmaktadır. Ancak eğrilik yarıçapındaki artışa bağlı hidrodinamik etkilerdeki azalmanın miktarı sürtünme katsayısına bağlı olarak değişmektedir. Sürtünme katsayısının 0.05’ten büyük değerlerinde tüm eğrilik yarıçapları için hidrodinamik etkilerde birbirine oldukça yakın azalma oranları elde edilmiştir. Bunun nedeni, artan sürtünmenin mesnet yer değiştirmelerini önemli ölçüde kısıtlamasıdır.
- Sürtünme katsayısının 0.03 - 0.05 arasındaki değerlerinde sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisinin en olumlu olduğu görülmektedir. Daha yüksek sürtünme değerleri için mesnetlerin hareket etme yeteneği azalmakta ve yapıya aktarılan kuvvetler artmaktadır. Sürtünme katsayısının 0.03’ten küçük olduğu mesnetlerde ise eğrilik yarıçapının artmasıyla mesnet yer değiştirmeleri önemli ölçüde artmaktadır. En büyük yer değiştirmesi değerinin artması da kullanılacak mesnet boyutlarının büyümesine ve sismik yalıtım sisteminin maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Buna ek olarak, kuvvetli rüzgarların etkisiyle deponun hareketinin kısıtlanması için özel önlemlerin de alınması gerekebilmektedir. Çok düşük sürtünmeli mesnetlerde, hidrodinamik etkilerdeki azalma oranı da devinimli bileşenin etkisinin artması nedeniyle daha düşük olmakta ve çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değer %250’sini aşabilmektedir.
- Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin sürtünme katsayısı, basınç, ortam sıcaklığı ve yükleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak, zamanla kayma yüzeyinde oluşabilecek kirlenme ya da korozyon gibi etmenler sürtünme katsayısının artmasına neden olabilmektedir. Analizlerde, sürtünme

katsayısının 0.05 ya da daha yüksek olması durumunda küçük sürtünme değişimlerinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ancak düşük sürtünmeli mesnetlerin kullanıldığı depolarda, tasarım parametrelerinin sürtünme değişimlerine oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, sürtünme katsayısındaki olası değişimin tasarım parametrelerinin üzerinde etkisinin tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.

- Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin kullanıldığı sıvı depolarında sismik yalıtım sistemi performansının depremin frekans içeriğinden etkilendiği görülmektedir. Ölçeklenmiş ivme kayıtları içerisinde Housner şiddeti en düşük olanı El Centro depremi ivme kaydı ve en büyük olanı ise Yarımca depremi ivme kaydıdır. Ölçeklenmemiş kayıtlar ile yapılan analizlerde de sismik yalıtım sisteminin tasarım parametrelerinde sağladığı en yüksek azalma oranı El Centro depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde ve en düşük azalma oranı ise Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde olmuştur. İvme kaydının en büyük hız ve en büyük yer değiştirmesi de depo davranışı üzerinde etkili olmaktadır. Özellikle, yakın fay etkisinin kuvvetli olarak hissedildiği Yarımca depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde, sismik yalıtım sisteminin depo tasarım parametreleri üzerinde önemli bir azalma yaratmadığı ve hatta bazı durumlarda daha kötü sonuçların alınmasına neden olduğu görülmüştür.
- El Centro ve Erzincan ivme kayıtlarının kullanıldığı analizlerde en büyük yer ivmesinin 0.2 g olması halinde çalkalanma yüksekliğinin sabit tabanlı durum için elde edilen değerle aynı olduğu görülmektedir. Ancak en büyük yer ivmesinin 0.4g ve 0.6g olması halinde çalkalanma yüksekliği sabit tabanlı durum için elde edilen değerden %20 mertebesinde fazla olmaktadır. Mesnet yer değiştirmelerinin artmasıyla, sürtünmeli sarkaç sisteminin etkili rijitliği azalmakta ve sismik yalıtımlı deponun titreşim periyodu uzamaktadır. Bu periyod uzaması sonucu devinimli bileşenin etkisi artmaktadır. Artan en büyük ivme değerleri için devinimli bileşenin etkisinin artışı, depo tasarım parametrelerindeki azalma oranlarında da görülmektedir. El Centro ve Erzincan kayıtlarının kullanıldığı analizlerde en büyük ivme değerinin 0.2 g'den 0.6 g'ye çıkmasıyla en büyük taban ivmesindeki azalma, depo

duvarında ve tabanında oluşan eğilme momentlerindeki azalmaya göre giderek daha yüksek olmaktadır.

- Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcıların mekanik özelliklerini belirleyen ana parametreler, akma kuvveti, akma sonrası rijitlik ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranıdır.
- Kurşun çekirdekli elastomer yalıtıcılarla taban ivmesinin en büyük değerlerinin, sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %5-10'u mertebesine indirilebildiği görülmektedir. Ancak taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarında depo geometrisine bağlı farklılıklar görülmektedir. Örnek olarak, Depo tip-1 için El Centro depremi ivme kaydının kullanılması durumunda taban ivmesi yer hareketi ivmesinin %10'una inmesine karşın depo duvarında oluşan eğilme momenti sabit tabanlı durum için elde edilen değer sadece %60'ına indirilebilmektedir. Buna ek olarak, çalkalanma yüksekliği de sabit tabanlı duruma göre 7 misli artmaktadır. Buradan, sadece taban ivmesine bağlı olarak performansın değerlendirilmesinin doğru olmadığı görülmektedir. Depo tabanı ivmesindeki azalma oranının, taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentlerindeki azalma oranlarına kıyasla yüksek olması, periyot uzaması etkisiyle uzun periyotlu devinimli bileşeninden kaynaklanan hidrodinamik basınçların artmasından kaynaklanmaktadır. Bu etki özellikle devinimli kütlelerin toplam sıvı kütlelerine olan oranının yüksek olduğu yayvan depolarda daha çok ortaya çıkmaktadır.
- Yarımcı depremi ivme kaydının kullanıldığı analizlerde taban ivmesinin en büyük değerinin sabit tabanlı durumda elde edilen değer yaklaşık %50 seviyesine indirilebilmesine karşın Depo tip-1 için taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momentlerinde önemli azalma görülmemektedir. Depo tip-2 ve Depo tip-3 için ise taban kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri sabit tabanlı duruma göre daha büyük olmaktadır. Dolayısıyla, yakın fay etkisiyle yüksek hız ve yer değiştirmelerin oluşabileceği bölgelerde sıvı depolarının kurşun çekirdekli elastomer mesnetler ile korunmasının olumsuz sonuçlar doğurabileceği sonucuna varılmıştır.
- Elastomer mesnetlerin içerisinde bulunan kurşun çekirdek, kuvvetli deprem hareketi sırasında yapıya iletilen enerjinin ısıya dönüştürülerek

sönümlenmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, kurşun çekirdeğin bir görevi de yapının rüzgar ve trafikten kaynaklanan titreşimler etkisinde hareket etmesini engellemektedir. Tasarımda, kurşun çekirdeğin akma kuvveti yapının ağırlığının bir yüzdesi olarak belirlenmektedir. Belirlenen akma kuvvetinin elde edilebilmesi için kurşun çekirdeklerin çapları arttırılmaktadır. Elastomer mesnetlerin içerisinde bulunan kurşun çekirdeklerin akma kuvvetlerinin arttırılmasının davranış üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla yapılan analizlerde yapı ağırlığının %5 ile %19'u arasındaki akma kuvvetleri göz önüne alınmıştır. Kurşun çekirdeğin akma kuvvetindeki artış, sismik yalıtım sistemi tarafından taban kesme kuvveti ve depoda oluşan eğilme momenti değerlerinde sağlanan azalma oranlarını önemli ölçüde etkilememektedir. Akma kuvvetinin artması en çok çalkalanma yüksekliği üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliğindeki değişime paralel olarak taban kesme kuvveti ve eğilme momenti azalma oranlarında düşük mertebelerde değişim gözlenmiştir.

- Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerden oluşan sismik yalıtım sisteminin akma sonrası yanal rijitliği, toplam depo kütlesi ve hedef yalıtım periyodu kullanılarak hesaplanmıştır. Kurşun çekirdekli mesnetlerin tasarımında elastik rijitlik, akma sonrası rijitliğin 8-10 katı olarak seçilmektedir. Ancak mesneden yanal hareketi sırasında kurşun çekirdek ısınmaktadır. Bu nedenle çekirdeğin rijitliği azalabilmektedir (Constantinou and Whittaker, 2004). Mesneden akma sonrası rijitliğinin büyük ölçüde elastomer katmanlar tarafından belirlenmesi nedeniyle sıcaklık artışından daha az etkilenmektedir. Mesneden elastik rijitliği hareket esnasında azalarak akma sonrası rijitliğin 5-6' da birine ineabilmektedir. Bu değişimin, davranışa olan etkilerinin incelenebilmesi için parametrik çalışmada akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının 0.10 ile 0.20 arasındaki değerleri kullanılmıştır. Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe olan oranının taban kesme kuvveti ve eğilme momentlerindeki değişime olan etkisinin önemsiz mertebede olduğu görülmektedir. Çalkalanma yüksekliğinin değişimine olan etkisi ise daha belirgin olmaktadır. Bu oranın en önemli etkisi mesnet yer değiştirmeleri üzerinde olmaktadır. Çoğu durumda akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe olan oranının 0.20 olması durumunda mesnet yer değiştirmelerinin en yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, kurşun çekirdeğin ısınması sonucu mesnet yer değiştirmelerinin

artabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. En büyük mesnet yer değiştirmesinin hesaplanmasında bu oranın büyük alınması tasarımdaki güvenlik seviyesini arttıracaktır.

Genel olarak:

- Sismik yalıtım bileşenlerinin doğrusal olmayan davranışı, mekanik özelliklerinin çevre koşulları nedeniyle zaman içerisinde değişimi ve depo içerisindeki devinimli harekete etkisi, gerek depo ve gerekse sismik yalıtım sisteminin tasarımını zorlaştırmaktadır.
- Ön tasarım aşamasında, deponun inşa edileceği alanın çevre koşulları (ortam sıcaklığı, korozyonu hızlandıracak etmenler..vb.) ve deponun hizmet süresi göz önünde bulundurularak sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerini belirleyen parametrelerin değişim sınırlarının tespit edilmesi ve bu çalışmada gösterildiği şekilde söz konusu sınırlar içerisinde yapılacak parametrik çalışma ile hidrodinamik etkilerdeki değişim oranlarının sabit tabanlı durumda elde edilen değerlere göre normalize edildiği grafikler yardımıyla sunulması sismik yalıtım bileşenlerinin boyutlandırılmasını ve depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentlerinin belirlenmesini önemli ölçüde kolaylaştıracaktır. Başka bir önemli konu da, analizlerde kullanılacak ivme kayıtlarıdır. Deprem hareketinin frekans içeriği, en büyük hız ve en büyük yer değiştirme değerleri depo davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, sıvı deposunun inşa edileceği bölgeye uygun ivme kayıtlarının türetilmesi ve analizlerin bu kayıtlarla yapılması daha gerçekçi sonuçlar verecektir.
- Sismik yalıtım sistemi parametrelerinin belirlenmesinde, depo tasarım kuvvet ve eğilme momentlerindeki azalma oranlarına ek olarak mesnet yer değiştirmeleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Zira, büyük mesnet yer değiştirmeleri sismik yalıtımı bileşenlerini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Yapılan çalışma aşağıdaki yönlerde genişletilebilir:

- Mevcut çalışmada rijit duvarlı ve silindirik geometriye sahip olan depo içerisindeki sıvının viskozitesinin ve sıkıştırılabilirliğinin etkileri ihmal edilmiştir. Buna ek olarak, sıvı yoğunluğunun sıvı yüksekliği boyunca sabit olduğu ve akışın çevrintisiz olduğu varsayımları yapılmıştır. Kullanılan sıvı

modelinin, viskoziteyi, sıkıştırılabilirliği ve depo-sıvı etkileşimini göz önüne alacak şekilde genişletilmesi elde edilen sonuçların daha gerçekçi olmasını sağlayacaktır. Modelin yoğunluğun sıvı yüksekliği boyunca değişebilecek şekilde düzenlenmesi radyoaktif atık gibi üniform olmayan yoğunlukta sıvıları saklamakta kullanılacak olan depolarda kullanılabilmesini sağlayacaktır. Benzer şekilde, değişik depo geometrileri için sıvı modellerinin geliştirilmesi kullanım alanını genişletecektir.

- Depo duvarında oluşan gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin zamana göre değişimini incelemeye izin verecek boyutlarda sismik yalıtımlı bir depo modelinin sarsma tablası üzerinde deneysel olarak incelenmesi mevcut modellerin ürettiği sonuçların doğrulanmasında yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO**, 1999. Guide specifications for seismic isolation design, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- Abramson, H.N.**, 1966. The dynamic behaviour of liquid in moving containers, *NASA Report SP-106*, National Aeronautics and Space Administration.
- ACI 350**, 2001. Code requirements for environmental engineering concrete structures , American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA.
- ACI 350.3**, 2001. Seismic design of liquid containing concrete structures, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA.
- ACI 650**, 1998. Welded storage tanks for oil storage, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA.
- ACI 371-98**, 1998. Guide for the analysis, design and construction of concrete-pedestal water towers, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, USA.
- Aiken, I.D.**, 1998. Testing of seismic isolators and dampers – Considerations and limitations, *Proceedings of Structural Engineering World Congress*, San Francisco, California, USA, July 18-23.
- Almazan, J.L., De La Llera, J.C., and Inaudi, J.A.**, 1998. Modeling aspects of structures isolated with the friction pendulum system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 845–867.
- API 650**, 1998. Welded steel tanks for oil storage, American Petroleum Institute, Washington D.C., USA.
- AWWA D100-96**, 1996. Welded steel tanks for water storage, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.
- AWWA D103**, 1997. Factory-coated bolted steel tanks for water storage, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.
- AWWA D110**, 1995. Wire and strand-wound circular, prestressed concrete water tanks, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.

- AWWA D115**, 1995. Circular, prestressed concrete water tanks with circumferential tendons, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Hasgür, Z., Taşkın, B.**, 1999. A Site Investigation of Kocaeli Earthquake of August 17, 1999, *Turkish Earthquake Foundation, Earthquake Report, TDV-DR08-49*, 180pp, Istanbul.
- Bachmann, H., and Wenk, T.**, 2000. Softening instead of strengthening for seismic rehabilitation, *Structural Engineering International, IABSE*, **10**, 1-9.
- Bachmann, H.**, 2002. Seismic conceptual design of buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners and authorities, Federal Office for Water and Geology, BWG, Vertrieb Publikationen, Bern, Switzerland.
- Berz, G.**, 1988. List of Major Natural Disasters, 1960-1987, *Natural Hazards*, Vol. 1, pp. 97-99.
- Bouc, R.**, 1967. Forced vibrations of mechanical systems with hysteresis, *Proceedings of the 4th Conference on Nonlinear Oscillation*, Prague, Czechoslovakia, p.315 (Abstract).
- Buckle, I.G., and Mayes, R.L.**, 1990. Seismic Isolation: History, Application, and Performance-A World View. *Earthquake Spectra*, **6**(2), 161-201.
- CERF 40365**, 1998. Evaluation findings for Tekton inc. steel rubber bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40365*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40365**, 1998. Evaluation findings for Tekton inc. steel rubber bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40365*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40366**, 1998. Evaluation findings for Tekton inc. roller bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40366*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40368**, 1998. Evaluation findings for FIP energy absorption systems, L.C.C. slider bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40368*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40368**, 1998. Evaluation findings for R.J. Watson inc. sliding isolation bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40368*, American Society of Civil Engineers (ASCE).

- CERF 40369**, 1998. Evaluation findings for Dynamic Isolation Systems inc. elastomeric bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40369*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40370**, 1998. Evaluation findings for Earthquake Protection Systems inc. friction pendulum bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40370*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40373**, 1998. Evaluation findings for Scougal Rubber Corporation, high damping rubber bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40373*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40376**, 1998. Evaluation findings for Skellerup base isolation elastomeric bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40376*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40576**, 2001. Evaluation findings for Seismic energy products, L.P. elastomeric isolation bearings, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40576*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- CERF 40600**, 2002. Guidelines for testing large seismic isolator and energy dissipation devices, *Civil Engineering Research Foundation Report No.40600*, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Chalhoub, M.S., and Kelly, J.M.**, 1988. Theoretical and experimental studies of cylindrical water tanks in base isolated structures, *Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/07*, College of Engineering, University of California at Berkeley.
- Chalhoub, M.S., and Kelly, J.M.**, 1990. Shake table test of cylindrical water tanks in base isolated structures, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **116**, 1451-1472.
- Chopra, A.K.**, 1995. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering, Prentice-Hall, New Jersey.
- Constantinou, M.C., Mokha, A., and Reinhorn, A.M.**, 1990. Teflon bearings in base isolation II: Modelling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**, 455–474.
- Constantinou, M. C., and Symans, M.D.**, 1992. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers, Report **NCEER-92-0032**, State University of New York at Buffalo, New York.

- Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., and Wolff, E.,** 1999. Property modification factors for seismic isolation bearings, Report **MCEER-99-0012**, State University of New York at Buffalo, New York.
- Constantinou, M.C., and Whittaker, A.,** 2004. Seismic Isolation, *İKÜ-MCEER Sismik İzolasyon Sertifika Programı Kurs Notları, İstanbul Kültür Üniversitesi*, Mayıs 24-25.
- Constantinou, M.C.,** 2005. Kişisel Görüşme.
- Dusi, A.,** 2003. Application of Seismic Isolation in Italy, *İKÜ-Malaysian Rubber Board Sismik izolasyon konferansı notları, İstanbul Kültür Üniversitesi*, Aralık 18.
- El-Zeiny, A.A.,** 1995. Nonlinear time-dependent seismic response of unanchored liquid storage tanks, *PhD Dissertation*, University of California, Irvine, CA.
- Erdik, M.,** 2000. 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes, *Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute Department of Earthquake Engineering Report no: 2000-12*, Bogazici University, Istanbul.
- Eurocode 8,** 1998. Design provisions of earthquake resistance of structures, Part 4: Silos, tanks and pipelines. European Committee for Standardization, Brussels.
- FEMA 368,** 2000. NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences, USA.
- Filiatrault, A.,** 2001. Advanced seismic design of structures class notes, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, USA.
- Gündüz, A.N.,** 1988. Akışkan yüklü plakların bağlaşıklık titreşimi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hamada, M.,** 1999. The 1999 Kocaeli earthquake, Turkey: investigation into damage to civil engineering structures, *Reconnaissance Team Report*, Japanese Society of Civil Engineers.
- Hamdan, F.H.,** 2000. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks, *Journal of Constructional Steel Research*, **53**, 307-333.
- Haroun, M.A, and Housner, G.W.,** 1981. Seismic design of liquid-storage tanks, *Journal of Technical Councils, ASCE*, **107**, 191-207.

- Haroun, M.A., and Housner, G.W.,** 1982. Dynamic characteristics of liquid storage tanks, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **108**, 783-800.
- Haroun, M.A.,** 1983. Behavior of unanchored oil storage tanks: Imperial Valley earthquake, *Journal of Technical Councils of ASCE*, **109**(1), 23-40.
- Haskell, G., and Lee, D.,** 1997. Use of viscous dampers for building structures, *ASME Pressure Vessels Piping Div. Publ. PVP*, **357**, 79-83.
- Hornig, K.H., Flowers, G.T., and Horvath, R.,** 2002. Testing of seismic isolators and dampers – Considerations and limitations, *Proceedings of 9th International Conference on Sound and Vibration*, Orlando, Florida, USA, July 8-11.
- Housner, G.W.,** 1957. The dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bulletin of Seismological Society of America*, **47**(1), 15-39.
- Housner, G.W.,** 1963. The dynamic behavior of water tanks, *Bulletin of Seismological Society of America*, **53**, 381-387.
- IBC 2003,** 2003. International Building Code, International Code Council, Falls Church, Virginia, USA.
- Jadhav, M.B., and Jangid, R.S.,** 2004a. Earthquake response of liquid storage tanks with sliding systems, *JSEE: Summer and Fall*, **4**, 33-45.
- Jadhav, M.B., and Jangid, R.S.,** 2004b. Response of base isolated liquid storage tanks, *Shock and Vibration*, **11**(1), 33-45.
- Jaiswal, O.R., Rai, D.C., and Jain, S.K.,** 2004. Review of code provisions on seismic analysis of liquid storage tanks, Report No. **IITK-GSDMA-EQ-04-V1.0**, Indian Institute of Technology Kanpur, India.
- Jennings, P.E.,** 1971, Engineering Features of the San Fernando Earthquake, **EERI-71-02**, pp. 434-470, California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- Kelly, J.M.,** 1997. Earthquake resistant design with rubber, Springer-Verlag, New York.
- Kelly, J.M.,** 2004. “Base Isolation: Origins and Development”. National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE) Website. 25 March, 2004.
- Kelly, T.E.,** 2001. Base isolation of structures design guidelines, Holmes Consulting Group, Wellington, New Zealand.

- Kim, N.S., and Lee, D.G.,** 1995. Pseudo-dynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks., *Engineering Structures*, **17**, 198-208.
- Koh, H.M., Kim, J.K., Park, J.H., and Kim, S.J.,** 1996. Recent research on seismic isolation considering fluid-structure effects in Korea, *Seismic, Shock and Vibration Isolation, ASME PVP*, **341**, 47-54.
- Konstantinidis, D.,** 2005. Earthquake hazard mitigation course notes, Department of Structural Engineering, University of California, Berkeley, USA.
- Kreyszig, E.,** 1998. Advanced engineering mathematics, Eighth edition, Wiley, New Jersey.
- Lau, D.T., Tang, A., and Pierre, J.,** 1995. Performance of lifelines during the 1994 Northridge Earthquake, *Canadian Journal of Civil Engineering*, **22**, 438-451.
- Liu, H., Schubert, D.H., Yang, Z., and Lang, R.,** 1996. Comparative study of linear-elastic and nonlinear-inelastic seismic responses of fluid-depo systems, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, August 1-6.
- Malhotra, P.K., and Veletsos, A.S.,**1994. Uplifting response of unanchored liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **120**, Issue 12, pp. 3525-3547.
- Malhotra, P.K.,** 1997a. Method for seismic base isolation of liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **123**, 113-116.
- Malhotra, P.K.,** 1997b. New method for seismic isolation of liquid storage tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, 839-847.
- Malhotra, P.K.,** 1998. Seismic strengthening of liquid storage tanks with energy-dissipating anchors, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**, 405-414.
- Malhotra, P.K., Wenk, T., and Wieland, M.,** 2000. Simple Procedure for seismic analysis of liquid storage tanks, *Structural Engineering International, IABSE*, **10**, 197-201.
- Malhotra, P.K.,** 2000. Practical nonlinear seismic analysis of tanks, *Earthquake Spectra*, **16**, 473-492.

- Manos, G.C.**, 1991. Evaluation of the earthquake performance of anchored wine tanks during the San Juan Argentina 1977 Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **20**, 1099-1114.
- Martelli, A.**, 2006. Modern seismic protection systems for civil and industrial structures, *Proceedings of the 14th SAMCO Workshop*, SAMCO, Dübendorf, Switzerland, March 30-31.
- Mokha, A., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M.**, 1990. Teflon bearings in base isolation I: Testing. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**, 438–455.
- Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., and Zayas, V.A.**, 1991. Experimental study of friction pendulum isolation system, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **117**, 1201–1217.
- Mosqueda, G., Whittaker, A.S., and Fenves, G.L.**, 2004. Characterization and Modeling of Friction Pendulum Bearings Subjected to Multiple Components of Excitation Experimental study of friction pendulum isolation system, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **130**, 433–442.
- Myers, P.E.**, 1997. Aboveground storage tanks, 690 pages, McGraw Hill, New York.
- Naeim, F., and Kelly, J.M.**, 1999. Design of seismic isolated structures: From theory to practice, Wiley, New York.
- Nielsen, R., and Kiremidjian, A.S.**, 1986. Damage to Oil Refineries from Major Earthquakes, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, pp. 1481-1491.
- Niwa, A. and Clough, R.W.**, 1982. Buckling of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Loading, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, pp. 107-122, 1982.
- NZS 3106**, 1986. Code of practice for concrete structures for the storage of liquids, Standards Association of New Zealand, Wellington, New Zealand.
- NZS 4203**, 1992. Code of practice for general structural design and design loading for buildings, Standards Association of New Zealand, Wellington, New Zealand.
- Park, Y. J., Wen, Y.K., and Ang, A.H.S.**, 1986. Random vibration of hysteretic systems under bidirectional ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 543–557.

- Park, K. S., Jung, H., Yoon, W., and Lee, I.,** 2006. Robust analysis of a hybrid system controlled by a μ -synthesis method, *Proceedings of the 3rd International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technologies (ASCRISST)*, Lake Tahoe, USA, May 29-30.
- Rammerstoffer, F.G., Scharf, K., and Fischer F.D.,** 1990. Storage tanks under earthquake loading, *ASME Applied Mechanics Review*, **43(11)**, 261–282.
- Reinhorn, A.M. and Constantinou, M. C.,** 1995. Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental damping, part 1-fluid viscous devices, Report **NCEER-95-0001**, State University of New York at Buffalo, New York.
- Robinson, W.H.,** 1982. Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **10**, 593–604.
- Rosenblueth, E., and Newmark, N.M.,** 1971. Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey.
- Sain, M.P., Sain, M.K., Spencer, B.F., and Sain, J.D.,** 1998. The Bouc hysteresis: An initial study of qualitative characteristics, *Proceedings of the American Control Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, USA, June 14-19.
- Scheller, J., and Constantinou, M. C.,**1999. Response history analysis of structures with seismic isolation and energy dissipation systems: Verification examples for program SAP2000, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Technical Report, **MCEER-99-0002**, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, New York.
- Sezen, H., and Whittaker, A.S.,** 2006. Seismic Performance of Industrial Facilities Affected by 1999 Turkey Earthquake, *Journal of Performance of Constructed Facilities* , **20(1)**, 28–36.
- Shenton III, H.W., and Hampton, F.P.,** 1999. Seismic response of isolated elevated water tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **125**, 965-976.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S.,** 2002a. Earthquake response of liquid storage tanks with sliding systems, *Journal of Structural and Earthquake Engineering*, **4**, 51-61.

- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2002b.** A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks, *International Journal of Structural Stability and Dynamics* **2**, 573–591.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2002c.** Seismic response of liquid storage tanks by sliding systems, *Engineering Structures*, **24**(7), 909-921.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2002d.** Non-linear seismic response of base-isolated liquid storage tanks to bi-directional excitation, *Nuclear Engineering and Design*, **217**(1-2), 1-20.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2002e.** Earthquake response of liquid storage tanks with sliding systems, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **4**(2-3), 51-61.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2003a.** Seismic response of base isolated liquid storage tanks, *Journal of Vibration and Control*, **9**, 1201-1218.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2003b.** Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks, *Journal of Constructional Steel Research*, **59**(10), 1267-1288.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2003c.** The seismic response of elevated liquid storage tanks isolated by lead-rubber bearings, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **36**(3), 141-164.
- Shirmali, M.K., and Jangid, R.S., 2003d.** Dynamic analysis of liquid storage tanks with sliding systems, *Advances in Structural Engineering*, **6**(2), 145-158.
- Shenton III, H.W., and Hampton, F.P., 1997.** Seismic response of isolated elevated water tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **125**, 965-976.
- Simo, J.C., and Hughes, T.J.R., 1998.** Computational inelasticity, Springer, New York.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., 1993.** An introduction to seismic isolation, Wiley, Chichester, England.
- Steinbrugge, K.V., and Rodrigo, E.A., 1963.** The Chilean earthquake of May 1960: A structural engineering viewpoint, *Bulletin of Seismological Society of America*, **1**(53), 225-307.

- Soong, T.C., and Constantinou, M.C.,** 1994. Passive and Active Structural Control in Structural Engineering, CISM Courses and Lectures No.345, Springer-Verlag, Wien, New York.
- Soong, T.C., and Dargush, G.F.,** 1997. Passive energy dissipation systems in structural engineering, John Wiley & Sons, Chichester.
- Tajirian, F.F.,** 1998. Base isolation design for civil components and civil structures, *Proceedings of the Structural Engineering World Congress*, San Francisco, California, USA, July 18-23.
- Tsopelas, P.C., Nagarajaiah, S., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M.,** 1994. Nonlinear Dynamic Analysis of Multiple Building Base Isolated Structures, *Computers and Structures*, **50**, 47-57.
- Tsopelas, P.C., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M.,** 1994. 3DBASIS-ME: Computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically isolated single and multiple structures and liquid storage tanks, *National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report, NCEER-94-0010*, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, New York.
- Tsopelas, P.C., Roussis, P.C., Constantinou, M.C., Buchanan, R., and Reinhorn, A.M.,** 1994. 3DBASIS-ME-MB: Computer program for nonlinear dynamic analysis of seismically structures, *National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report, MCEER-05-0009*, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, New York.
- Veletsos, A.S.,** 1984. Seismic response and design of liquid storage tanks, *Proceedings of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems*, ASCE, New York, 255-370 and 443-461.
- Veletsos, A.S., and Tang, Y.,** 1992. Dynamic response of flexibly supported liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **118**, 264-283.
- Wen, Y.K.,** 1976. Method of random vibration of hysteretic system, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **102**, 249-263.
- Whittaker, A.,** 2003. Seismic protective systems, *İKÜ-SUNY Sismik izolasyon konferansı notları, İstanbul Kültür Üniversitesi*, Mayıs 16-17.

- Whittaker, D., and Jury, R.D.,** 2000. Seismic design loads for storage tanks, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, January 30-February 4.
- Wozniak, R.S., and Mitchell, W.W.,** 1978. Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks, *Sessions on Advances in Storage Depo Design*, American Petroleum Institute, Washington, USA.
- Wyllie, L.A., Bolt, B., Durkin, M.E., Gates, J.H., McCormick, D., Smith, P.D., Abrahamson, N., Castro, G., Escalante, L., Luft, R., Olson, R.S. and Vallenias, J.,** 1986. The Chile Earthquake of March 3, 1985, *Earthquake Spectra*, 2(2), Chapter 5, pp. 373-409.
- Yang, J.Y.,** 1976. Dynamic behavior of fluid-depo systems, PhD Thesis, Rice University, Houston, Texas, USA.
- Yazıcı, G., ve Çılı, F.,** 2005. Silindirik depoların sismik yalıtım yöntemiyle depremten korunması, *Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu*, Mart 2005.
- Zayas, V.A., Low, D.S., and Mahin, S.A.,** 1987. The FPS earthquake resisting system, *Earthquake Engineering Research Center Technical Report, UCB/EERC-87/01*, University of California at Berkeley, Berkeley, California.
- Zayas, V.A., Low, D.S., and Mahin, S.A.,** 1990. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, *Earthquake Spectra*, 6, 317-314.
- Zayas, V.A., and Low, D.S.,** 1995. Application of seismic isolation to industrial tanks, *Proceedings of the ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, July 23-27, 273-284.

EKLER

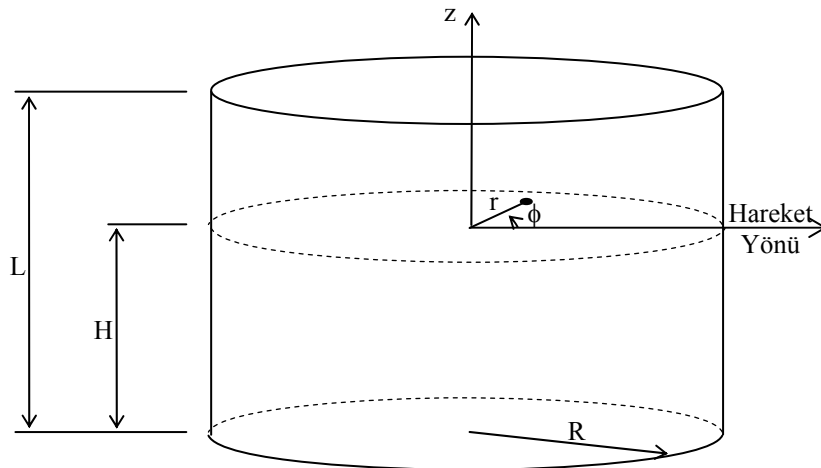
EK A. TABAN HAREKETİ ALTINDA RİJİT DUVARLI DEPOLARDA SIVI DAVRANIŞI

A. TABAN HAREKETİ ALTINDA RİJİT DUVARLI DEPOLARDA SIVI DAVRANIŞI

A.1. Taban Hareketi Altında Rijit Duvarlı Depolarda Sıvı Davranışının Modellenmesi

Bu bölümde, rijit duvarlı silindir depoların duvarlarında oluşan hidrodinamik basıncı ve sıvı yüzeyinin hareketini veren analitik ifadelerin elde edilmesi, Chalhoub ve Kelly tarafından öne sürülen çözüm izlenerek gösterilmiştir (Chalhoub ve Kelly, 1988), (Chalhoub ve Kelly, 1990).

Söz konusu çözümde, R yarıçapında, H yüksekliğinde ve h yüksekliğine kadar ρ_l yoğunluğunda bir sıvıyla dolu olan ve zamana bağlı $v_g(t)$ yatay taban hareketine maruz kalan rijit duvarlı bir silindir depo ele alınmıştır. Sıvı deposunun geometrisi ve çözümde kullanılan koordinat sistemi Şekil A.1’de gösterilmiştir. Sıvı partiküllerinin r , ϕ ve z yönlerindeki hızları sırasıyla u , v ve w ile ifade edilmiştir. Hareket denklemlerinin çıkarılmasında sıvının viskos olmadığı ve sıvı akımının çevrintisiz olduğu kabul edilmiştir.



Şekil A.1. Silindirik sıvı deposunun geometrisi ve koordinat sistemi
(Chalhoub ve Kelly, 1990)

Viskositenin ihmal edilmesi durumunda, sıvı partiküllerin hareketi (A.1)'de verilen Euler denklemleri ile tanımlanabilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{\partial F}{\partial r} \quad (\text{A.1.a})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{vu}{r} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial \phi} - \frac{\partial F}{\partial \phi} \quad (\text{A.1.b})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \phi} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial F}{\partial z} \quad (\text{A.1.c})$$

Bu denklemlerde, P toplam sıvı basıncını ve F dış kuvvet potansiyelini temsil etmektedir. Çevrintisiz akış durumu için sistemin sınır koşulları (A.2)'de kutupsal koordinatlarla gösterilmiştir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \phi} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.2a})$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad (\text{A.2b})$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} - \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \phi} = 0 \quad (\text{A.2c})$$

Sıvı partiküllerinin hız vektörü $\vec{V}$ ile gösterilirse çevrintisiz akış durumu için $\text{curl} \vec{V} = 0$ 'dır. Buna ek olarak, hız potansiyelini tanımlamakta kullanılabilecek ve $\vec{\nabla} \Omega = \vec{V}$ ifadesini sağlayacak bir $\Omega(r, \phi, z, t)$ skaler fonksiyonu vardır. Sıvı partiküllerinin hız bileşenleri, bu skaler fonksiyon aracılığıyla (A.3) ifadesinde verilmiştir.

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial r} = u \quad (\text{A.3a})$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial \Omega}{\partial \phi} = v \quad (\text{A.3b})$$

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial z} = w \quad (\text{A.3c})$$

(A.2a.,A.2b, A.2c) ve (A.3a.,A.3b, A.3c) ifadeleri (A.1a.,A.1b, A.1c) ifadelerine yerleştirilir ve sırasıyla r , ϕ ve z 'ye göre integre edilirse (A.4a, A.4b, A.4c) ifadeleri elde edilir.

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + F + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = G(\phi, z, t) \quad (\text{A.4a})$$

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + F + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = H(r, z, t) \quad (\text{A.4b})$$

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + F + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = L(r, \phi, t) \quad (\text{A.4c})$$

Yukarıdaki ifadelerde G , H ve L rastgele seçilmiş fonksiyonlardır. İfadelerin sol taraflarının aynı olması ve r , ϕ ve z 'nin bağımsız değişkenler olması nedeniyle sağ tarafta bulunan rastgele G , H ve L fonksiyonları sadece zamana bağlı bir $G(t)$ fonksiyonu ile gösterilebilir. Bu durumda, (A.4) ifadeleri (A.5)'te verilen Bernoulli denkleminde indirgenebilir.

$$-\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{P}{\rho_l} + F + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) = G(t) \quad (\text{A.5})$$

$G(t) = \Omega + \frac{df(t)}{d(t)}$ koşulunu sağlayan bir $f(t)$ fonksiyonu tanımlanır ve (A.5) ifadesine yerleştirilirse $\Theta = \Omega + f(t)$ olan yeni bir hız potansiyeli fonksiyonu elde edilir. Bu durumda toplam sıvı basıncı $P(r, \phi, z, t)$, (A.6) denklemi ile ifade edilebilir.

$$P(r, \phi, z, t) = \rho_l \left[\frac{\partial \Theta}{\partial t} - \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) - F \right] \quad (\text{A.6})$$

Sıvı partikül hızlarının karelerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilirse toplam sıvı basıncı (A.7) ifadesine indirgenebilir.

$$P(r, \phi, z, t) = \rho_l \left[\frac{\partial \Theta}{\partial t} - F \right] \quad (\text{A.7})$$

Sıvıya etkiyen tek bünve kuvveti yerçekimidir. Bu durumda, dış kuvvet terimi F yerine $-gz$ yerleştirilebilir (A.8). Burada, g yerçekimi ivmesini belirtmektedir.

$$P(r, \phi, z, t) = \rho_l \left[\frac{\partial \Theta}{\partial t} + gz \right] \quad (\text{A.8})$$

Yukarıdaki toplam basınç ifadesinde, ilk terim hidrodinamik bileşeni ikinci terim ise hidrostatik bileşeni temsil etmektedir.

Hız potansiyelinin tanımından yararlanarak (A.3) ifadesinde verilen hız bileşenlerinin yeniden yazılmasıyla (A.9) ifadeleri elde edilir.

$$-\frac{\partial \Theta}{\partial r} = u \quad (\text{A.9a})$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} = v \quad (\text{A.9b})$$

$$-\frac{\partial \Theta}{\partial z} = w \quad (\text{A.9c})$$

Sıvı yoğunluğunun değişmediği kabul edilirse, süreklilik denklemi silindirik koordinatlarda (A.10) ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.10})$$

(A.9a, A.9b, A.9c) ifadeleri (A.10) ifadesine yerleştirildiğinde, hız potansiyeli fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılacak Laplace denklemi (A.11) elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.11})$$

Serbest yüzeyde, basınç bütün noktalarda sabittir. Bu koşul, toplam basıncın zamana göre türevinin $z = 0$ düzleminde sıfıra eşitlenmesiyle elde edilen (A.12) denkleminde gösterilmiştir.

$$\frac{DP}{Dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} + w \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (\text{A.12})$$

Serbest yüzeydeki yer değiştirmeleri temsil eden $\eta(r, \phi, z, t)$ fonksiyonu $z = \eta$ ’de (A.12) ifadesini sağlamalıdır. Ancak bu çözümde, (A.12) koşulunun $z = 0$ ’da sağlandığı kabulü yapılmıştır. (A.12) ifadesi, (A.11)’de tanımlanan Laplace denkleminde yerleştirilmesiyle elde edilen serbest yüzeydeki sınır koşulu (A.13) ile gösterilmiştir.

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0 \quad (z = 0) \quad (\text{A.13})$$

Depo tabanında sıvı partiküllerinin düşey yönde hızı sıfırdır. Bundan yararlanılarak depo tabanındaki ($z=-H$) sınır koşulu (A.14) denkleminde ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0 \quad (z = -H) \quad (\text{A.14})$$

Sıvı-depo arayüzünde, sıvı ve depo duvarı aynı hıza sahip olmalıdır. Depo duvarının şekil değiştirmedeği kabul edilirse, x yönündeki yer değiştirmesi, yer hareketi $v_g(t)$ ile gösterilebilir. Depo duvarının r doğrultusundaki hızı $\dot{v}_g(t) \cos \phi$ ’dir. Sıvı-depo arayüzündeki ($r=R$), sınır koşulu (A.15)’de verilmiştir.

$$u = \frac{\partial \Theta}{\partial r} = \dot{v}_g(t) \cos \phi \quad (r = R) \quad (\text{A.15})$$

(A.11) denklemi değişkenlerin ayrılması yöntemiyle çözülebilir. Hız potansiyeli Θ , herhangi bir t anında r, ϕ ve z’ye bağlı üç fonksiyonunun çarpımı olarak ifade edilirse (A.16) elde edilmektedir.

$$\Theta(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z) \quad (\text{A.16})$$

Bu ifade (A.11) denkleminde yerleştirilir ve $R\Phi Z$ ’ye bölünürse, (A.17) elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\Phi \partial \phi^2} = -r^2 \frac{\partial^2 Z}{Z \partial z^2} - r^2 \frac{\partial^2 R}{R \partial r^2} - r \frac{\partial R}{R \partial r} \quad (\text{A.17})$$

Yukarıdaki ifadede, Φ ’nin sadece ϕ ’ye bağlı olarak değiştiği ve R ile Z’nin ϕ ’den bağımsız değişmesinden dolayı, $\frac{\partial^2 \Phi}{\Phi \partial \phi^2}$ ‘nin değeri bir sabit ile ifade edilebilir. Bu

sabitin işaretinin belirlenebilmesi için $\Phi(0) = \Phi(2\pi)$ koşulu kullanılabilir. Buradan, Φ 'nin trigonometrik fonksiyonların bir kombinasyonu olduğu görülebilir. Bu durumda, söz konusu sabitin işareti negatif olacaktır. (A.17) ifadesi bu sabit kullanılarak yeniden yazılırsa (A.18) elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\Phi \partial \phi^2} = -k^2 \quad (\text{A.18})$$

Bu ifadenin çözümü, (A.19)'da verilmiştir.

$$\Phi(\phi) = K_1 \cos k\phi + K_2 \sin k\phi \quad (\text{A.19})$$

Burada K_1 ve K_2 rastgele sabitlerdir ve $\Phi(\phi)$ sabit olamayacağından dolayı k sıfırdan farklıdır. (A.18), (A.17)'de yerine yerleştirilirse, Z 'yi barındıran terim bir n sabiti ile ifade edilebilir (A.20).

$$\frac{\partial^2 Z}{Z \partial z^2} = \frac{k^2}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial R}{R \partial r} - \frac{\partial^2 R}{R \partial r^2} = n^2 \quad (\text{A.20})$$

Yukarıdaki ifadede, $n=0$ olması durumunda Z 'nin çözümü (A.21)'de verilmiştir.

$$Z_o = K_3 z + K_4 \quad (\text{A.21})$$

Bu ifadede K_3 ve K_4 rastgele değişkenlerdir. R ifadesi $n=0$ için yeniden yazılmasıyla (A.22) elde edilir.

$$r \frac{\partial R}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} - k^2 R = 0 \quad (\text{A.22})$$

Bu ifadenin genel çözümü $R(r)=r^m$ 'dir. $R(r)=r^m$, yukarıdaki ifadeye yerleştirilir ve m için çözüm yapılır, $m = \pm k$ olarak elde edilir. Bu durumda, R ifadesi (A.23)'teki hali alır.

$$R = K_5 r^k + K_6 r^{-k} \quad (\text{A.23})$$

$n \neq 0$ olması durumunda, (A.20) ifadesinin $Z(z)$ cinsinden çözümü (A.24)'de verilmiştir.

$$Z(z) = K_7 \cosh(nz) + K_8 \sinh(nz) \quad (\text{A.24})$$

R(r) ifadesi, k.nci dereceden ve n parametrelili bir Bessel denklemidir (A.25).

$$r^2 \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + r \frac{\partial R}{\partial r} + (n^2 r^2 - k^2) R = 0 \quad (\text{A.25})$$

(A.25) ifadesinin genel çözümü, (A.26)'da verilmiştir.

$$R(r) = K_9 J_k(nr) + K_{10} Y_k(nr) \quad (\text{A.26})$$

Silindirin merkezinde ($r = 0$), hız potansiyelinin sonlu olacağından dolayı $K_{10} \equiv 0$ kabulü yapılabilir.

Hız potansiyeli ifadesinin genel çözümü, (A.27) ile gösterilebilir.

$$\Theta = \Theta_0 + \Theta_n \quad (\text{A.27})$$

Burada, Θ_0 ve Θ_n , sırasıyla $n=0$ ve $n \neq 0$ durumlarını temsil etmektedir. Θ_0 ve Θ_n ifadelerinin açılmış halleri sırasıyla (A.28a) ve (A.28b) ifadelerinde verilmiştir.

$$\Theta_0(r, \phi, z) = (K_1 \cos k\phi + K_2 \sin k\phi)(K_3 z + K_4)(K_5 r^k + K_6 r^{-k}) \quad (\text{A.28a})$$

$$\Theta_n(r, \phi, z) = (K_1 \cos k\phi + K_2 \sin k\phi)(K_7 \cosh(nz) + K_8 \sinh(nz))(K_9 J_k(nr)) \quad (\text{A.28b})$$

Sıvı-depo arayüzündeki (A.15) ile verilen sınır koşulu doğrultusunda, Θ_0 ve Θ_n çözümlerinin (A.29a) ve (A.29b) ifadelerini sağlaması gerekmektedir.

$$(K_1 \cos k\phi + K_2 \sin k\phi)(K_3 z + K_4)(K_5 k R_o^{k-1} + K_6 k R_o^{-k-1}) = \dot{v}_g(t) \cos \phi \quad (\text{A.29a})$$

$$(K_1 \cos k\phi + K_2 \sin k\phi)(K_3 \cosh(nz) + K_4 \sinh(nz))K_9 J'_k(nR_o) = 0 \quad (\text{A.29b})$$

(A.29a) ifadesindeki katsayılar incelendiğinde (A.30a), (A.30b) ve (A.31) elde edilir.

$$k=1, K_2=K_3=K_6=0, \quad (\text{A.30a})$$

$$K_1 K_4 K_5 = \dot{v}_g(t) \quad (\text{A.30b})$$

$$\Theta_o = \dot{v}_g(t) r \cos \phi \quad (\text{A.31})$$

Elde edilen katsayılar, (A.29b) ifadesine yerleştirilmesiyle (A.32) elde edilmektedir.

$$(K_1 \cos \phi)(K_4 \sinh(nz))K_9 J_1'(nR) = 0 \quad (\text{A.32})$$

Bundan dolayı,

$$J_1'(nR) = 0 \quad (\text{A.33})$$

Yukarıdaki denklemin sonsuz tane gerçek kökü vardır. Parantez içerisindeki ifade $n_i R = \alpha_i$ olarak ifade edilebilir. Burada α_i , birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunun türevinin i. köküdür. Söz konusu ifadenin ilk on kökü Tablo A.1'de verilmiştir.

Tablo A.1 : Birinci tip ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunun türevinin ilk on kökü (Chalhoub and Kelly, 1988)

i	$\alpha_i = n_i R$
1	1.84118
2	5.33144
3	8.53632
4	11.70600
5	14.86359
6	18.01553
7	21.16437
8	24.31133
9	27.45705
10	30.60192

Bu durumda hız potansiyeli fonksiyonunun genel ifadesi aşağıdaki hali almaktadır (A.34).

$$\Theta = \sum_{i=1}^{i=\infty} K_i J_1(n_i r) (K_{7_i} \cosh(n_i z) + K_{8_i} \sinh(n_i z)) \cos \phi + \dot{v}_g(t) r \cos \phi \quad (\text{A.34})$$

Depo tabanındaki sınır koşulu (A.14), yukarıdaki ifade kullanılarak yazılmasıyla (A.35) elde edilmektedir.

$$K_{7_i} \sinh(n_i H) = K_{8_i} \cosh(n_i H) \quad (\text{A.35})$$

Hız potansiyeli ifadesi, (A.35) ifadesinden yararlanılarak yeniden düzenlenirse (A.36)'da verilen hali almaktadır

$$\Theta = \sum_{i=1}^{i=\infty} K_i J_1(n_i r) \frac{\cosh(n_i(z+H))}{\cosh(n_i H)} \cos \phi + \ddot{v}_g(t) r \cos \phi \quad (\text{A.36})$$

Yukarıdaki ifadeler zamanın fonksiyonu olduğu için K katsayıları da zamanın bir fonksiyonu olabilir. $K_i(t)$ 'nin belirlenebilmesi için (A.13) ifadesinde verilen serbest yüzeydeki sınır şartları, (A.36) ifadesine uygulanırsa (A.37) ve (A.38) elde edilir.

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{\partial^2 K_i}{\partial t^2} J_1(n_i r) \frac{\cosh(n_i(z+H))}{\cosh(n_i H)} \cos \phi + \ddot{v}_g(t) r \cos \phi \quad (\text{A.37})$$

$$g \frac{\partial \Theta}{\partial z} = g \sum_{i=1}^{i=\infty} K_i(t) n_i J_1(n_i r) \frac{\sinh(n_i(z+H))}{\cosh(n_i H)} \cos \phi \quad (\text{A.38})$$

$z = 0$ için yukarıdaki iki denklemin toplamının $\cos \phi$ ile sadeleştirilmesiyle (A.39) elde edilmektedir.

$$\sum_{i=1}^{i=\infty} \left(\frac{\partial^2 K_i(t)}{\partial t^2} + (g n_i \tanh(n_i H) K_i(t)) \right) J_1(n_i r) + \ddot{v}_g(t) r = 0 \quad (\text{A.39})$$

Yukarıdaki ifade, $\ddot{v}_g(t)$ 'li terim ihmal edilirse, serbest titreşim için kolayca çözülebilir. Serbest titreşim durumu için $K_i(t)$, trigonometrik bir fonksiyon olacak ve modların titreşim frekansları $(g n_i \tanh(n_i H))^{1/2}$ ifadesiyle elde edilebilecektir. İzlenen çözümde zorlanmış titreşim durumu ele alınmıştır. Parantez içerisindeki ifade $T(t)$ ile gösterilir ve (A.39) bu doğrultuda düzenlenirse (A.40) elde edilir.

$$\sum_{i=1}^{i=\infty} T(t) J_1(n_i r) + \ddot{v}_g(t) r = 0 \quad (\text{A.40})$$

$T(t)$ ifadesi, Bessel çözümlerini $\{0, R\}$ aralığında ortogonal yapan (A.41a) ve (A.41b) sınır şartları kullanılarak çözülebilir.

$$A_1 J_1(n_i 0) - B_1 J_1'(n_i 0) = 0 \quad (B_1 = 0) \quad (\text{A.41a})$$

$$A_2 J_1(n_i R) - B_2 J_1'(n_i R) = 0 \quad (A_2 = 0) \quad (\text{A.42a})$$

Bessel fonksiyonlarının ortogonalliğinden yararlanabilmek için (A.39) ifadesi $rJ_1(n_j r)$ ile çarpılmış (A.43) ve $\{0, R\}$ aralığında integre edilmiştir. Toplam ifadesinde sıfır olmayan tek terimin göz önüne alınmasıyla (A.44) ifadesi elde edilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{i=\infty} T(t) J_1(n_i r) J_1(n_j r) r + \ddot{v}_g(t) r^2 J_1(n_j r) = 0 \quad (\text{A.43})$$

$$T(t) \int_0^{R_0} J_1^2(n_j r) r dr + \ddot{v}_g(t) \int_0^{R_0} r^2 J_1(n_j r) dr = 0 \quad (\text{A.44})$$

Yukarıda verilen iki integral ifadesi değerlendirilmesiyle $T(t)$ elde edilir (A.45).

$$T(t) = \ddot{v}_g(t) \chi_j \quad (\text{A.45})$$

$T(t)$ ifadesi (A.39) ifadesinde yerine yerleştirilmesiyle (A.46) elde edilmektedir.

$$\ddot{K}_j(t) + \lambda_j^2 K_j(t) = \ddot{v}_g(t) \chi_j \quad (\text{A.46})$$

Bu ifadede, λ_j ve χ_j sırasıyla (A.47a) ve (A.47b) denklemleriyle verilmiştir.

$$\lambda_j = \sqrt{g n_j \tanh(n_j H)} \quad (\text{A.47a})$$

$$\chi_j = \frac{2R^2 J_2(n_j R) n_j}{J_1^2(n_j R) (1 - (n_j R)^2)} \quad (\text{A.47b})$$

(A.47b) ifadesi Bessel fonksiyonlarının (A.48)'de verilen özelliği kullanılarak daha da sadeleştirilebilir.

$$J_{v+1}(x) = \frac{v}{x} J_v(x) - J'_v(x) - J'_v(x) \quad (\text{A.48})$$

$J'_1(n_j R) = 0$ olmasından dolayı (A.47b), (A.49) ifadesine dönüşmektedir.

$$\chi_j = \frac{2R}{J_1(n_j R) (1 - (n_j R)^2)} \quad (\text{A.49})$$

$$K_i(t) = \int_0^t \chi_i \cos \lambda_i(t - \tau) \ddot{v}_g(\tau) d\tau \quad (\text{A.50})$$

(A.50) ifadesi (A.36)'da yerine koyulursa, hız potansiyeli ifadesi (A.51)'de verilen hali almaktadır.

$$\begin{aligned} \Theta(r, \phi, z, t) = \sum_{i=1}^{i=\infty} \chi_i \left[\int_0^t \cos \lambda_i(t - \tau) \ddot{v}_g(\tau) d\tau \right] J_1(n_i r) \frac{\cosh(n_i(z + H))}{\cosh(n_i H)} \cos \phi \\ + \ddot{v}_g(t) r \cos \phi \end{aligned} \quad (\text{A.51})$$

Sıvı depolarının tasaramında en önemli tasarım parametreleri, depo duvarında oluşan hidrodinamik basınç ve depo duvarı boyunca sıvı yükselmesidir. Bundan sonraki adımda, hız potansiyeli fonksiyonundan yola çıkılarak depo duvarında oluşan hidrodinamik basıncı ve serbest sıvı yüzeyi yer değiştirmelerini veren ifadelerin elde edilmesi gösterilecektir.

Sıvının herhangi bir noktasındaki hidrodinamik basınç (A.52) ifadesi ile bulunabilir.

$$P_d(r, \phi, z, t) = \rho_l \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (\text{A.52})$$

Yukarıda verilen (A.52) ifadesinin açılmasıyla (A.53) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} P_d = \rho_l \cos \phi \sum_{i=1}^{i=\infty} \chi_i \left(\ddot{v}_g(t) - \lambda_i \int_0^t \sin \lambda_i(t - \tau) \ddot{v}_g(\tau) d\tau \right) J_1(n_i r) \frac{\cosh(n_i(z + H))}{\cosh(n_i H)} \\ + \rho_l \ddot{v}_g(t) r \cos \phi \end{aligned} \quad (\text{A.53})$$

Hareket düzleminde depo duvarında oluşan hidrodinamik basınç (A.53) ifadesinde $r=R$ ve $\phi=0$ koşulları kullanılarak (A.54) ifadesinde verilmiştir.

$$P_d = \rho_l R \ddot{v}_g(t) \left(1 + \sum_{i=1}^{i=\infty} C_i \right) - \rho_l R_o \sum_{i=1}^{i=\infty} C_i \lambda_i I_i(t) \quad (\text{A.54})$$

Yukarıdaki ifadede C_i ve I_i , sırasıyla (A.55) ve (A.56) denklemlerinin yardımıyla elde edilebilmektedir.

$$C_i = \frac{2}{1 - (n_i R)^2} \frac{\cosh(n_i(z + H))}{\cosh(n_i H)} \quad (\text{A.55})$$

$$I_i(t) = \int_0^t \sin \lambda_i(t-\tau) \ddot{v}_g(\tau) d\tau \quad (\text{A.56})$$

C_i ve $\lambda_i C_i$ katsayıları sıvı yüzeyinde maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Bu katsayıların değerleri derinlik arttıkça hızla azalmaktadır. Bu azalma, mod sayısına göre de değişmektedir. Mod sayısı arttıkça bu katsayıların yüzeydeki değerlerinin, depo tabanındaki değerlerinin oranı azalmaktadır. (A.56) ifadesindeki Duhamel integrali, $\ddot{v}_g(t)$ taban hareketine maruz kalan sönümsüz λ_i frekanslı tek serbestlik dereceli bir sistemin hareketini temsil etmektedir.

Depo duvarında oluşan hidrodinamik basınç üzerinde etkili olan unsurlar (A.54) ifadesinde görülmektedir. Hidrodinamik basınç ifadesinin ilk terimi (A.57) yer hareketi sırasında depo ile beraber hareket eden sıvının etkisini, ikinci terim (A.58) ise çalkalanma modlarının etkisini göstermektedir.

$$P_{d1} = \rho_l R_o \ddot{v}_g(t) \left(1 + \sum_{i=1}^{i=\infty} C_i \right) \quad (\text{A.57})$$

$$P_{d2} = \rho_l R_o \sum_{i=1}^{i=\infty} C_i \lambda_i I_i(t) \quad (\text{A.58})$$

Sıvı yüzeyindeki yer değiştirmeler (A.59) ifadesi ile bulunabilmektedir.

$$\eta(r, \phi, z, t) = \frac{1}{g} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (\text{A.59})$$

Yukarıda verilen ifade açık halde yazılırsa (A.60) elde edilir. Bu ifade kullanılarak herhangi bir t anında sıvı yüzeyi profilini elde etmek mümkündür.

$$\begin{aligned} \eta(r, \phi, z, t) = & \frac{\cos \phi}{g} \sum_{i=1}^{i=\infty} \chi_i \left[\ddot{v}_g(t) - \lambda_i \int_0^R \sin \lambda_i(t-\tau) \ddot{v}_g(\tau) d\tau \right] J_1(n_i r) \\ & + \frac{\cos \phi}{g} r \ddot{v}_g(t) \end{aligned} \quad (\text{A.60})$$

Hareket yönünde, depo duvarında sıvı yükselmesi (A.60) ifadesinde $r=R_o$, $\phi=0$ ve $z=0$ koşullarının yerleştirilmesiyle elde edilen (A.61) ifadesi ile bulunabilir.

$$\eta(t) = \frac{R}{g} \ddot{v}_g(t) \left(1 + \sum_{i=1}^{i=\infty} C'_i \right) - \frac{R}{g} \left(1 + \sum_{i=1}^{i=\infty} C'_i \lambda_i I_i(t) \right) \quad (\text{A.61})$$

A.2. Analizlerde kullanılacak sıvı modellerinin kıyaslanması

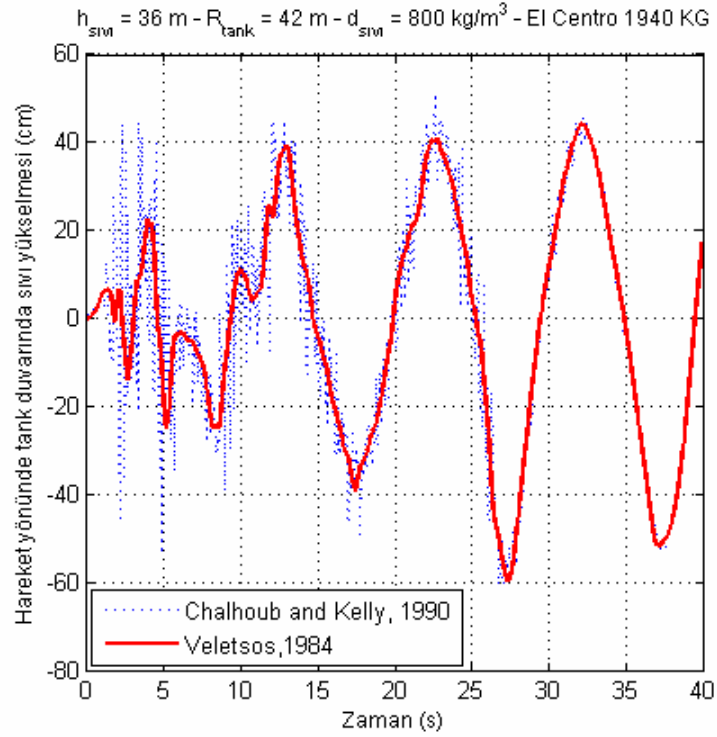
Sismik yalıtımlı sıvı depolarının davranışını incelemekte yararlanılacak yazılımda Veletsos tarafından yanal taban hareketine maruz kalan rijit duvarlı silindir sıvı depoları için geliştirilen sıvı modeli kullanılmıştır (Veletsos, 1984). Yazılımın ürettiği sonuçlar, parametrik çalışmada ele alınacak depo tipleri ve ivme kayıtlarının kullanıldığı analizler aracılığıyla değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde Veletsos tarafından geliştirilen modelin ürettiği sonuçlar, Chalhoub ve Kelly tarafından geliştirilen modelin ürettiği sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaların yapılabilmesi için bu bölümde ele alınan teorik alt yapının kullanıldığı ikinci bir program geliştirilmiştir (Chalhoub ve Kelly, 1990). Bu sayede, aynı sınır koşulları için farklı matematiksel yöntemlerle oluşturulan iki modelin ürettiği sonuçlar arasındaki farklılıklar ve parametrik çalışmada kullanılacak yazılımdaki programlama hatalarının varlığı araştırılabilmektedir. Buna ek olarak, parametrik çalışmada kullanılacak depolarda farklı ivme kayıtları altındaki çalkalanma hareketinin mertebesi hakkında bilgi toplanabilmektedir.

Değerlendirme kapsamında gerçekleştirilen analizlerin sonuçları aşağıdaki grafikler vasıtasıyla sunulmuştur. Taban hareketi istikametinde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi incelendiğinde iki modelin birbirlerine oldukça yakın sonuçlar ürettiği görülmüştür.

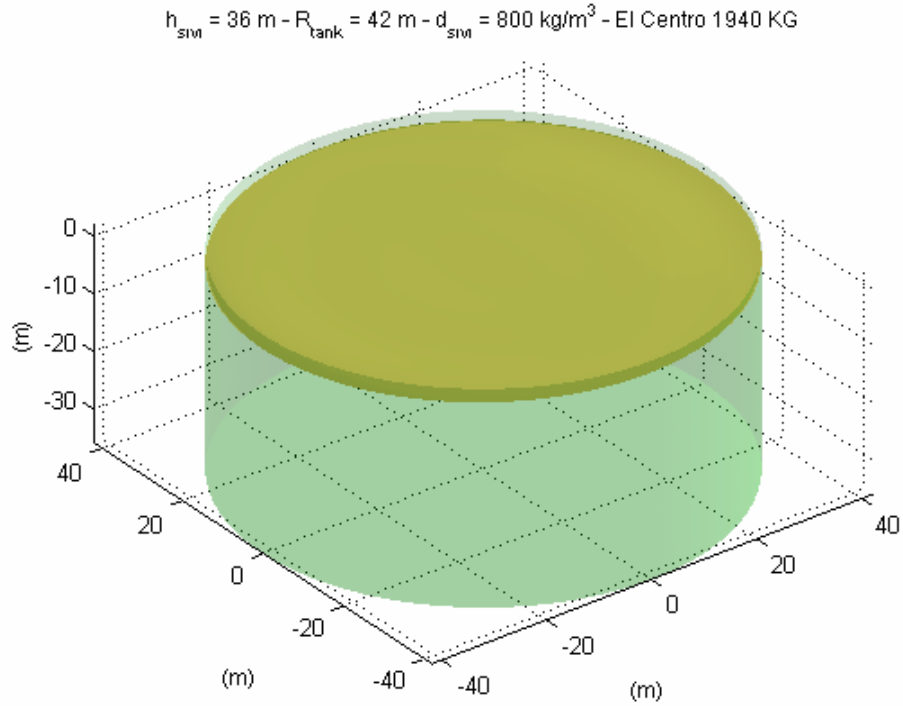
Sıvı hareketinin en şiddetli olduğu anda, yüzeyinin depo içerisindeki konumu incelendiğinde çalkalanmanın çok önemli bir tasarım problemi olarak ortaya çıkabileceği görülmüştür. Örnek olarak, Yarımca ivme kaydının kullanıldığı analizlerde maksimum çalkalanma yüksekliği 3 m'yi aşabilmektedir. Maksimum sıvı depolama yüksekliği ile depo çatısı arasındaki boşluğun, bu değer üzerinde tutulması ekonomik olmayacaktır. Öte yandan, söz konusu boşluğun yetersiz olması, çatının ve depo duvarının üst bölümünün hasar görmesine neden olabilecektir.

Sıvı yüzeyi profilinin detaylı olarak gösterildiği grafiklerde konvektif modların etkisi yüzeyde oluşan halkalar aracılığıyla görülebilmektedir. Farklı modların sıvı yüzeyi

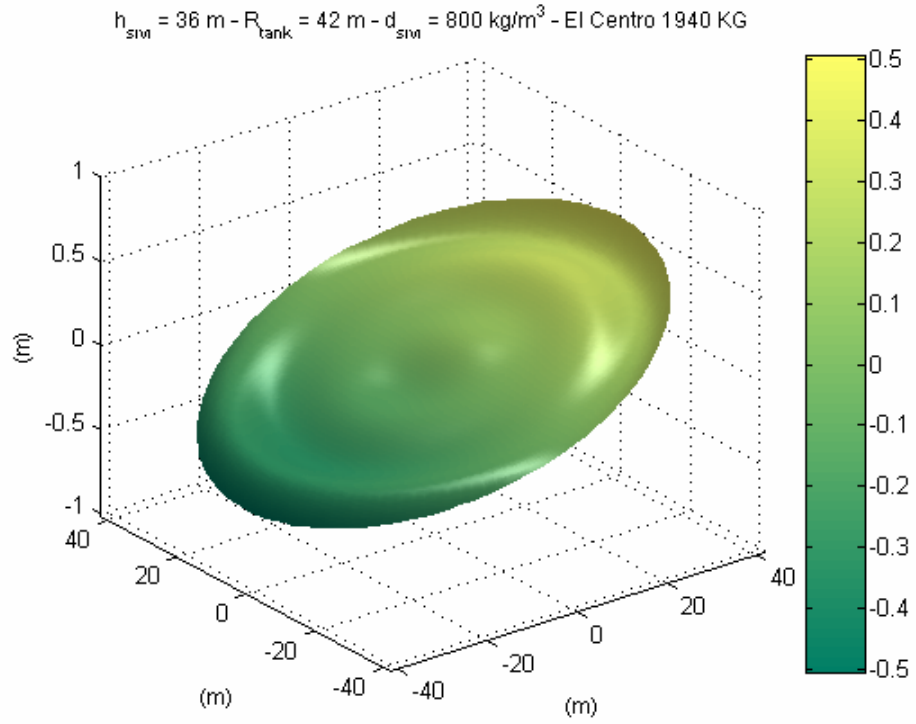
profili üzerindeki etkisi, en belirgin olarak Depo tip-1 için Erzincan ivme kaydının kullanıldığı analiz sonuçlarında görülebilmektedir.



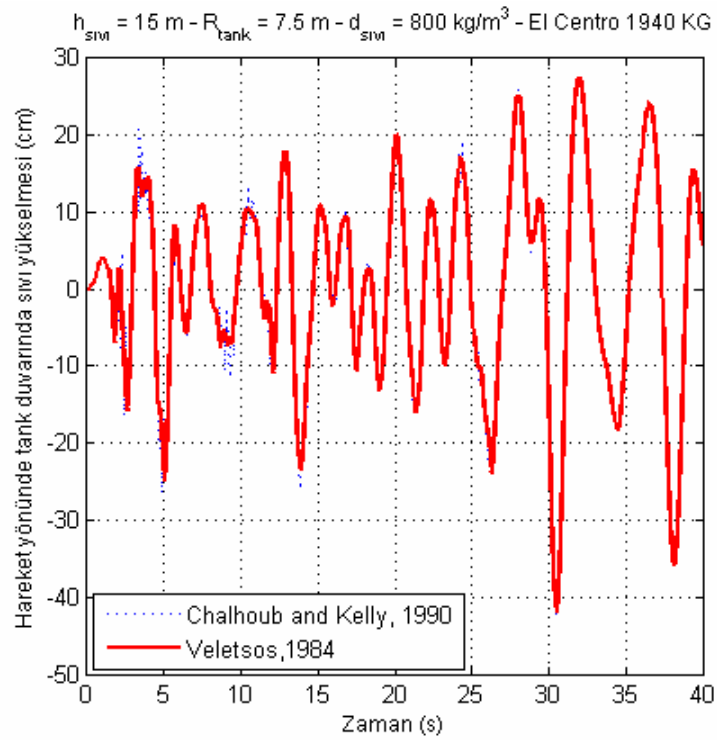
Şekil A.2 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85$ – El Centro)



Şekil A.3 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85$ – El Centro)

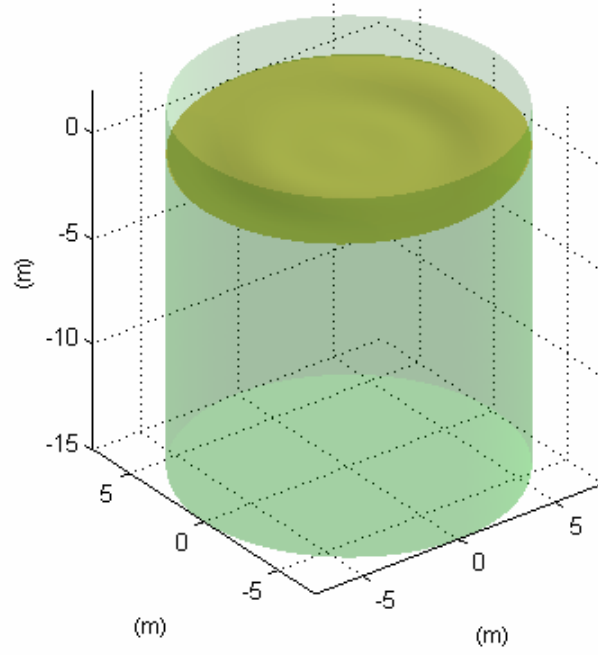


Şekil A.4 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili
($H/R = 0.85$ – El Centro)



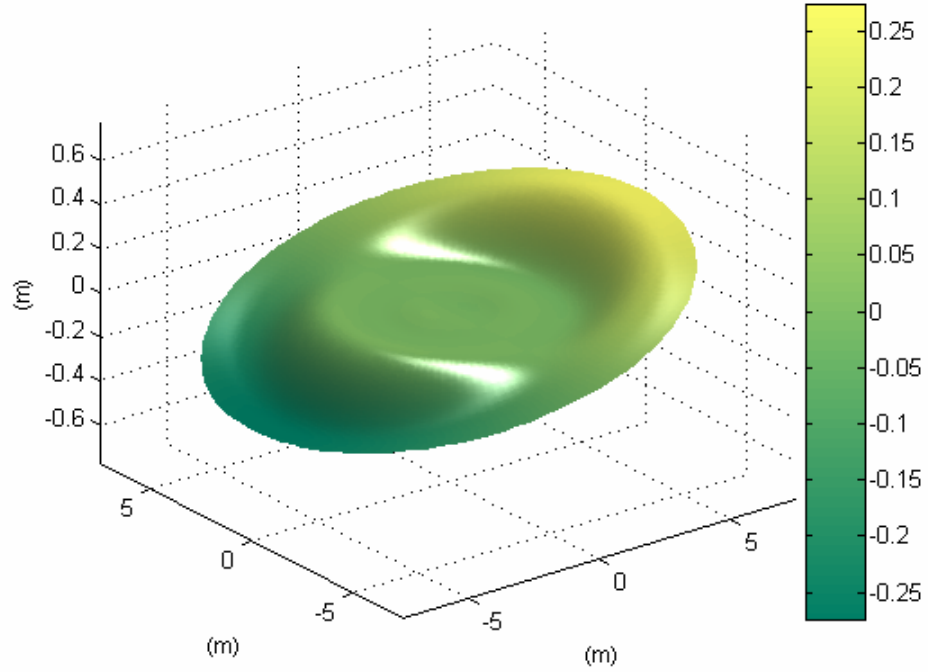
Şekil A.5 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2$ – El Centro)

$$h_{sivi} = 15 \text{ m} - R_{tank} = 7.5 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{El Centro 1940 KG}$$

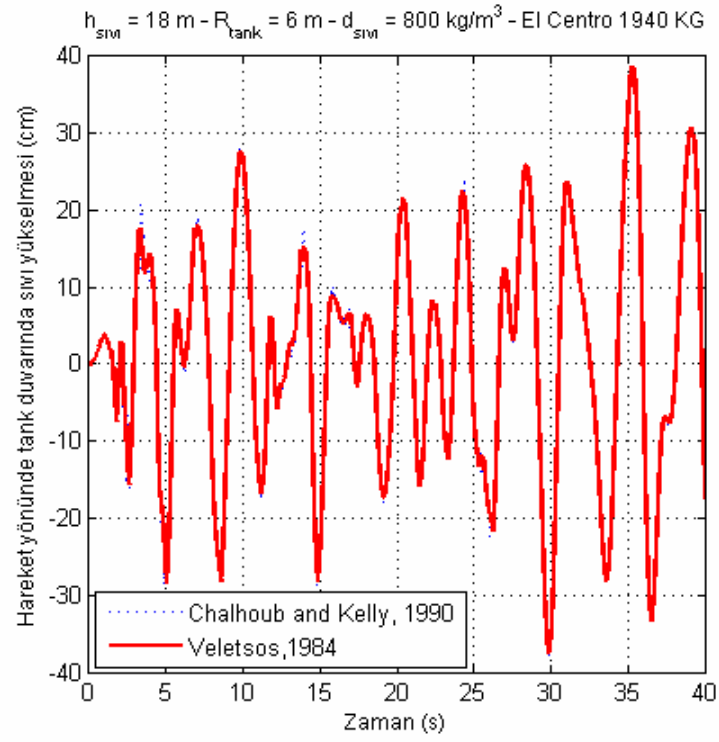


Şekil A.6 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2$ – El Centro)

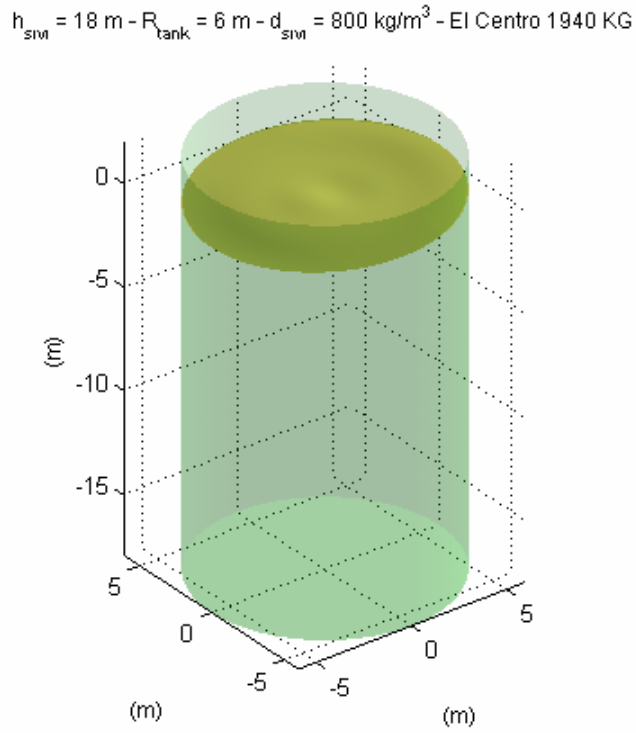
$$h_{sivi} = 15 \text{ m} - R_{tank} = 7.5 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{El Centro 1940 KG}$$



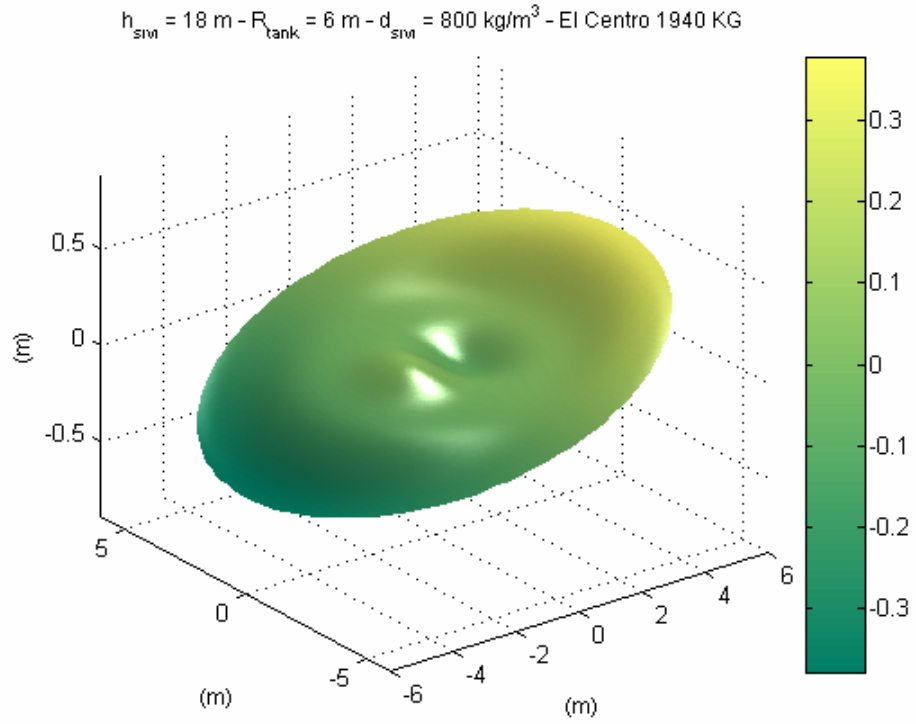
Şekil A.7 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 2$ – El Centro)



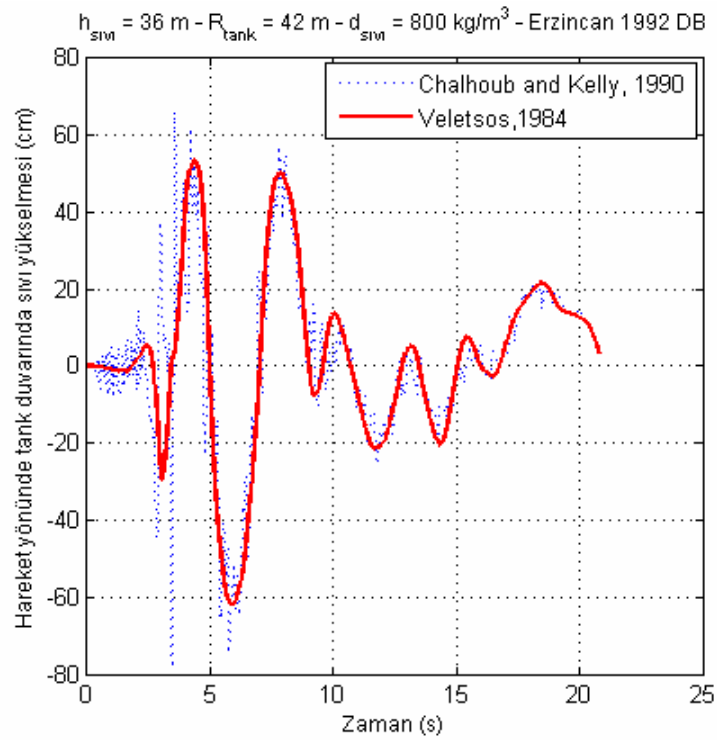
Şekil A.8 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3$ – El Centro)



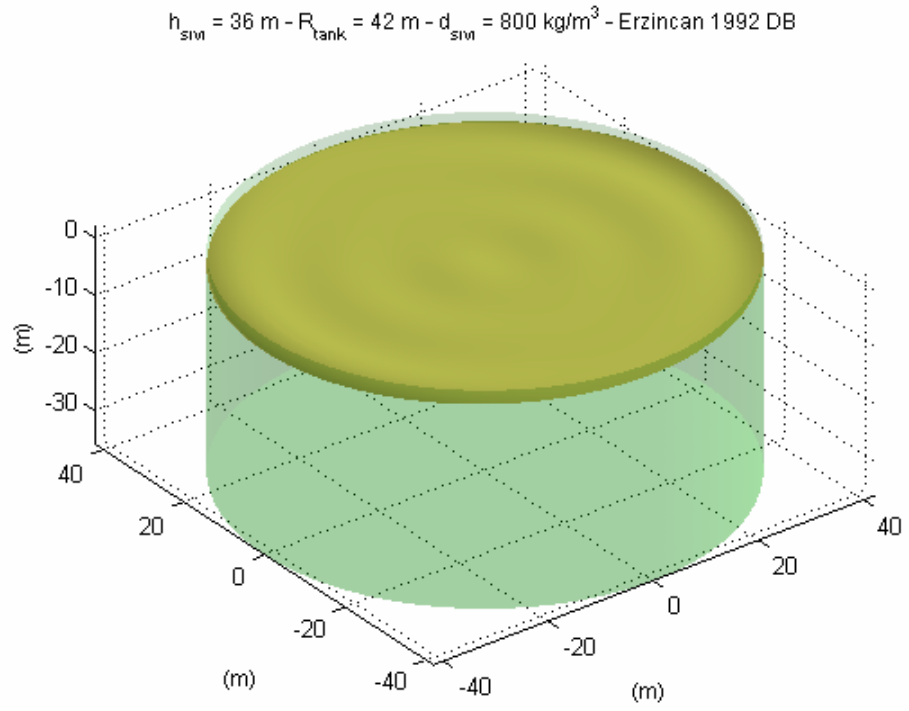
Şekil A.9 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 3$ – El Centro)



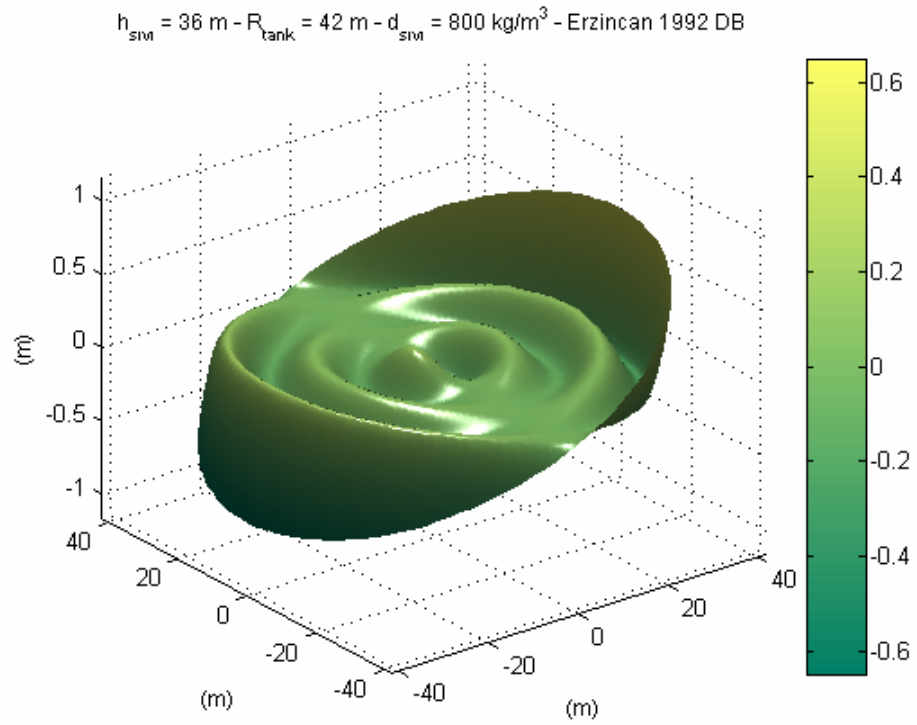
Şekil A.10 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili
($H/R = 3$ – El Centro)



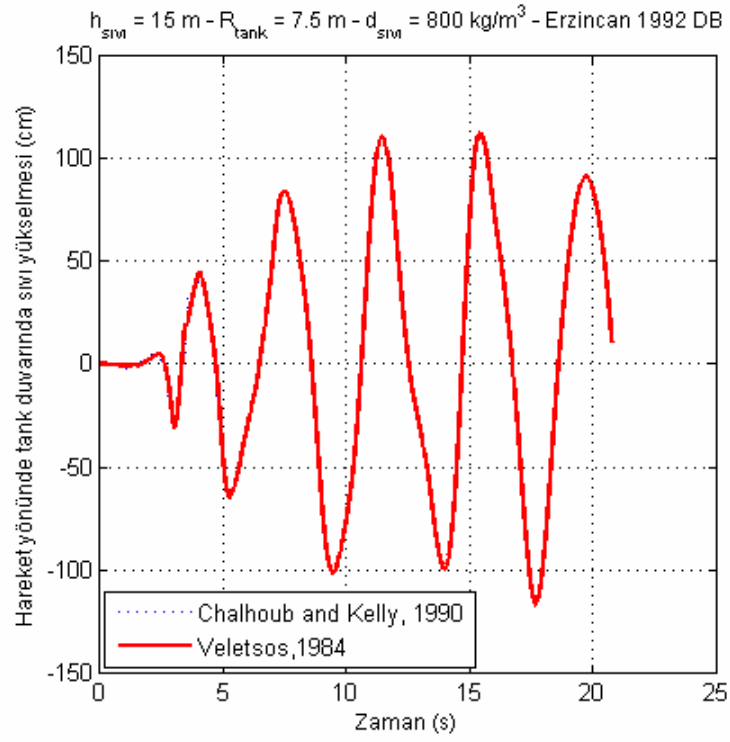
Şekil A.11 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85$ – Erzincan)



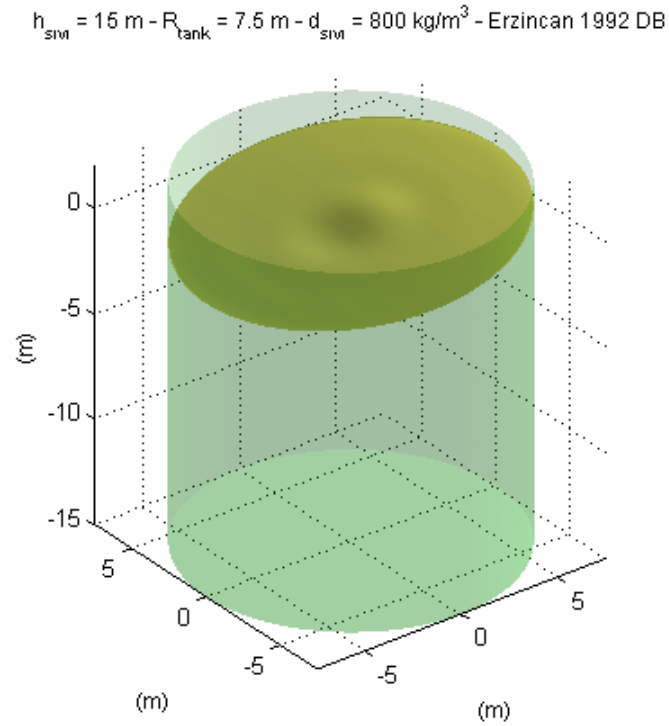
Şekil A.12 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85$ – Erzincan)



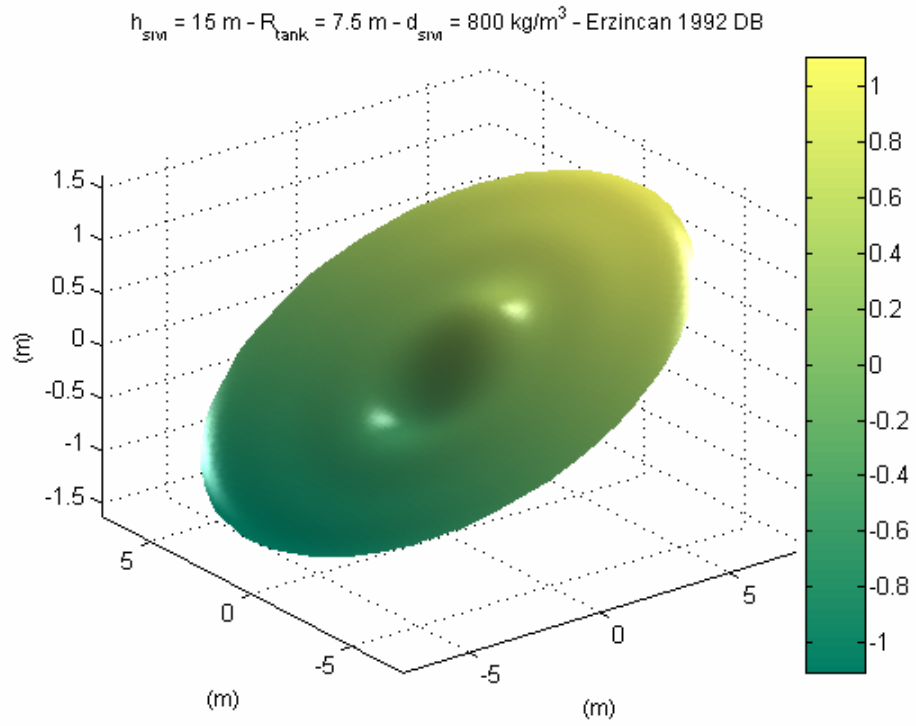
Şekil A.13 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 0.85$ – Erzincan)



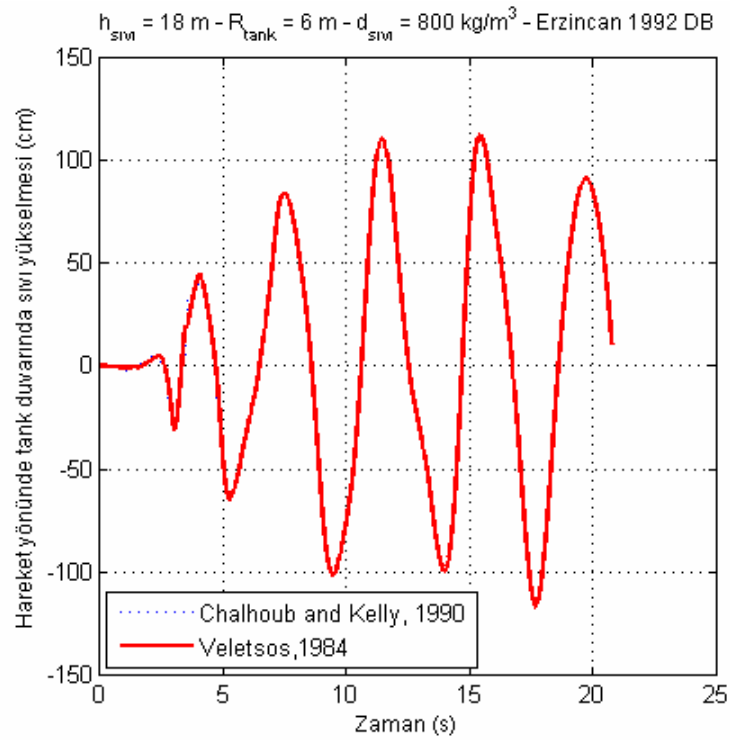
Şekil A.14 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2$ – Erzincan)



Şekil A.15 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2$ – Erzincan)

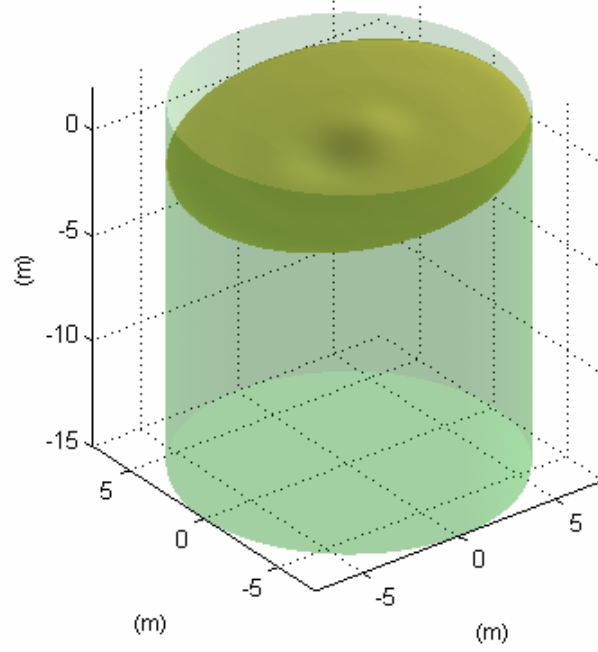


Şekil A.16 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili
($H/R = 2$ – Erzincan)



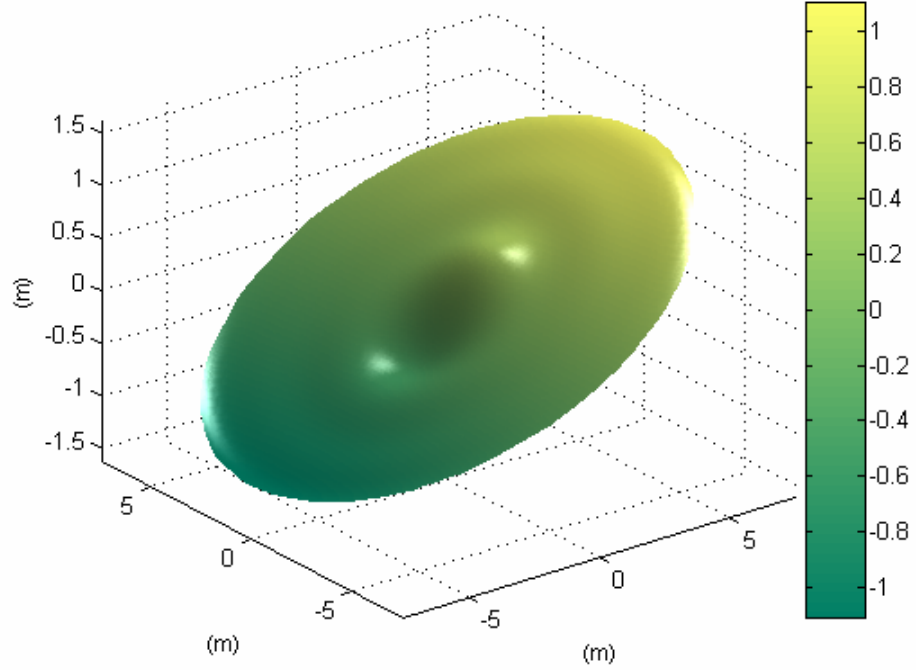
Şekil A.17 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3$ – Erzincan)

$$h_{sivi} = 18 \text{ m} - R_{tank} = 6 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{Erzincan 1992 DB}$$

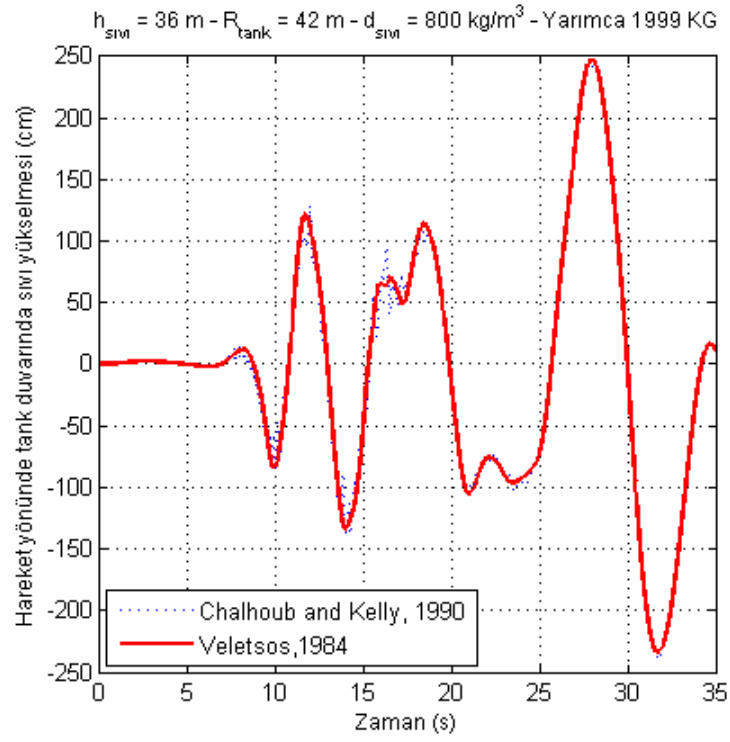


Şekil A.18 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu (H/R = 3 – Erzincan)

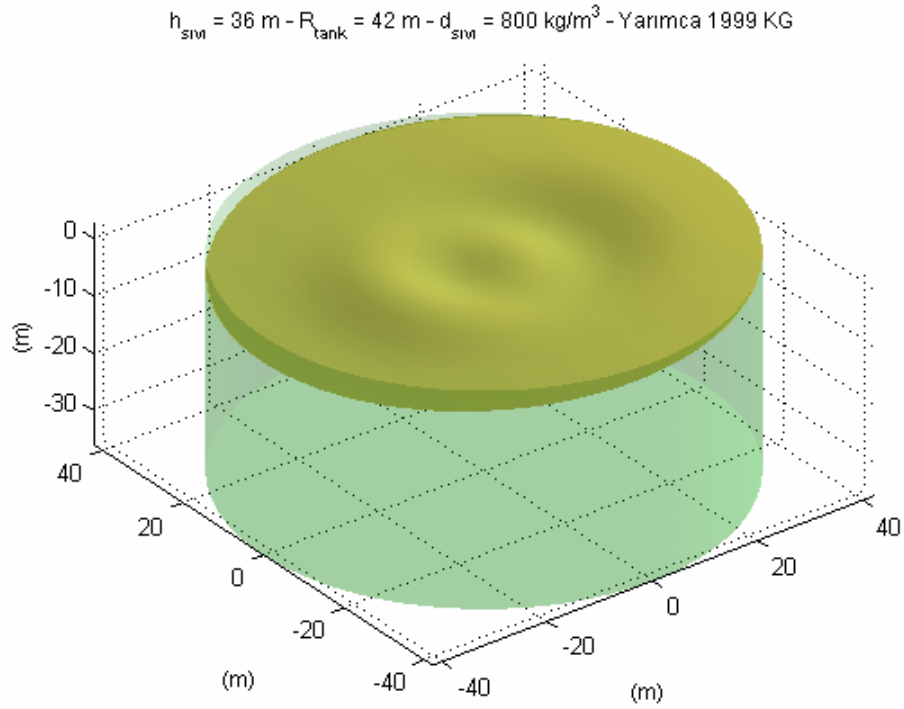
$$h_{sivi} = 18 \text{ m} - R_{tank} = 6 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{Erzincan 1992 DB}$$



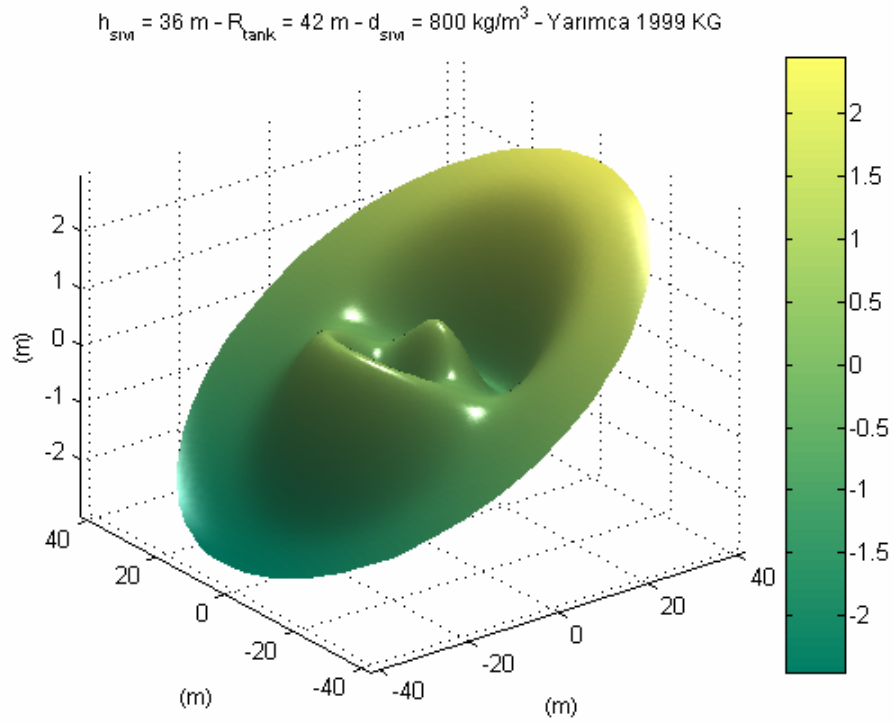
Şekil A.19 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili (H/R = 3 – Erzincan)



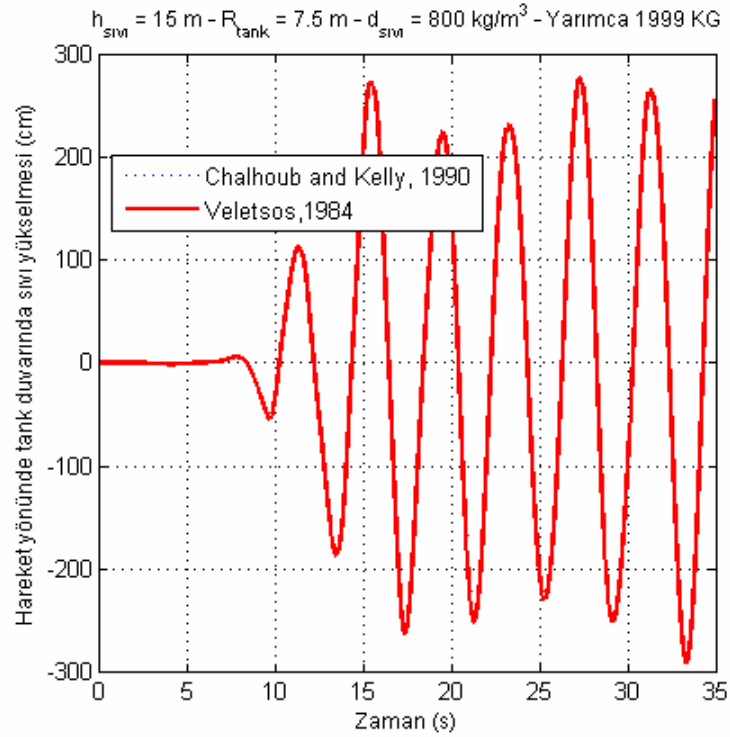
Şekil A.20 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 0.85$ – Yarımca)



Şekil A.21 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 0.85$ – Yarımca)

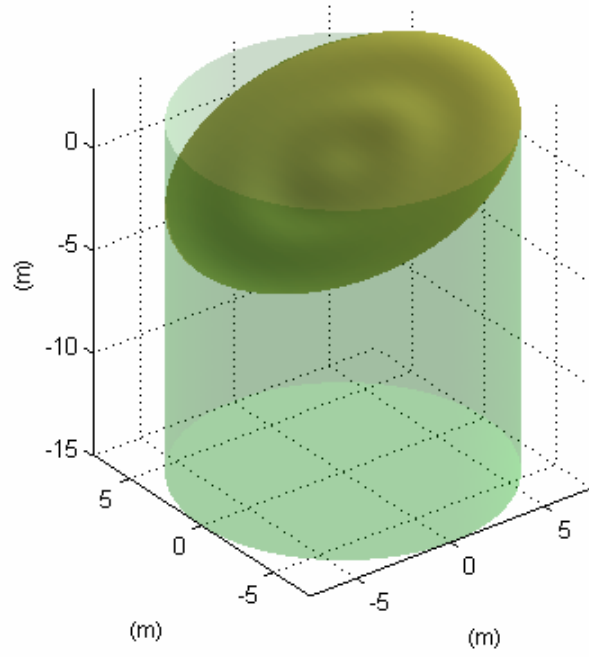


Şekil A.22 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili
($H/R = 0.85$ – Yarımcı)



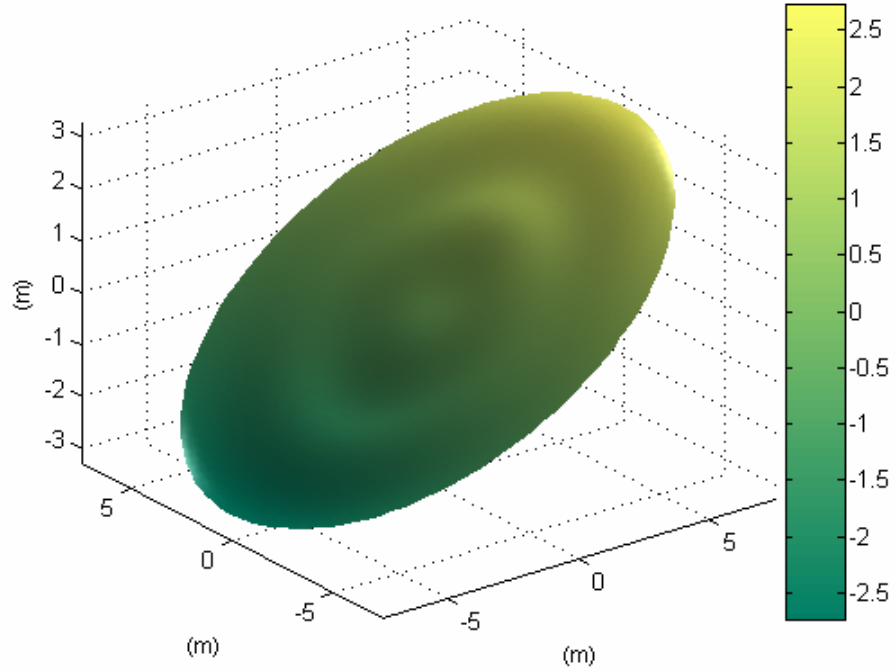
Şekil A.23 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 2$ – Yarımcı)

$$h_{sivi} = 15 \text{ m} - R_{tank} = 7.5 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{Yarımca } 1999 \text{ KG}$$

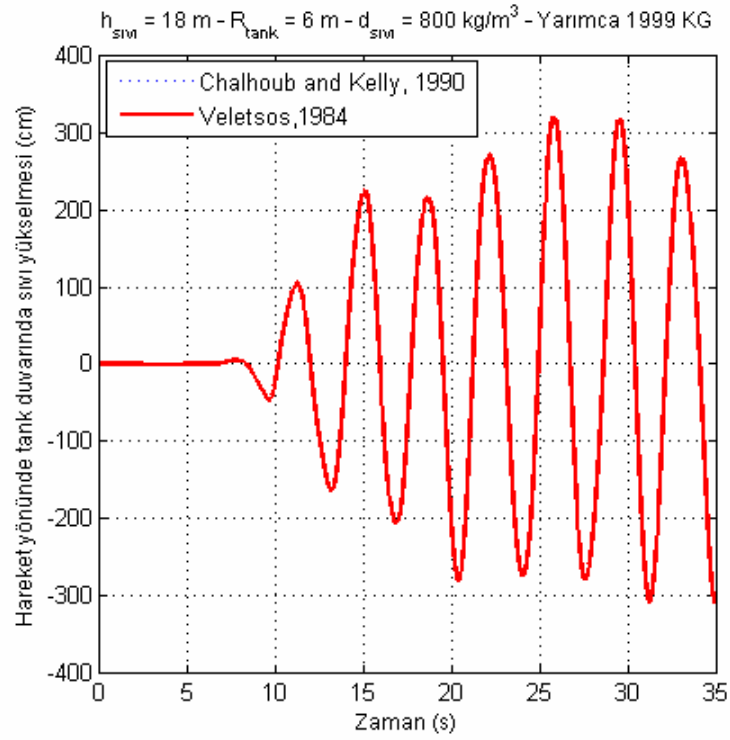


Şekil A.24 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 2$ – Yarımca)

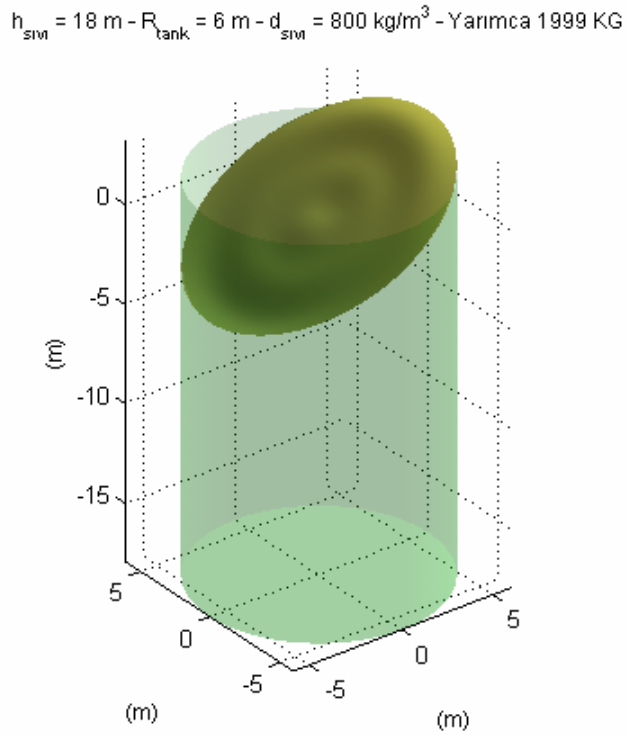
$$h_{sivi} = 15 \text{ m} - R_{tank} = 7.5 \text{ m} - d_{sivi} = 800 \text{ kg/m}^3 - \text{Yarımca } 1999 \text{ KG}$$



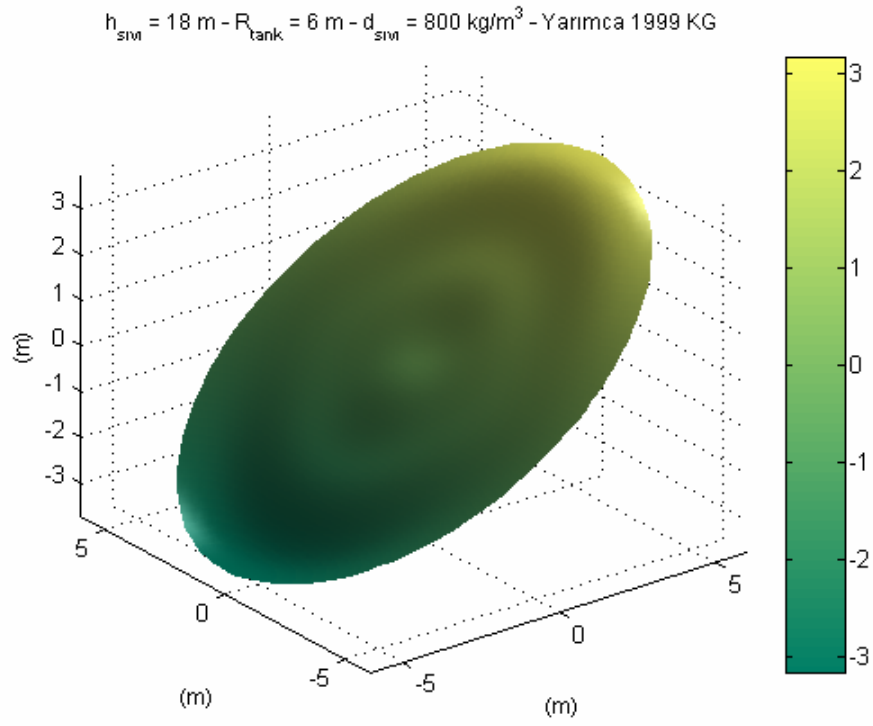
Şekil A.25 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili ($H/R = 2$ – Yarımca)



Şekil A.26 : Taban hareketi yönünde depo duvarında sıvı yükselmesinin zamana göre değişimi ($H/R = 3$ – Yarımca)

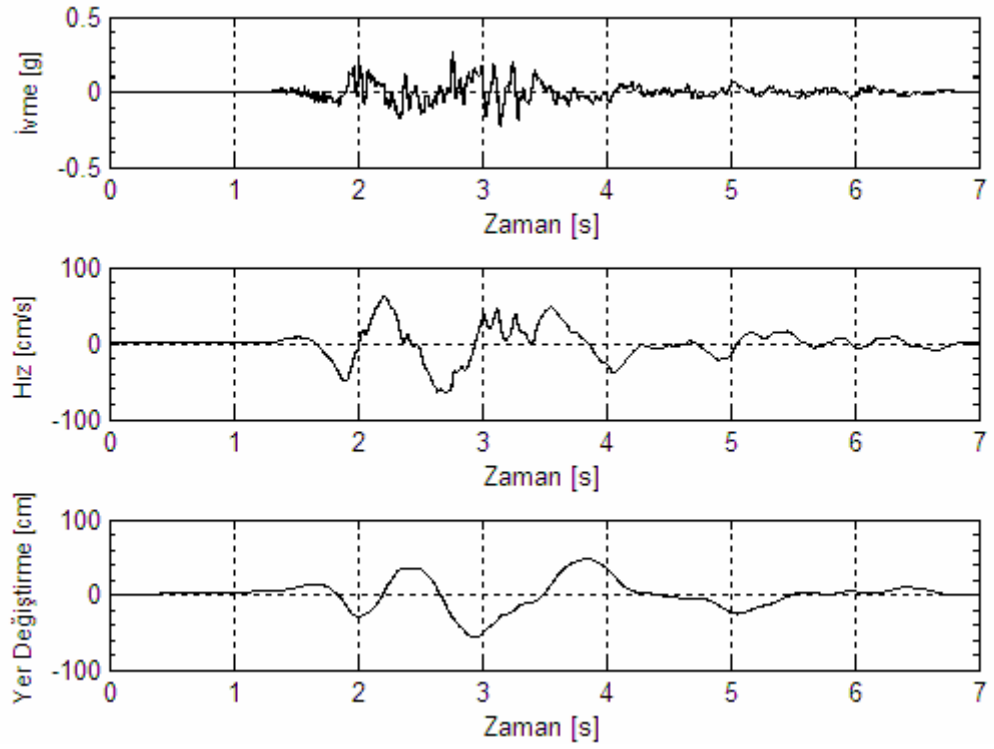


Şekil A.27 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyinin depo içerisindeki konumu ($H/R = 3$ – Yarımca)

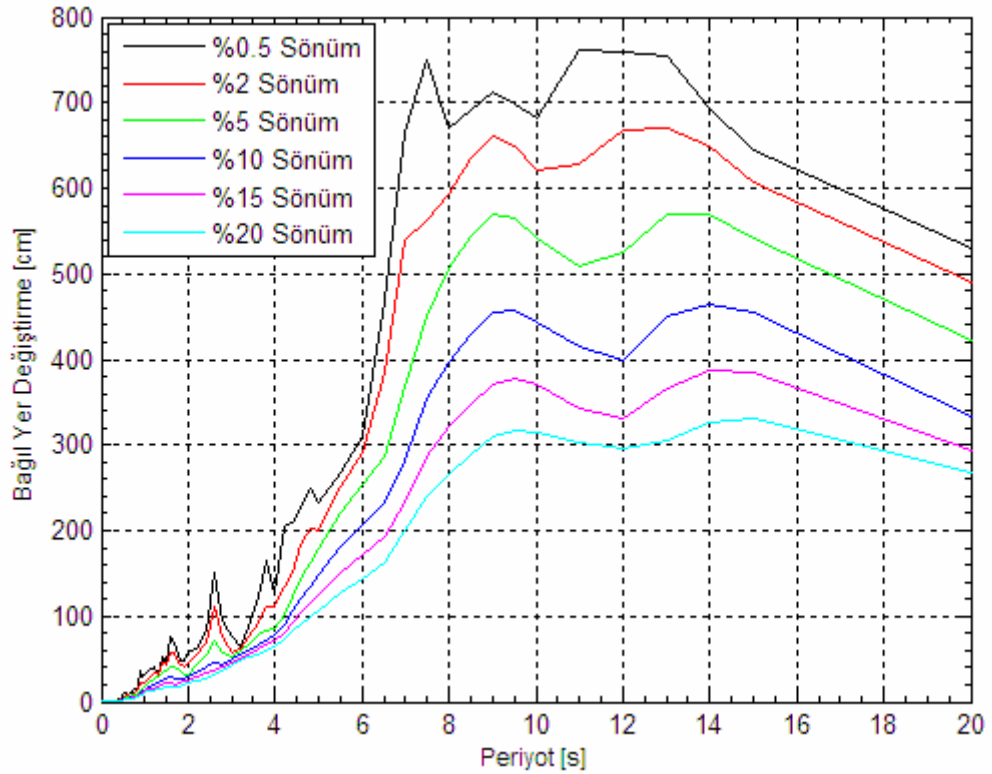


Şekil A.28 : Maksimum çalkalanma anında sıvı yüzeyi profili
($H/R = 3$ – Yarımca)

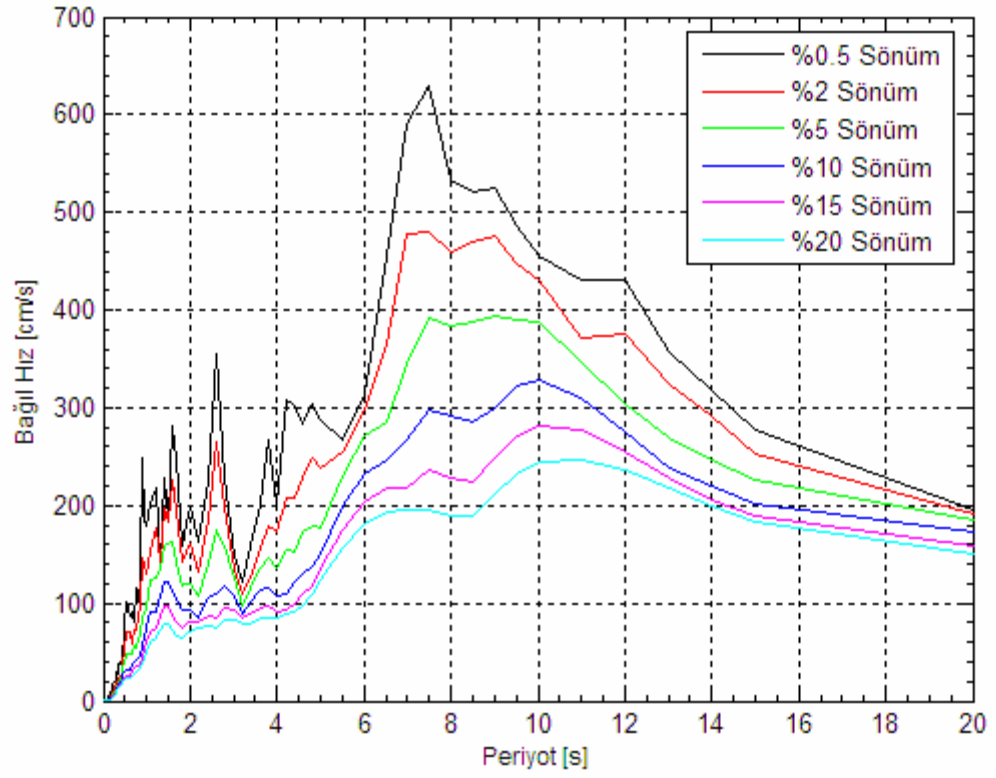
**EK B. ÇALIŞMADA KULLANILAN DEPREM KAYITLARININ
IVME-ZAMAN, HIZ-ZAMAN, YER DEĞİŞTİRME-ZAMAN VE
SPEKTRUM GRAFİKLERİ**



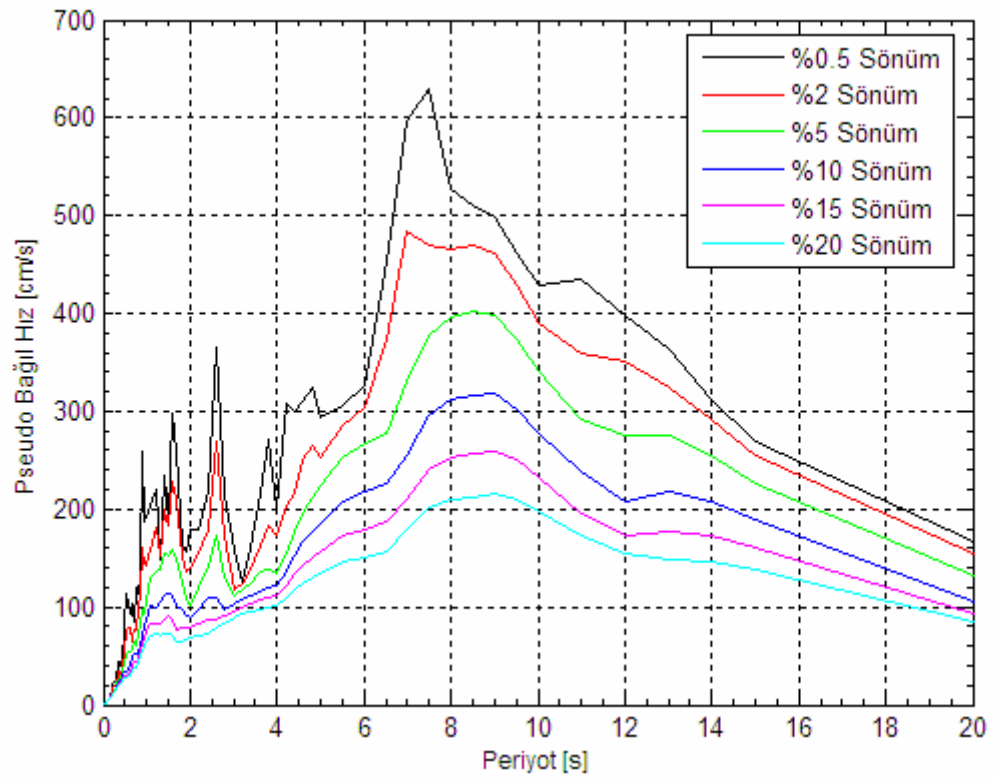
Şekil B.1 : İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



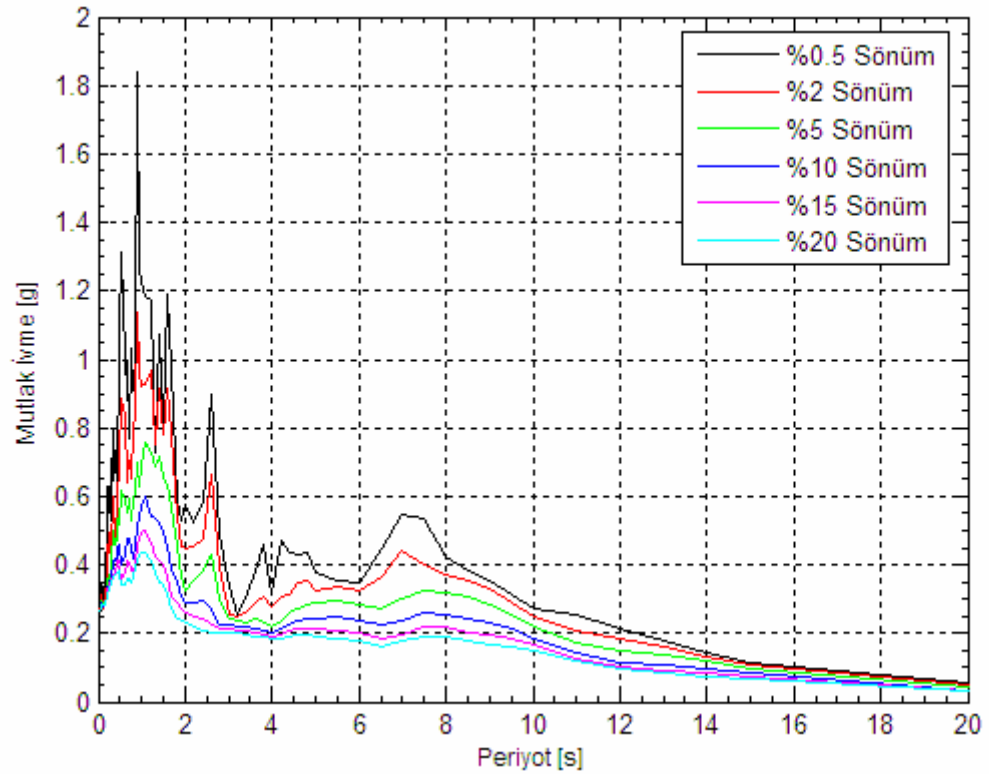
Şekil B.2 : Görelî yer değiştirme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



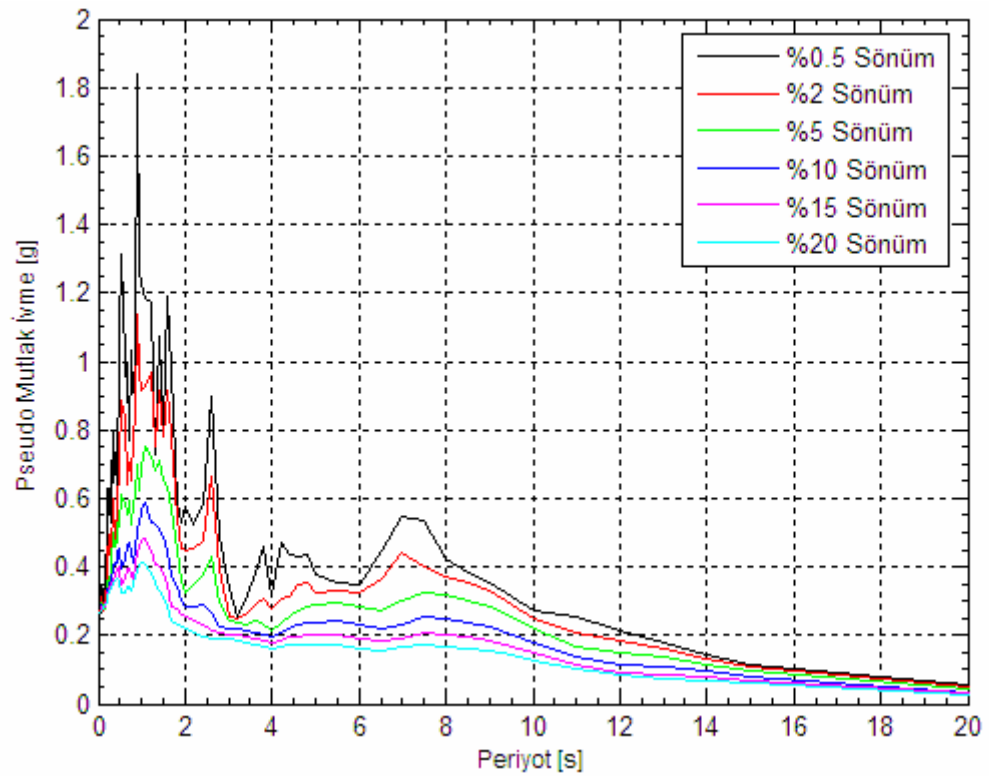
Şekil B.3 : Görelî hız spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



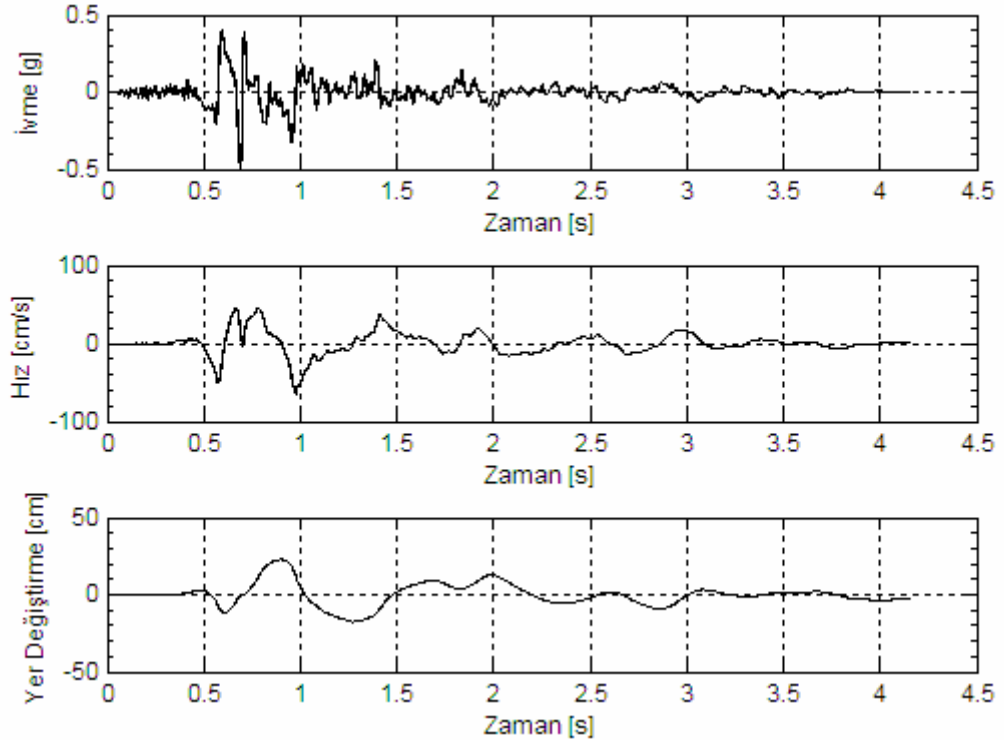
Şekil B.4 : Sözde görelî hız spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



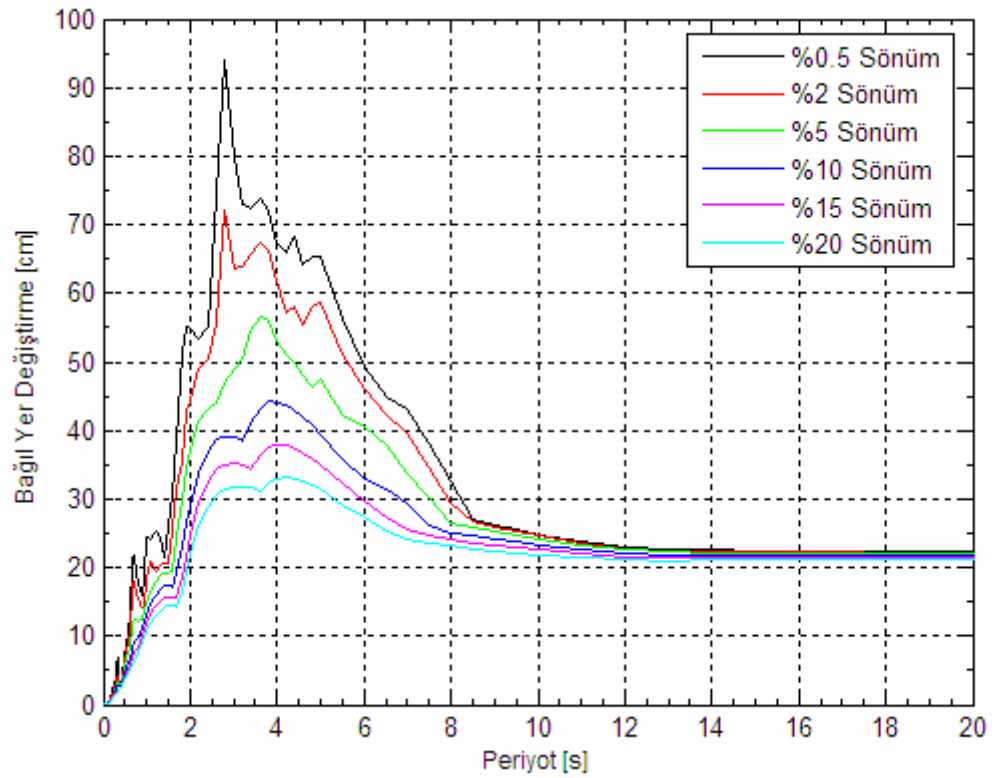
Şekil B.5 : Mutlak ivme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



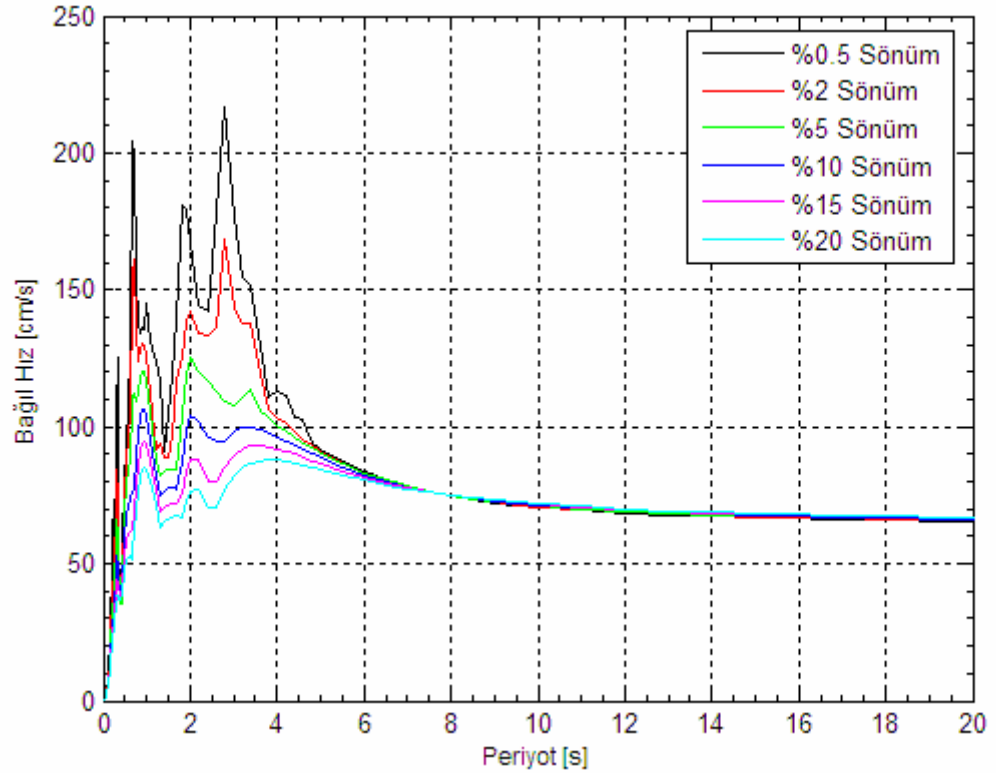
Şekil B.6 : Sözde mutlak ivme spektrumu (Kocaeli, 1999 - Yarımca KG)



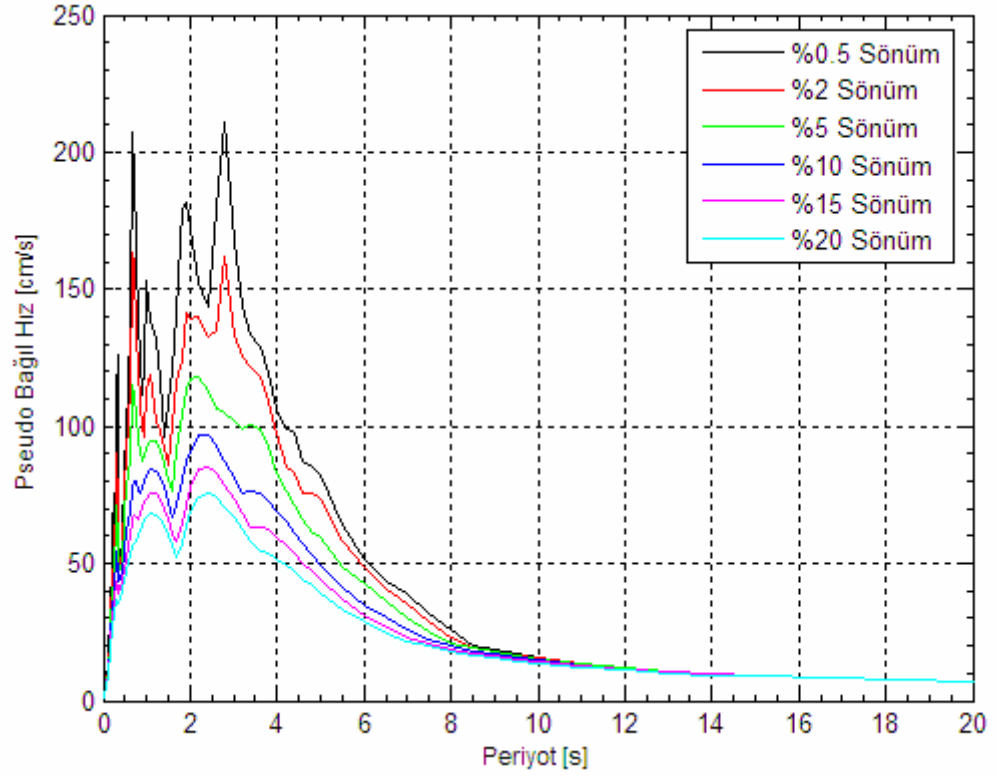
Şekil B.7 : İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Erzincan, 1992 - Erzincan DB)



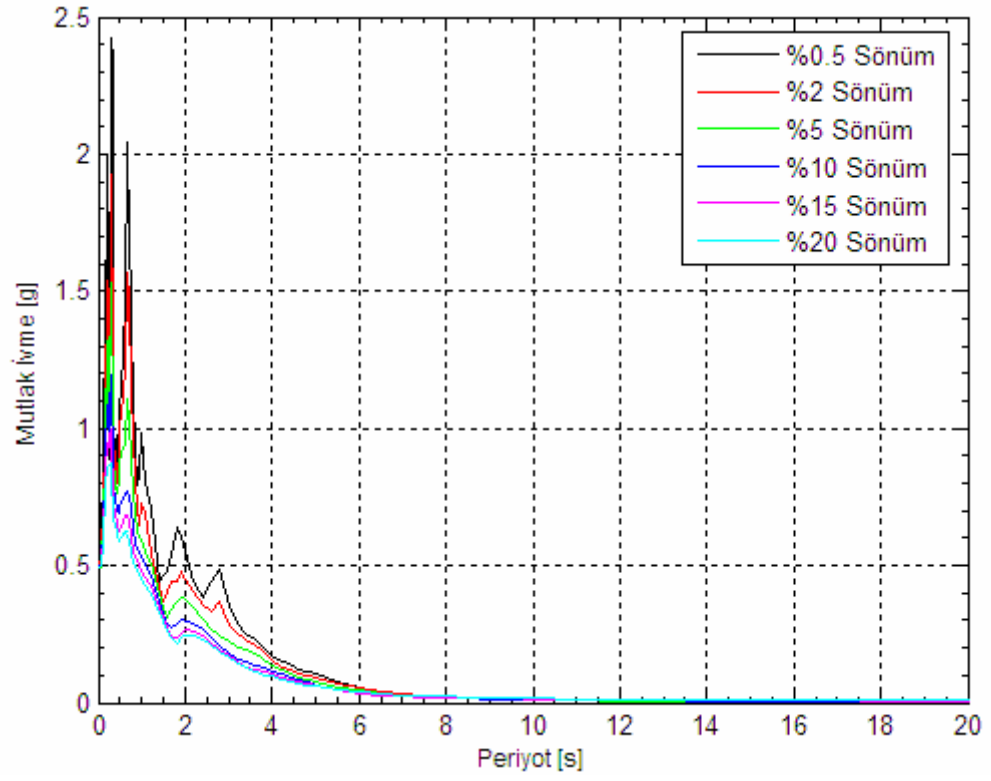
Şekil B.8 : Görelî yer değiştirme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)



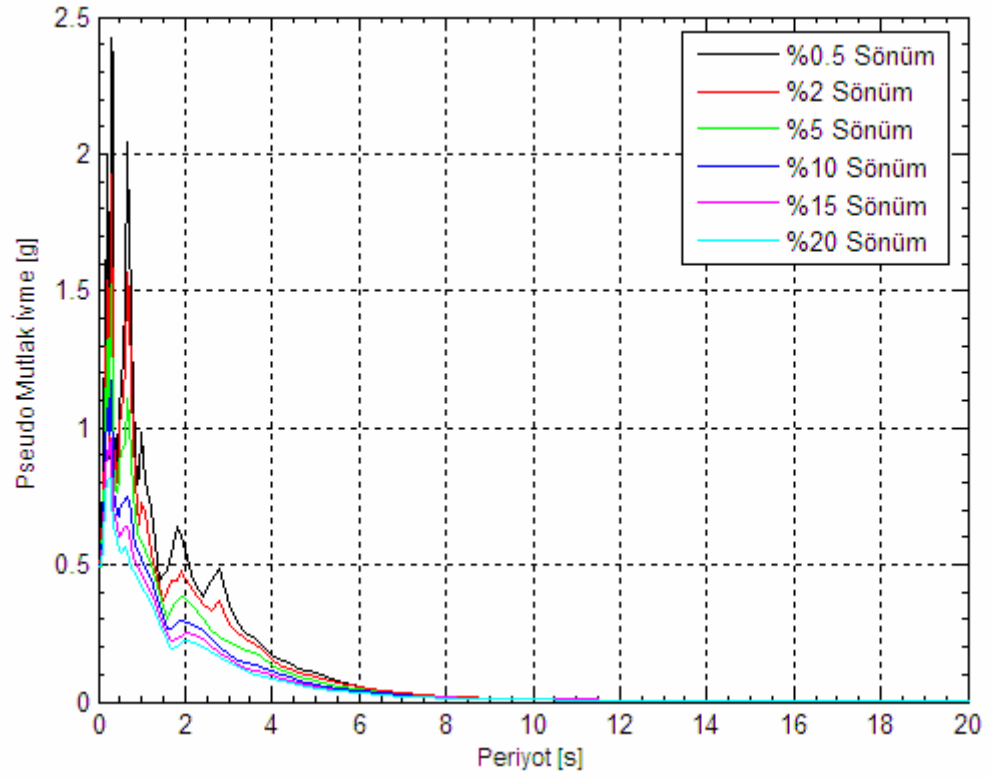
Şekil B.9 : Görelî hız spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)



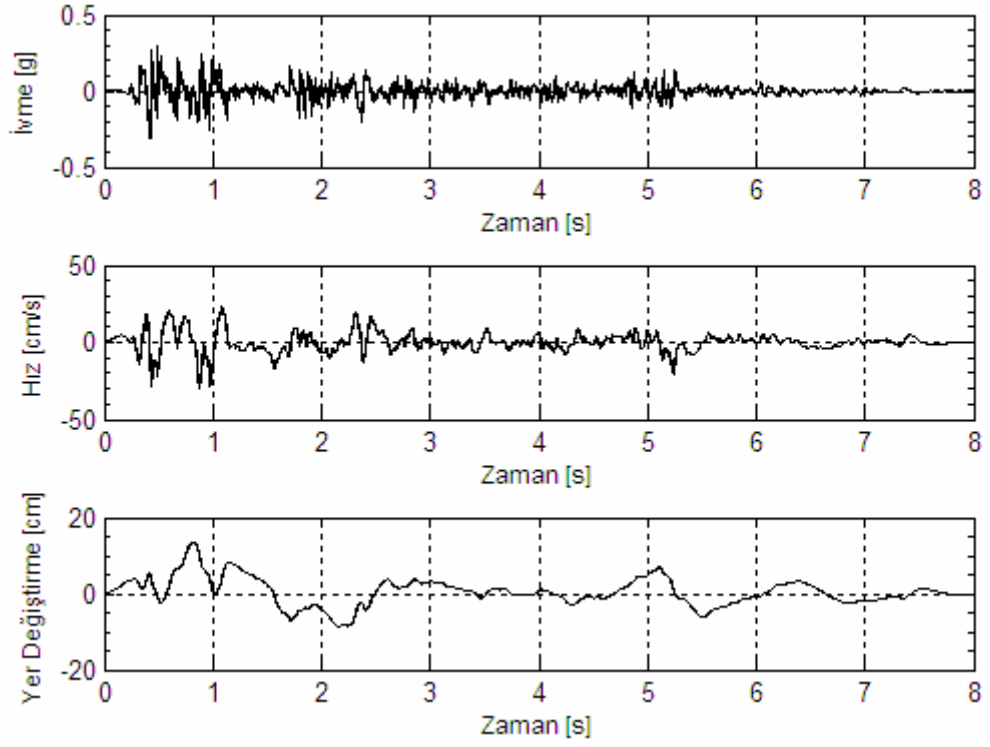
Şekil B.10 : Sözde görelî hız spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)



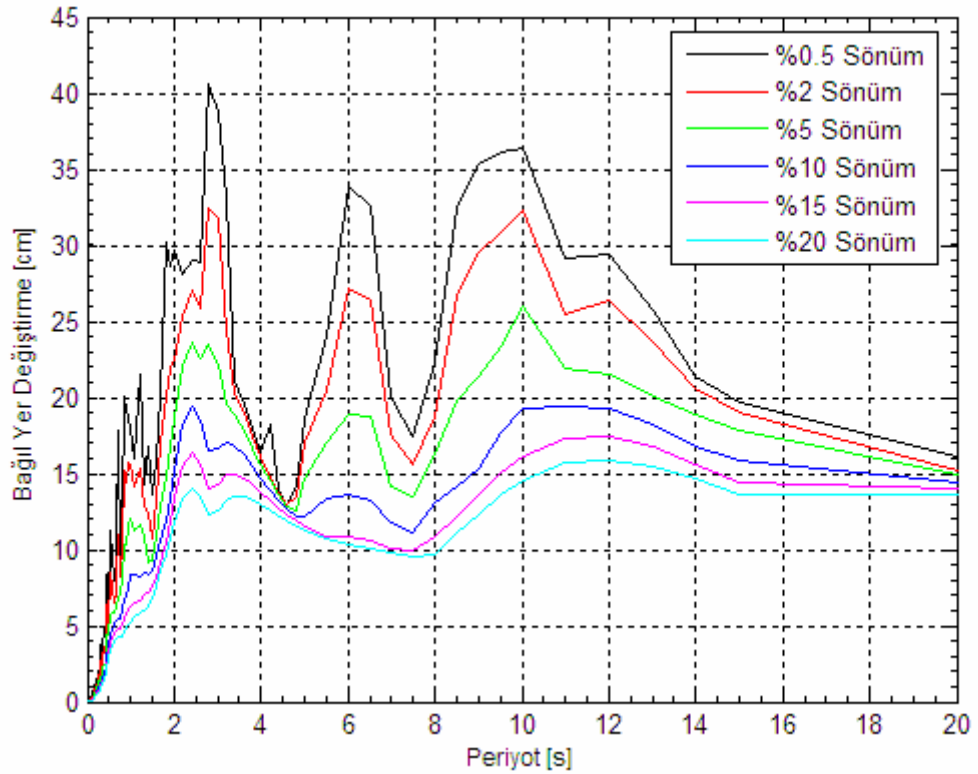
Şekil B.11 : Mutlak ivme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)



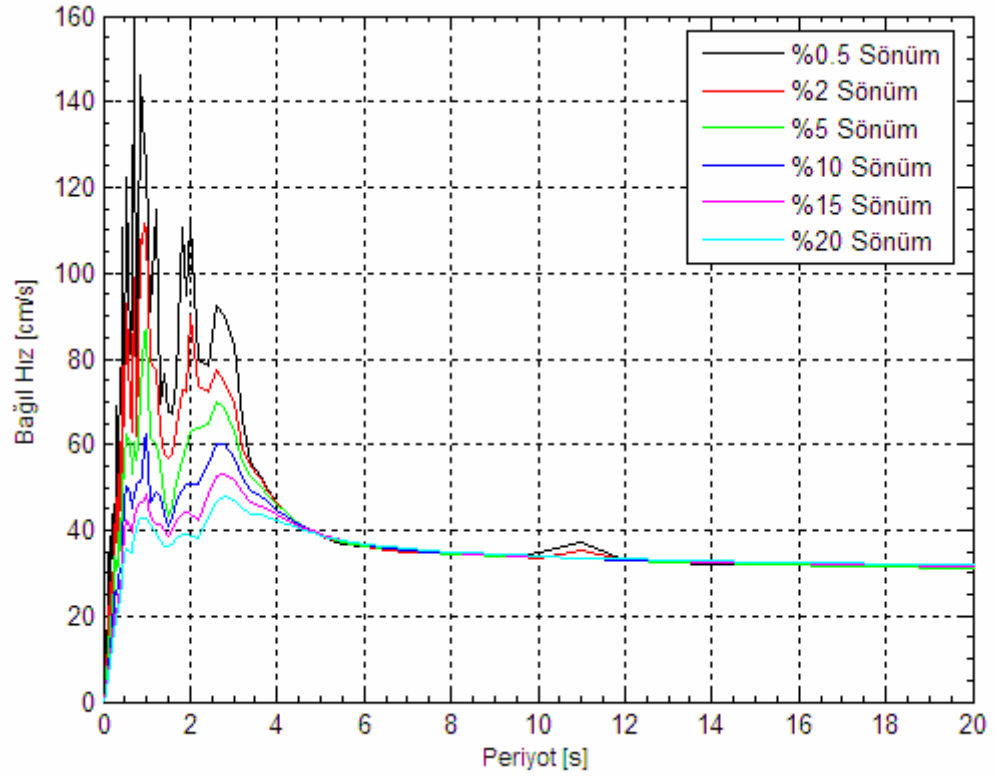
Şekil B.12 : Sözde mutlak ivme spektrumu (Erzincan, 1999 - Erzincan DB)



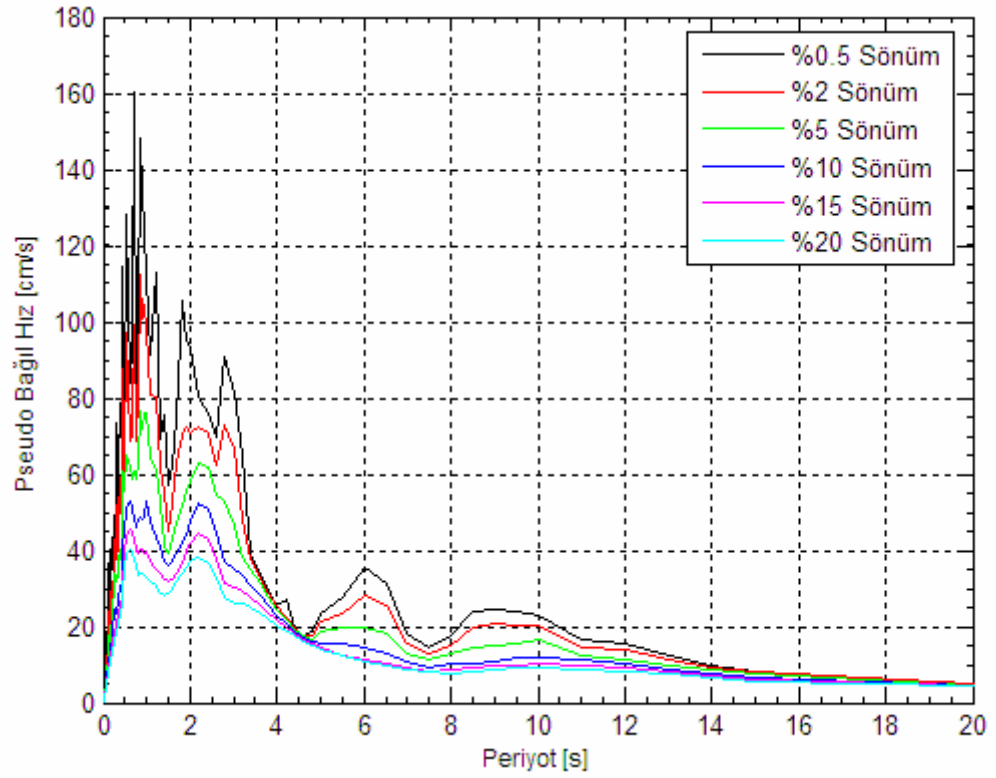
Şekil B.13 : İvme-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)



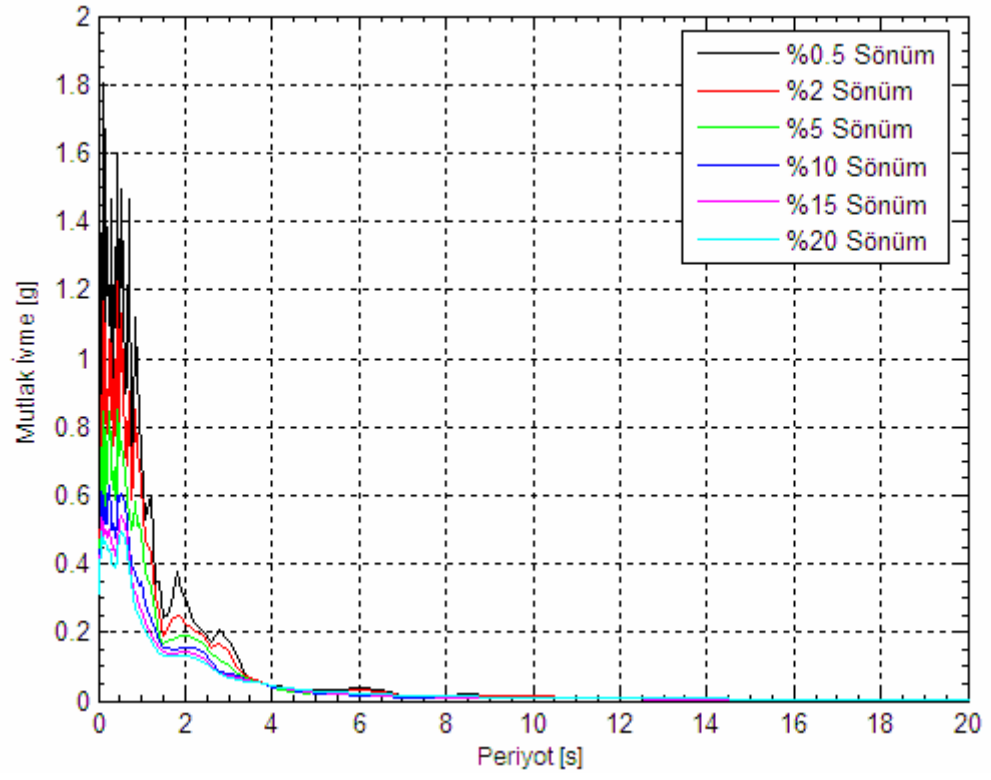
Şekil B.14 : Göreli yer değiştirme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)



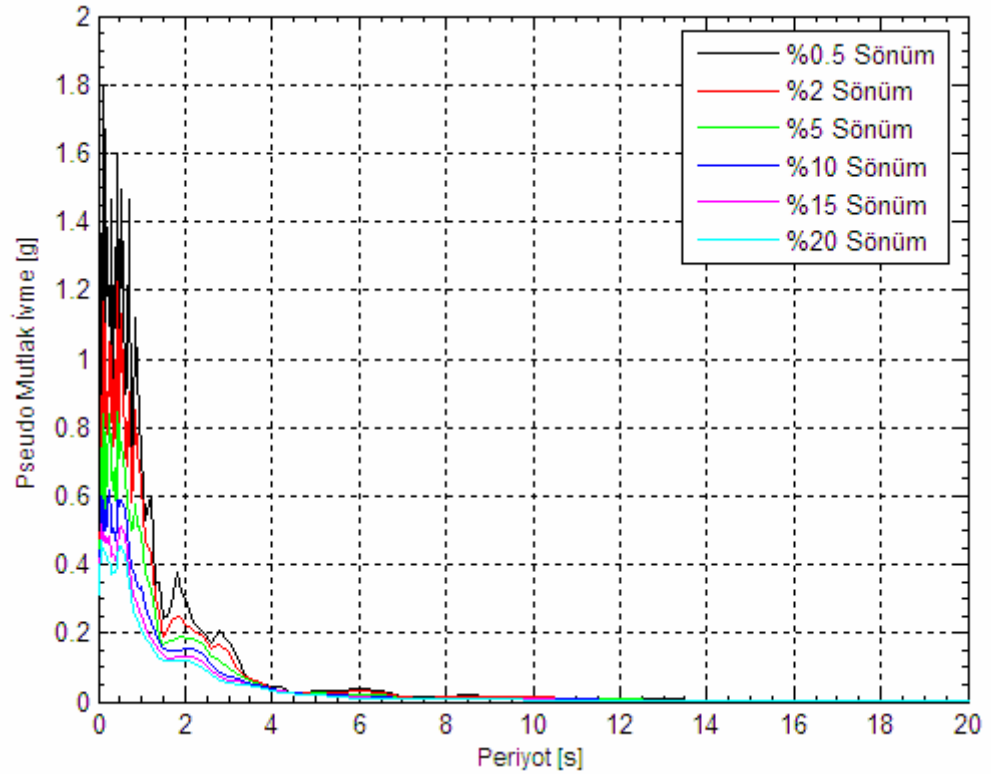
Şekil B.15 : Görelî hız spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)



Şekil B.16 : Görelî hız spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)

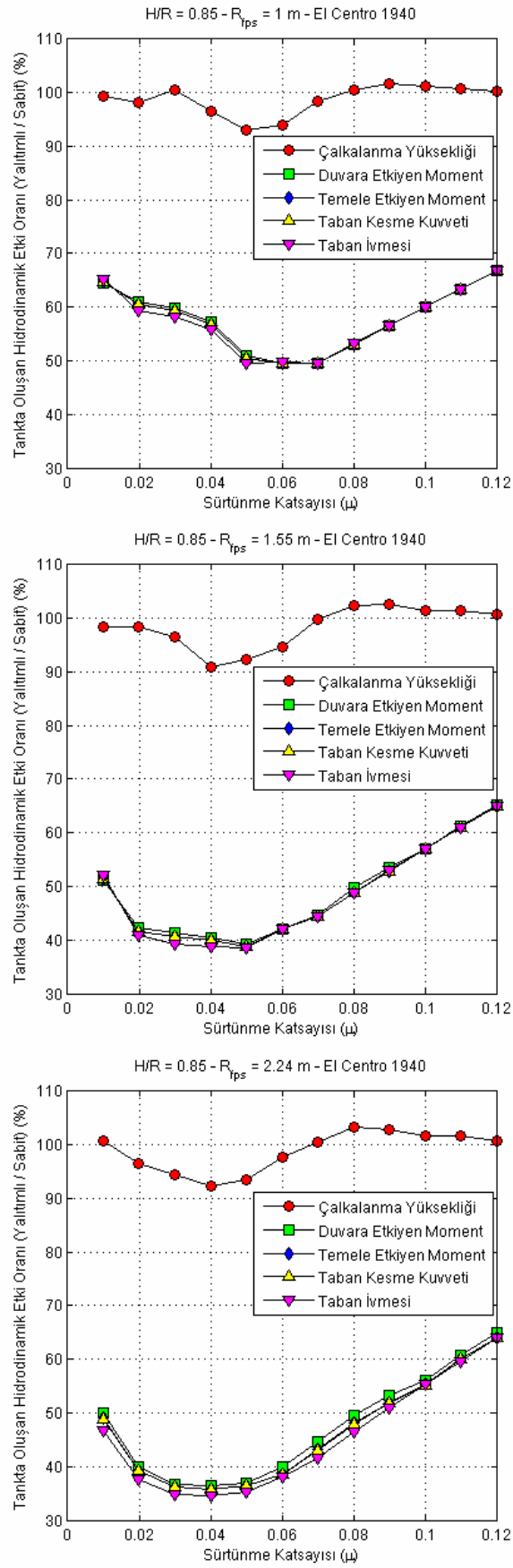


Şekil B.17 : Mutlak ivme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)

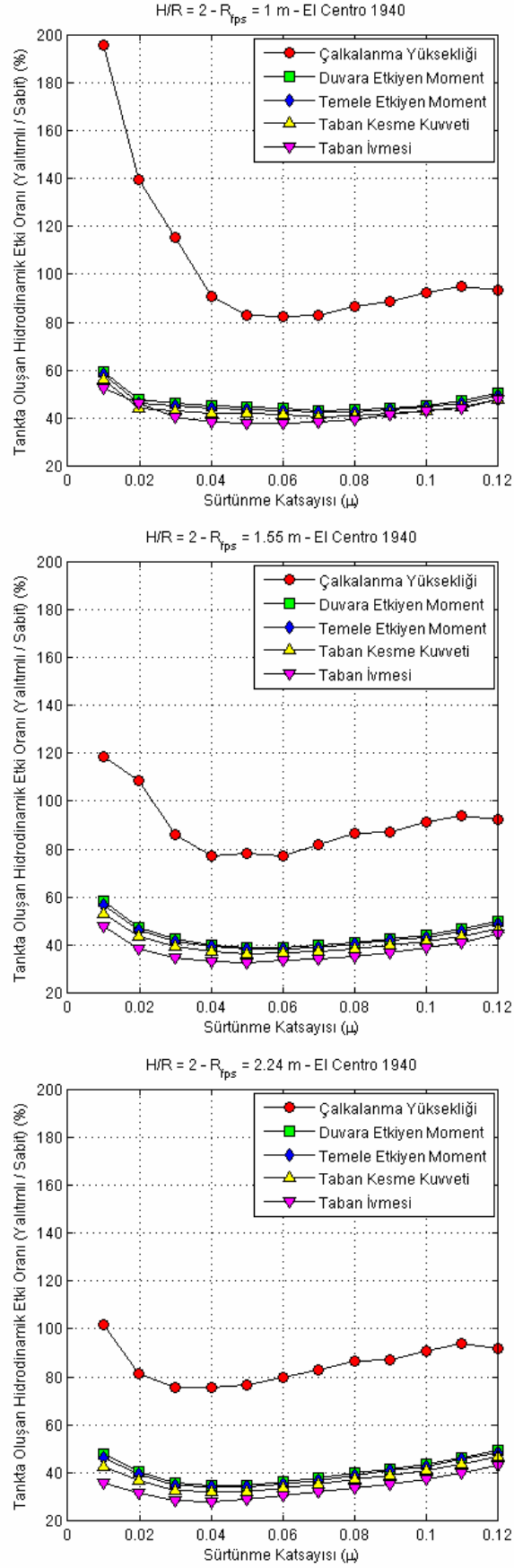


Şekil B.18 : Sözde mutlak ivme spektrumu (Imperial Valley, 1940 – El Centro KG)

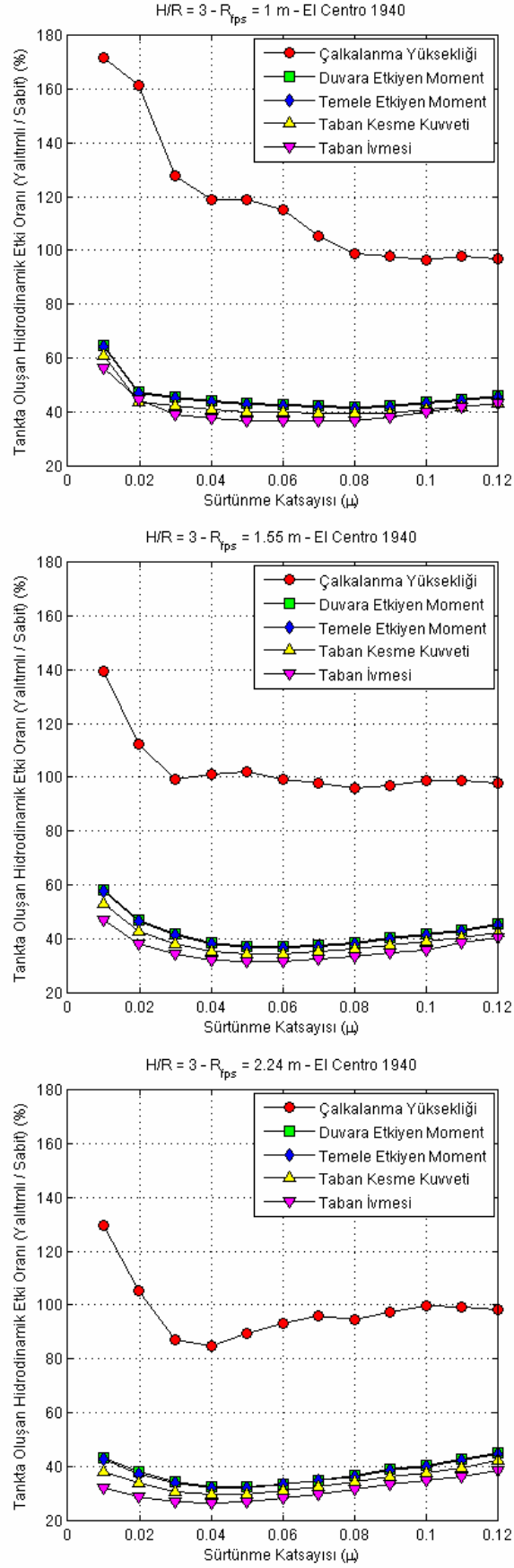
**EK C. SÜRTÜNMELİ SARKAÇ MESNETLİ SIVI DEPOLARI İÇİN
0.4 G'YE ÖLÇEKLENMİŞ İVME KAYITLARININ KULLANILDIĞI
ÇALIŞMANIN SONUÇLARI**



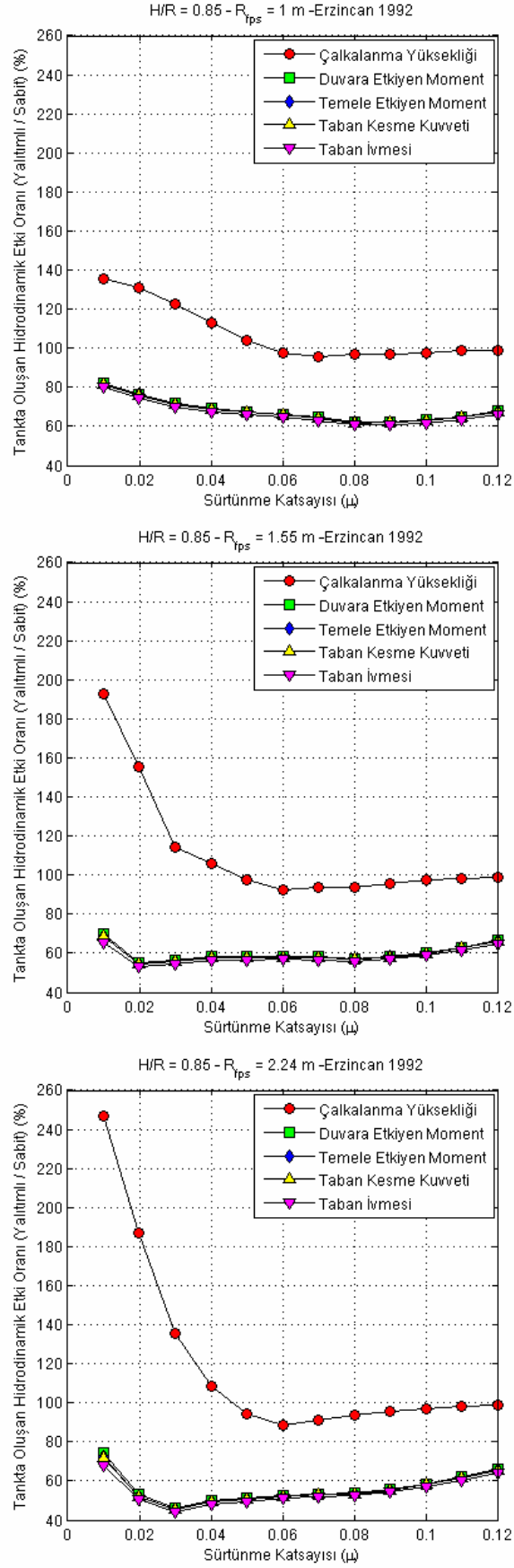
Şekil C.1 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro (0.4g)}$)



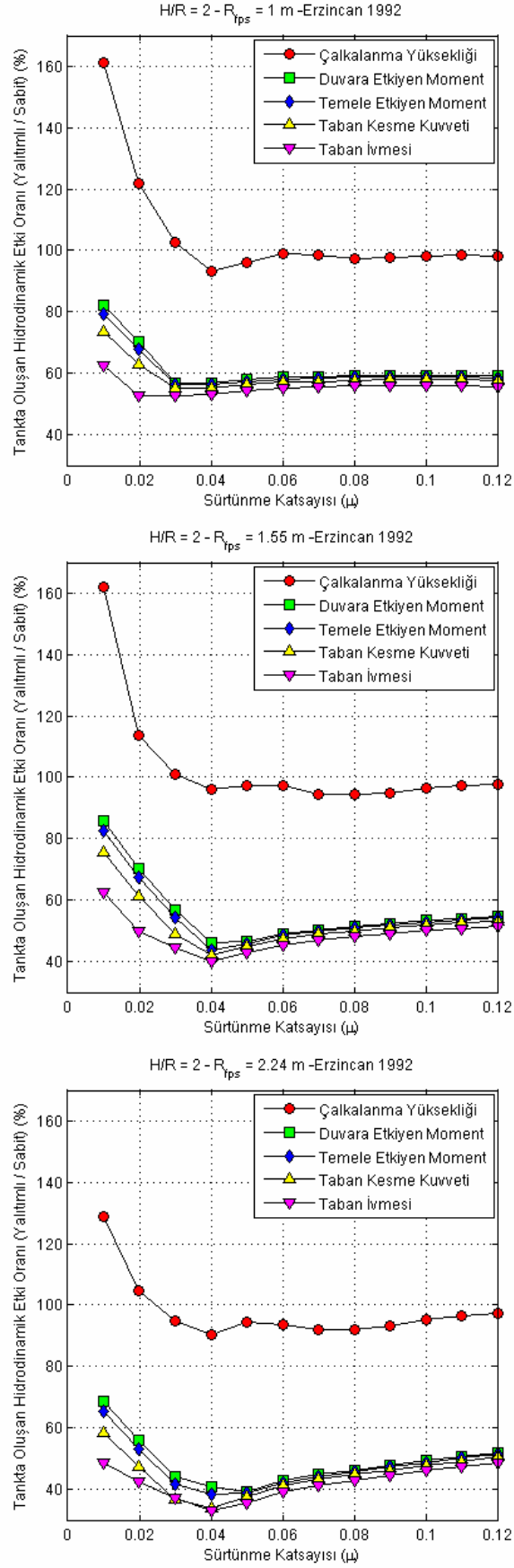
Şekil C.2 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{El Centro (0.4g)}$)



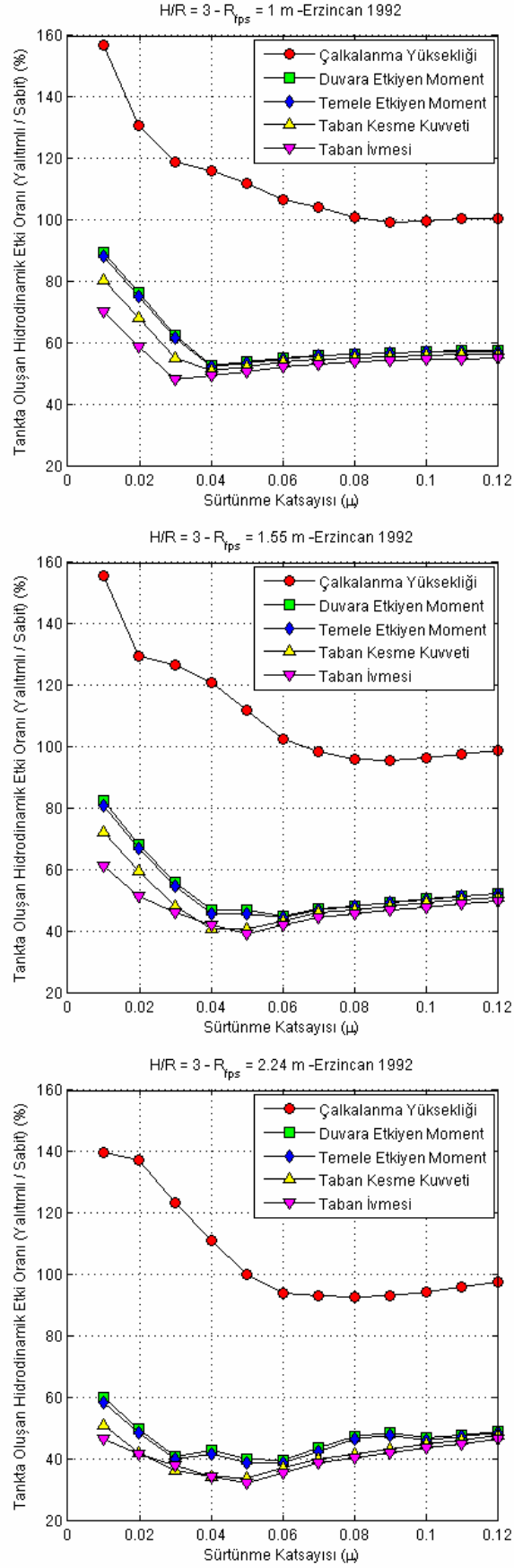
Şekil C.3 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – El Centro (0.4g))



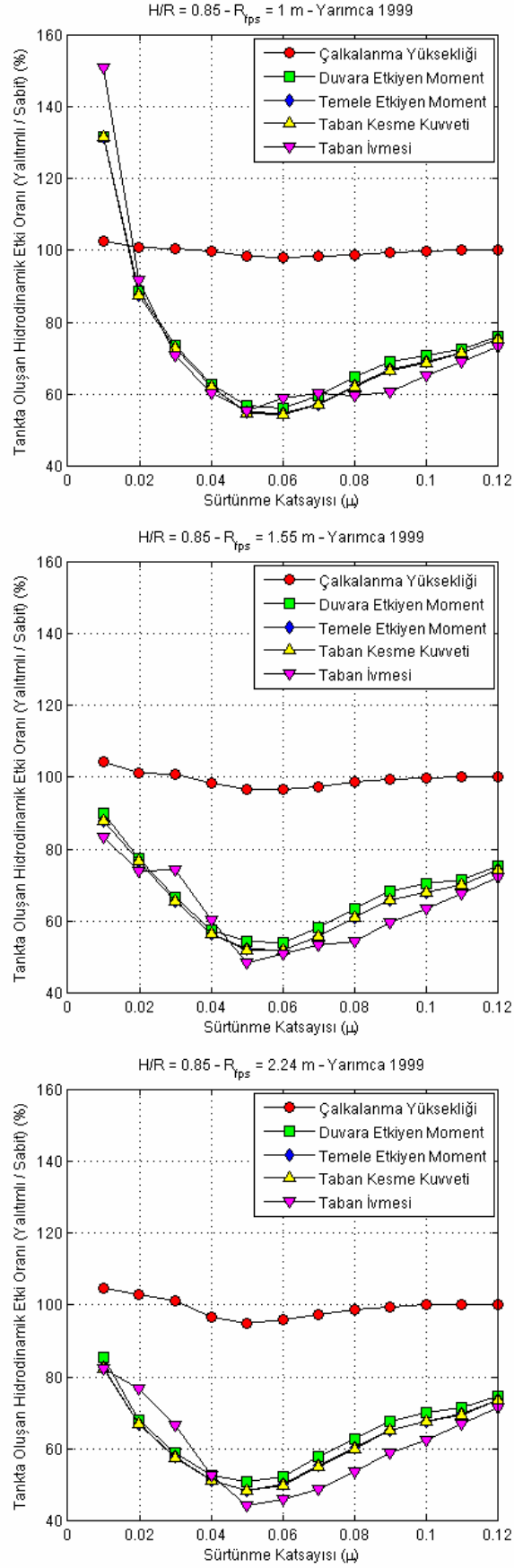
Şekil C.4 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan } (0.4g)$)



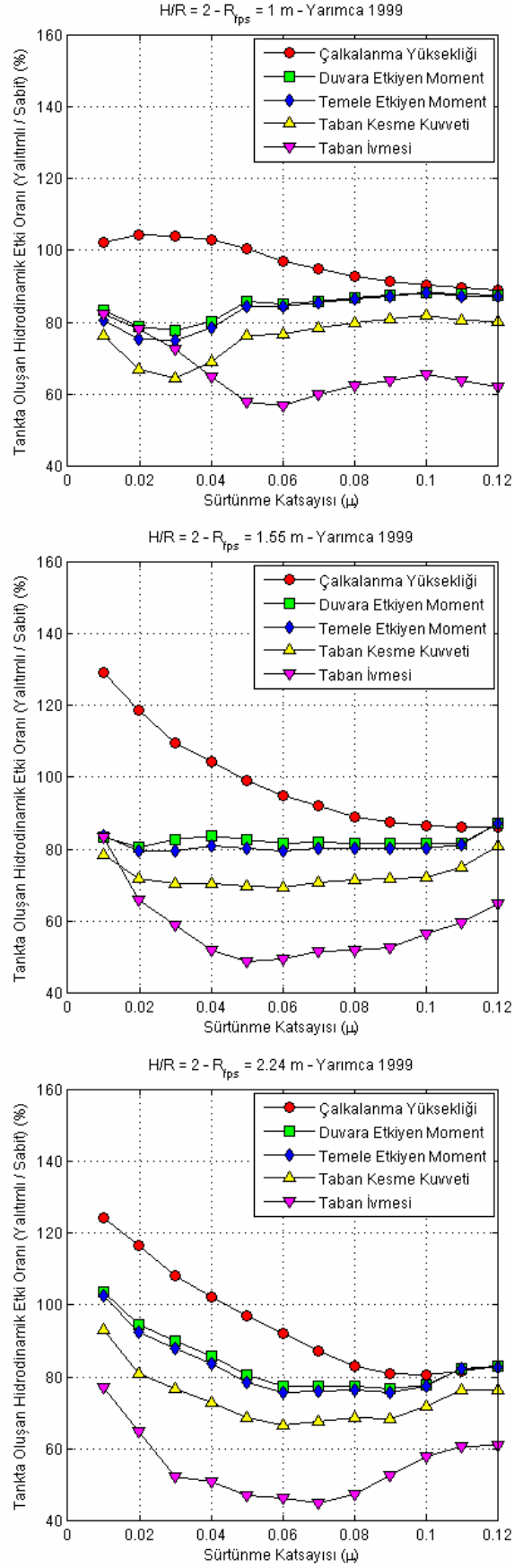
Şekil C.5 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Erzincan (0.4g))



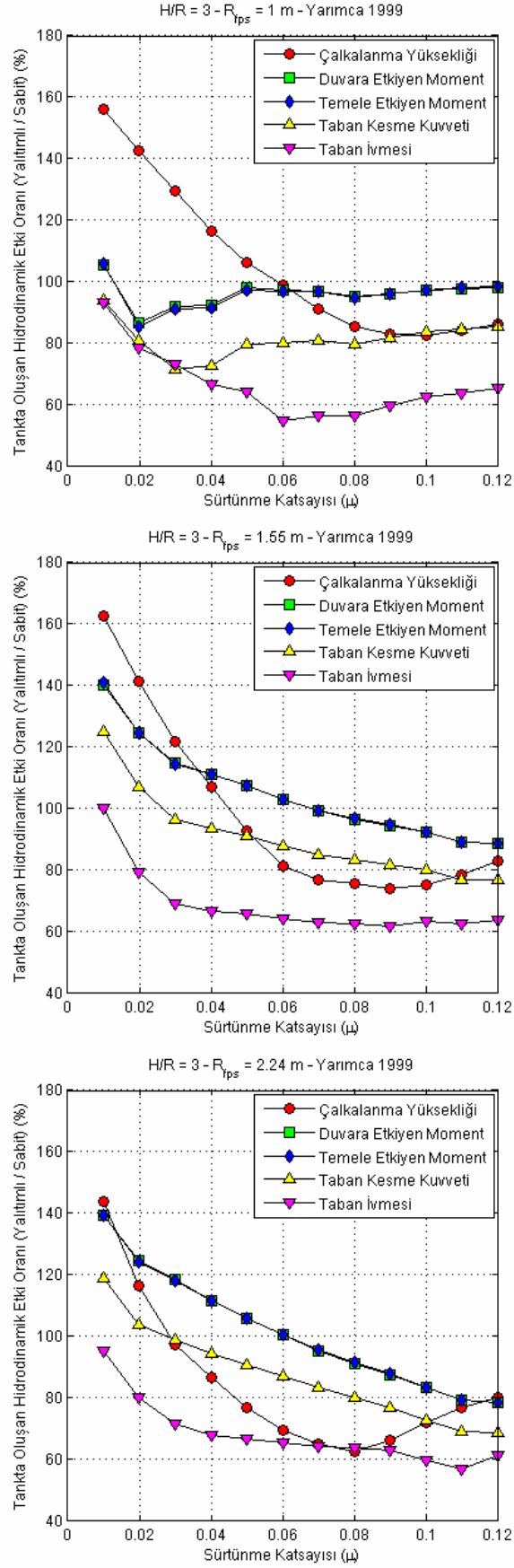
Şekil C.6 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Erzincan (0.4g))



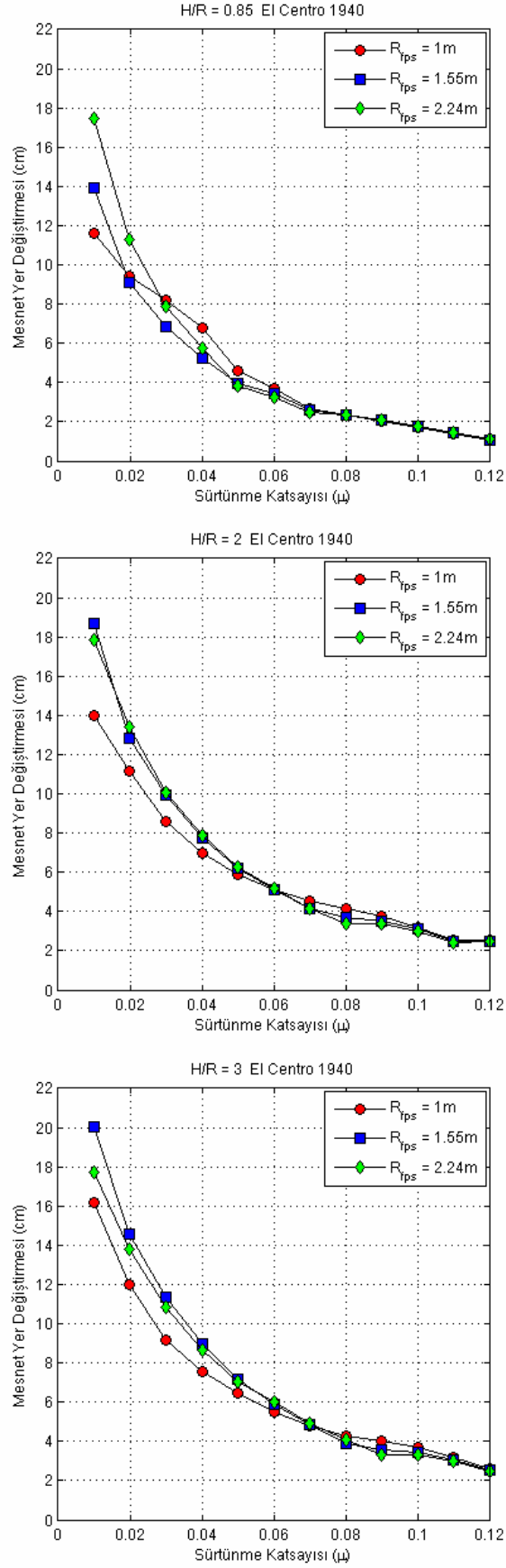
Şekil C.7 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Yarımca (0.4g))



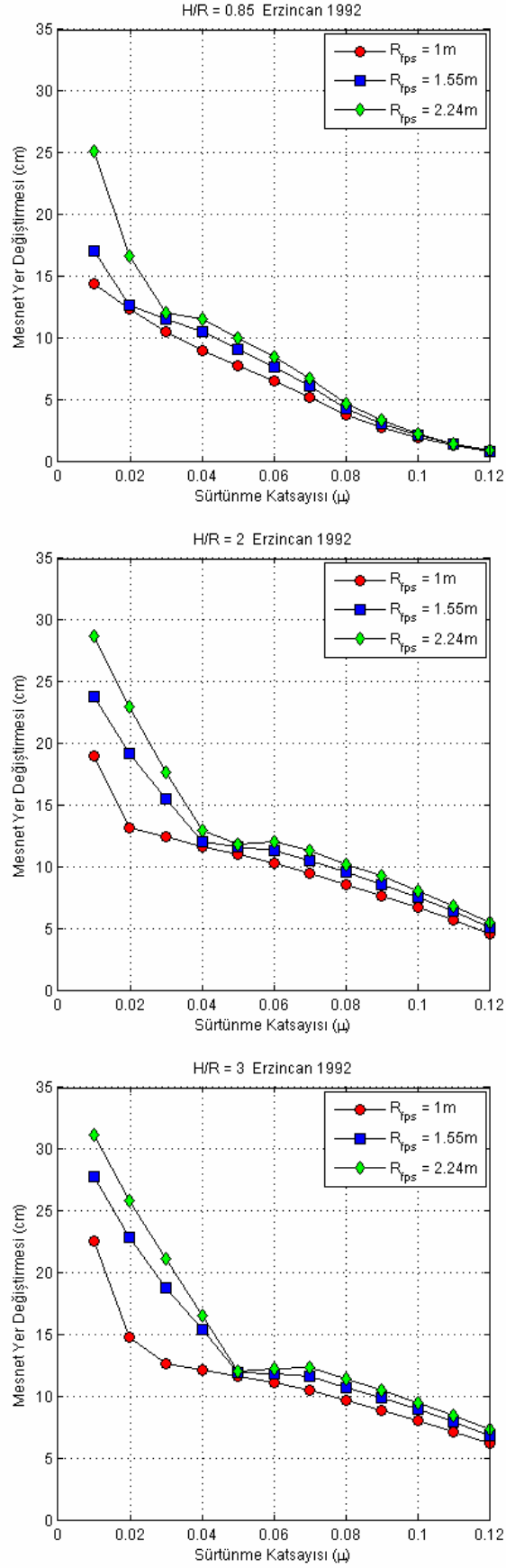
Şekil C.8 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Yarımcı } (0.4g)$)



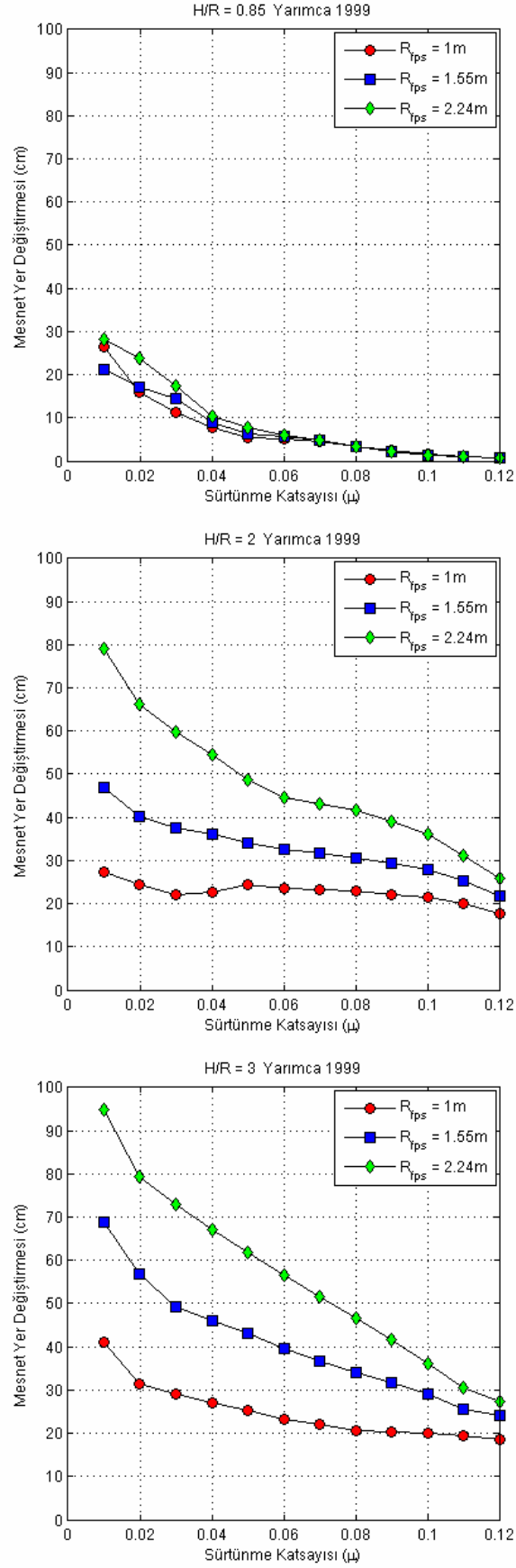
Şekil C.9 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Yarımcı } (0.4g)$)



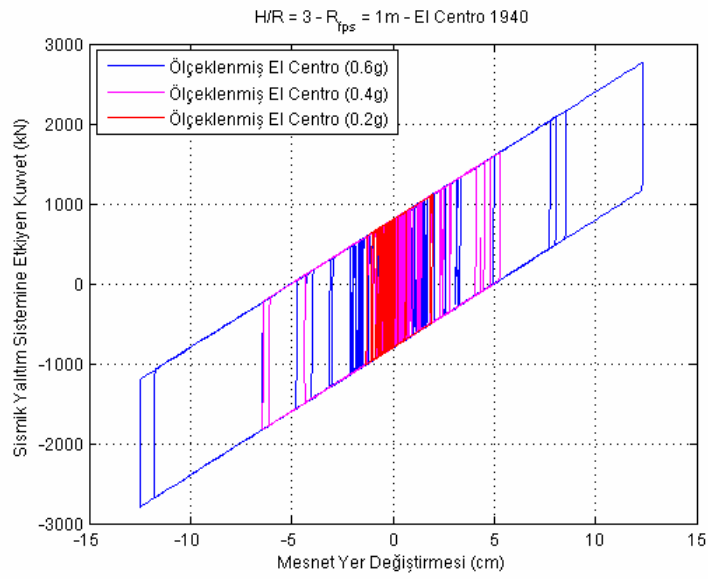
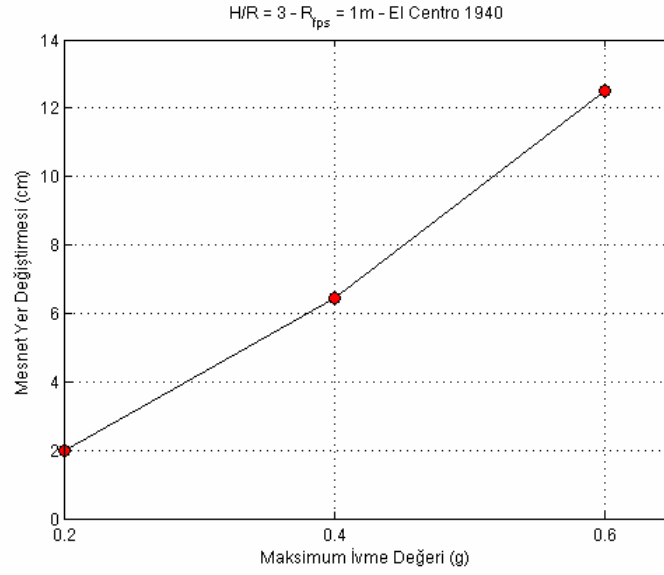
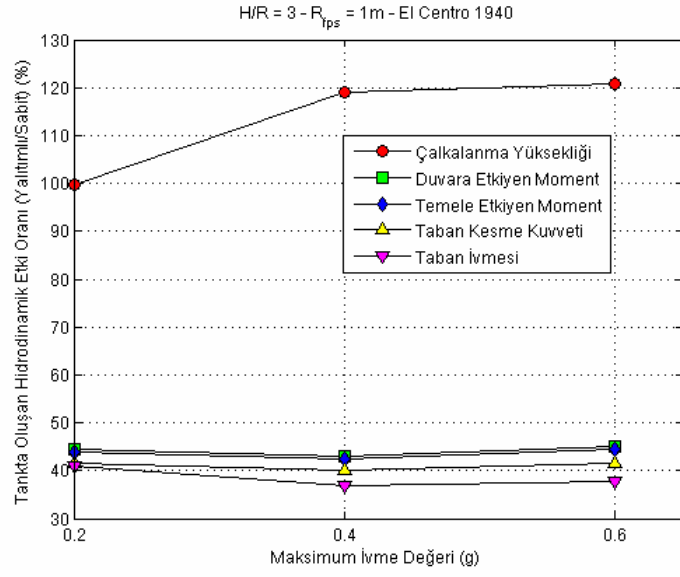
Şekil C.10 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (El Centro (0.4g))



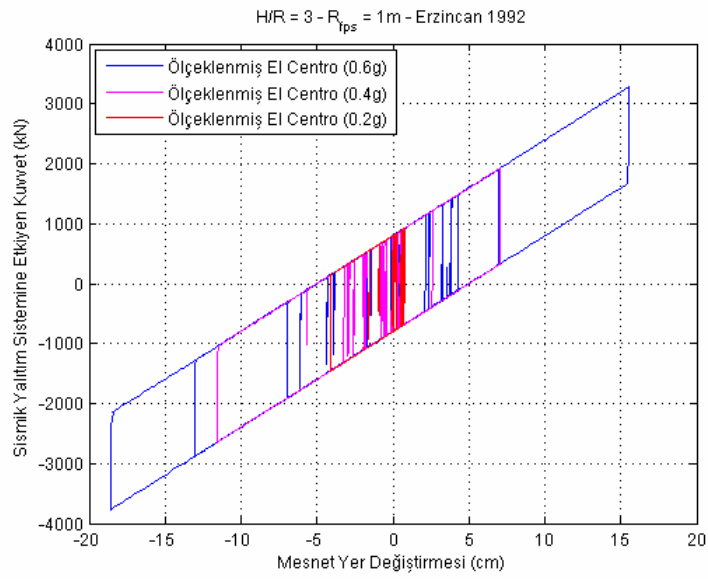
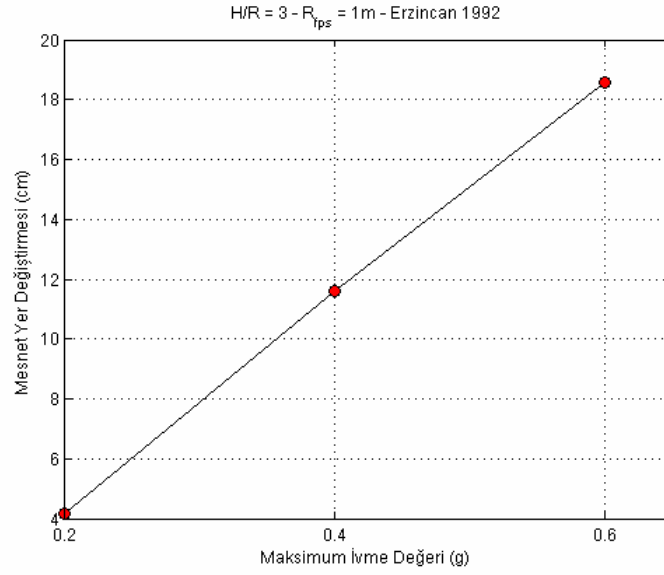
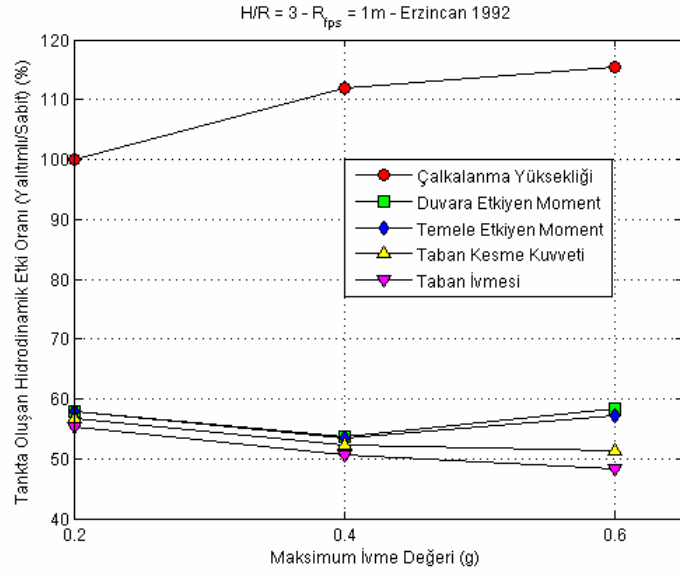
Şekil C.11 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Erzincan (0.4g))



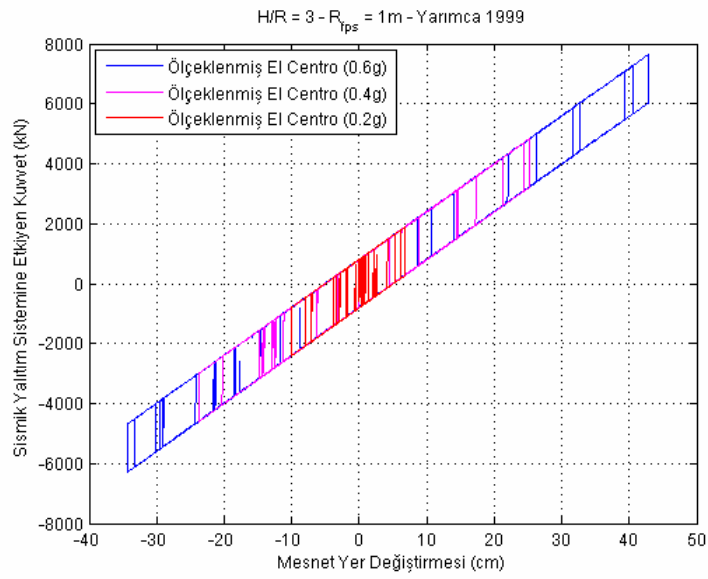
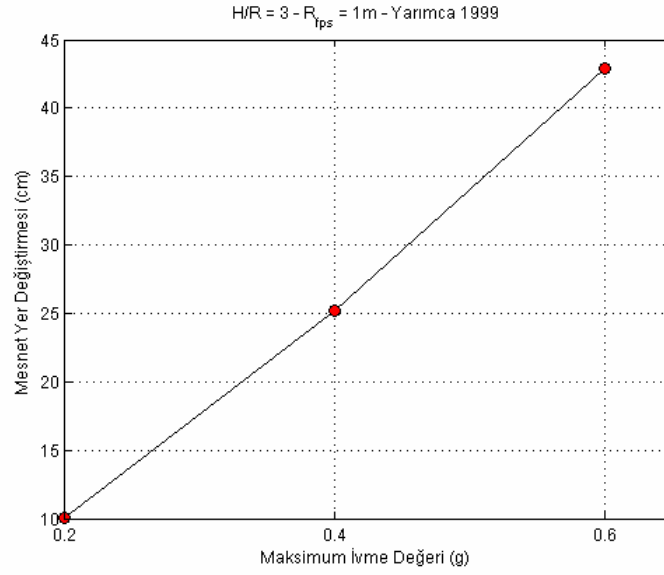
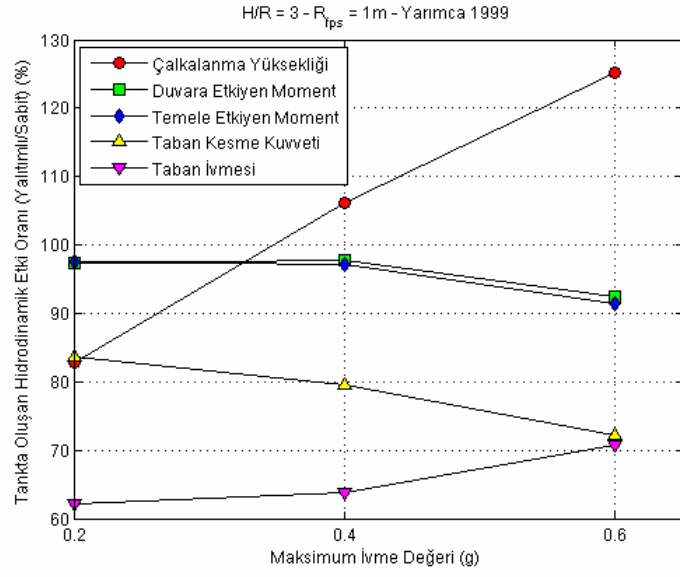
Şekil C.12 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Yarımcı (0.4g))



Şekil C.13 : Maksimum yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
(H/R = 3 - $R_{fps} = 1$ m - $\mu = 0.05$ - El Centro (0.4g))

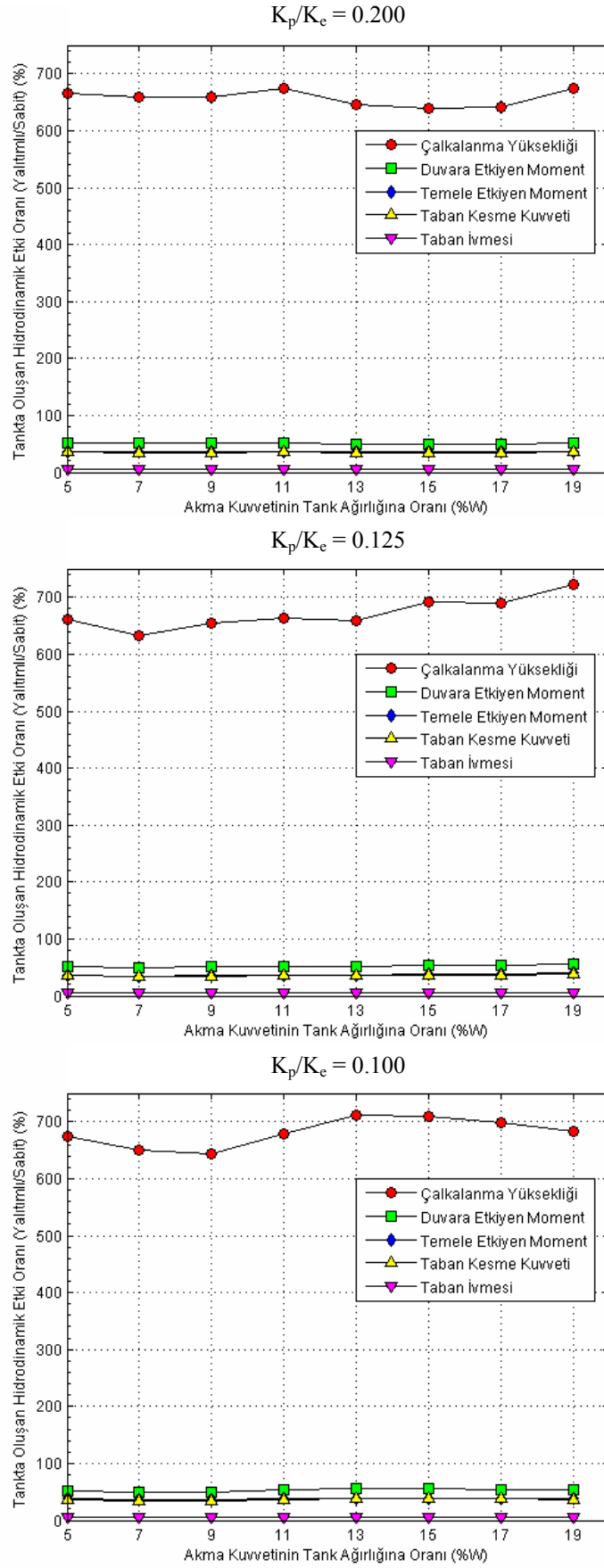


Şekil C.14 : Maksimum yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
(H/R = 3 - R_{fps} = 1m - μ = 0.05 - Erzincan (0.4g))

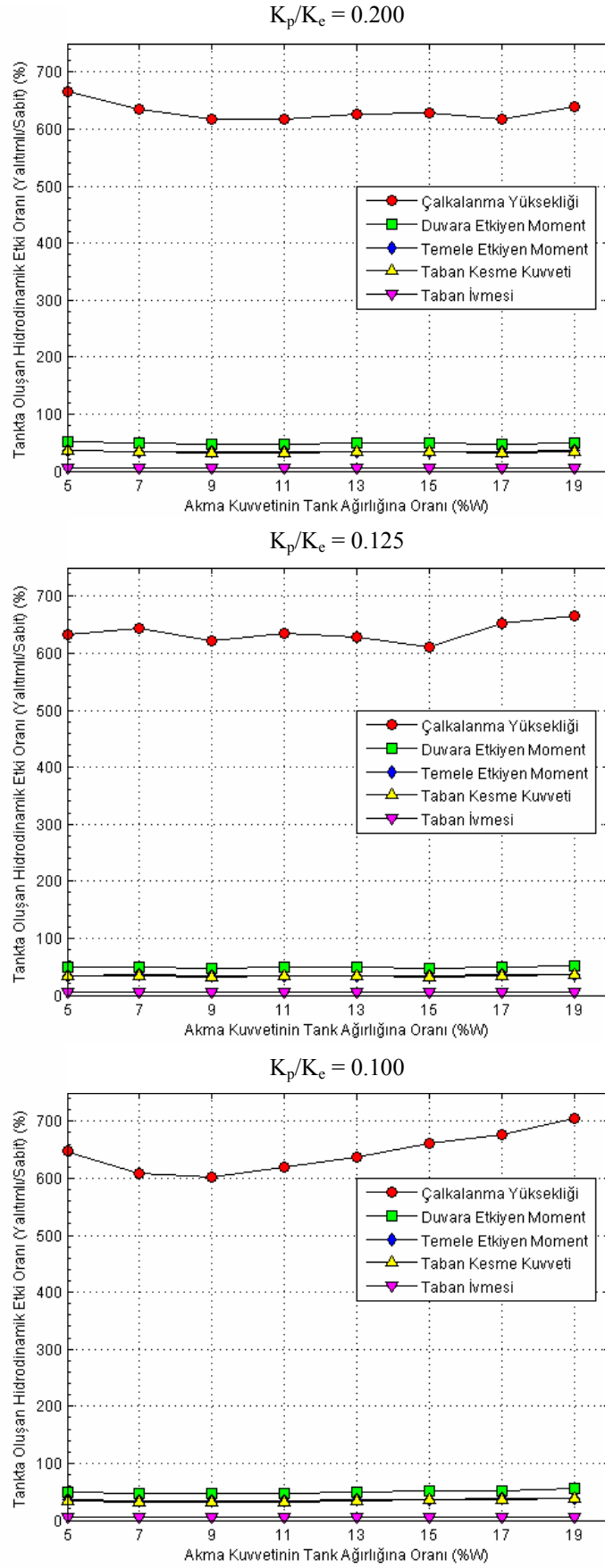


Şekil C.15 : Maksimum yer ivmesinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi
 $(H/R = 3 - R_{fps} = 1 \text{ m} - \mu = 0.05 - \text{Yarımca } (0.4g))$

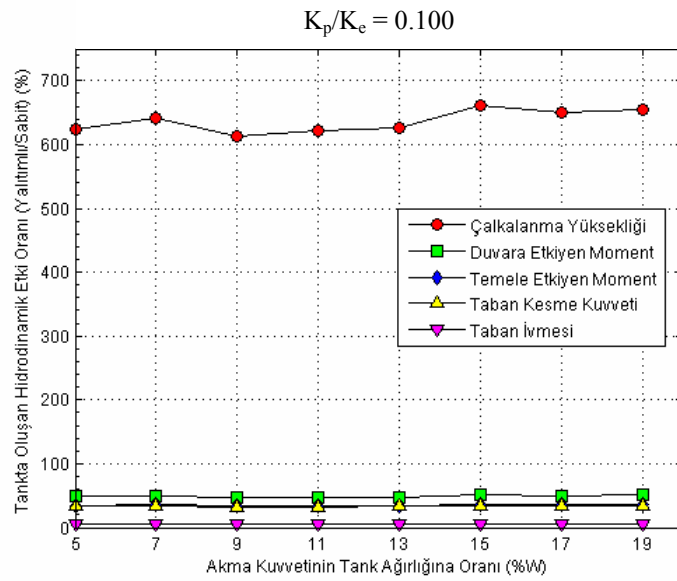
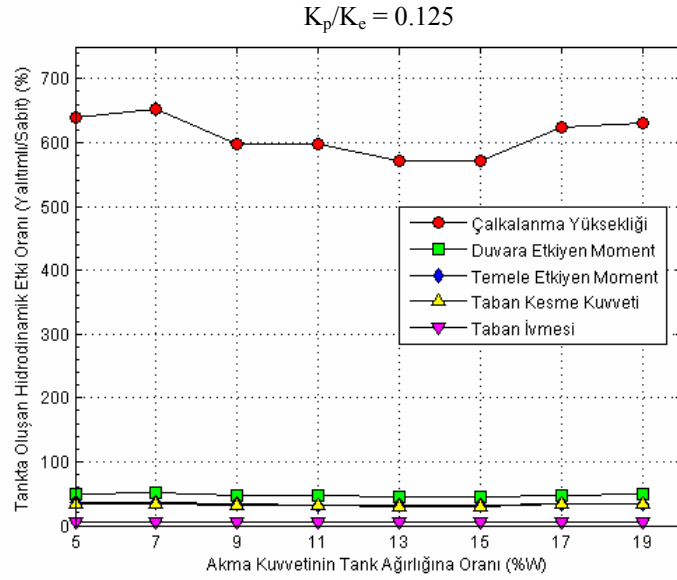
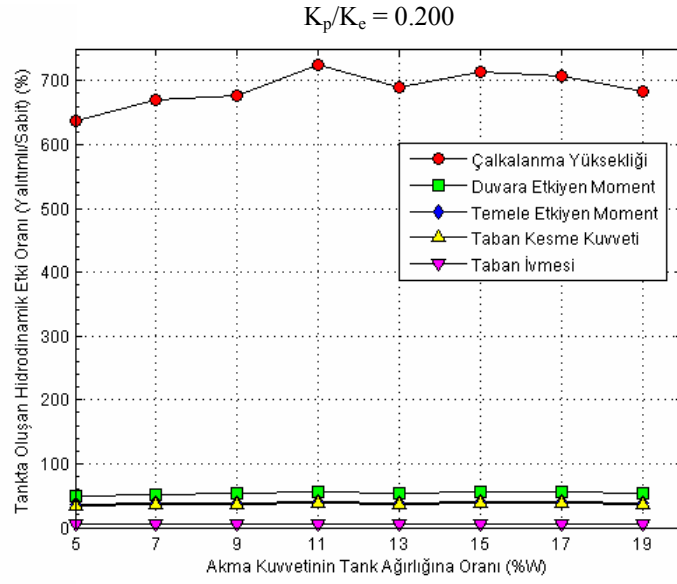
**EK D. KURŞUN ÇEKİRDEKLİ ELASTOMER MESNETLİ SIVI DEPOLARI
İÇİN 0.4G'YE ÖLÇEKLENMİŞ İVME KAYITLARININ KULLANILDIĞI
ÇALIŞMANIN SONUÇLARI**



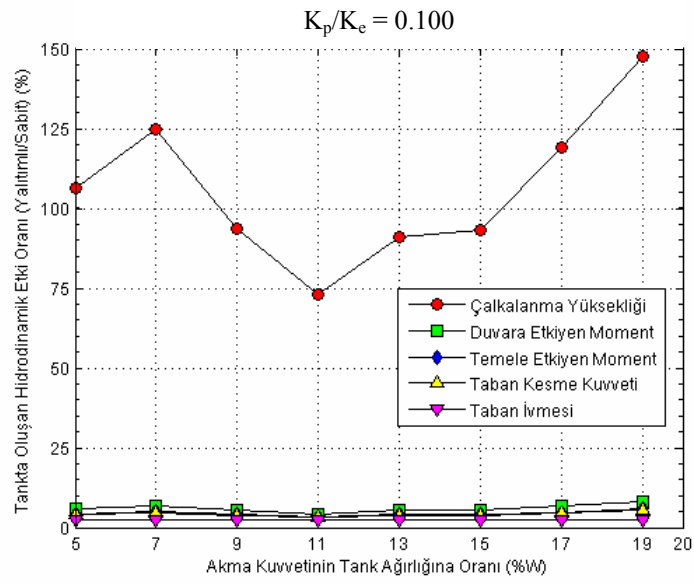
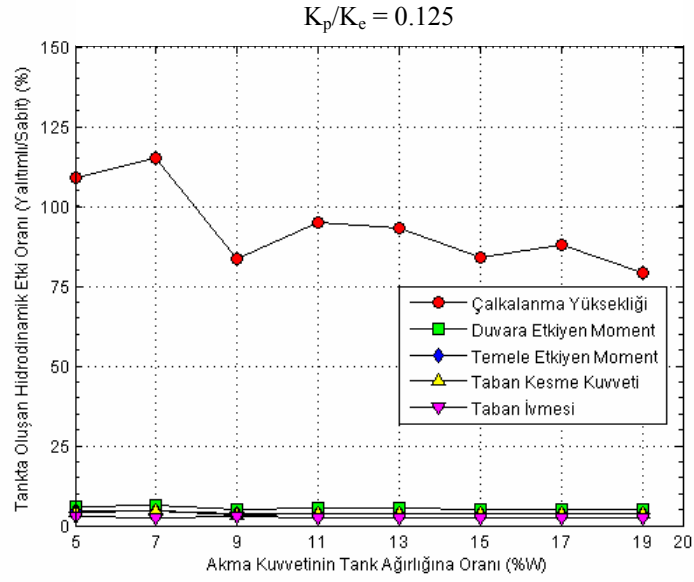
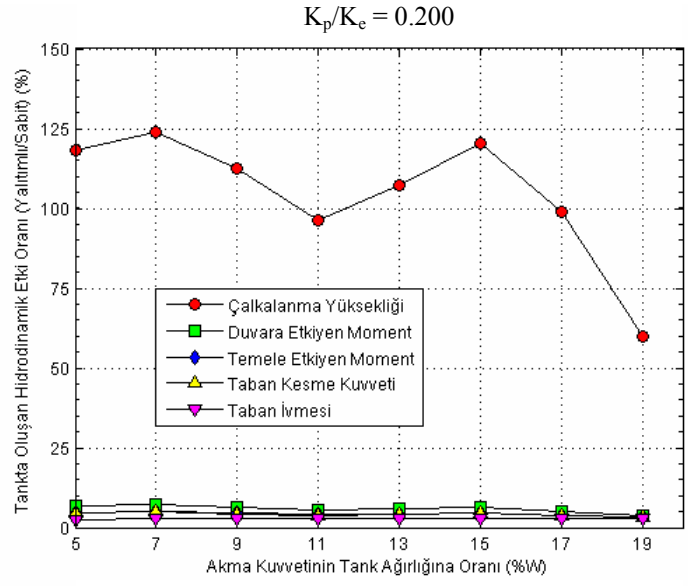
Şekil D.1 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - El Centro$)



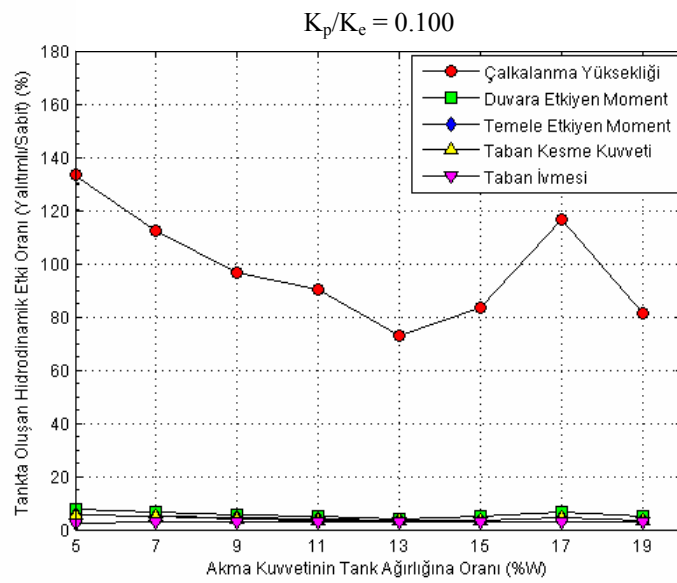
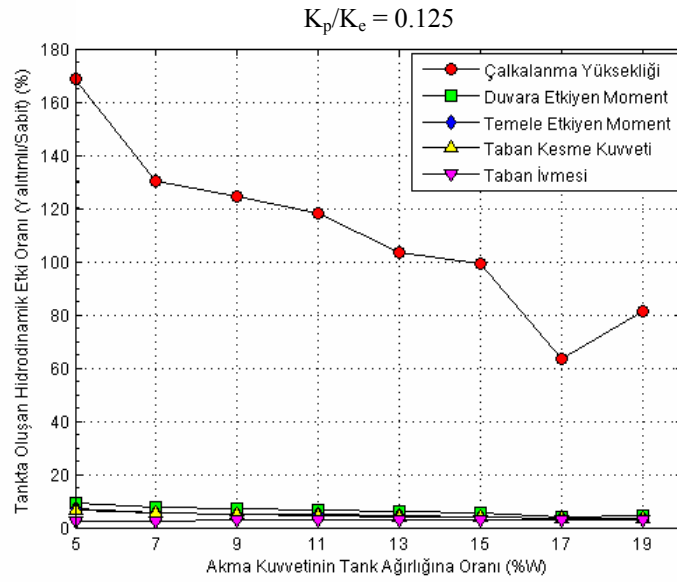
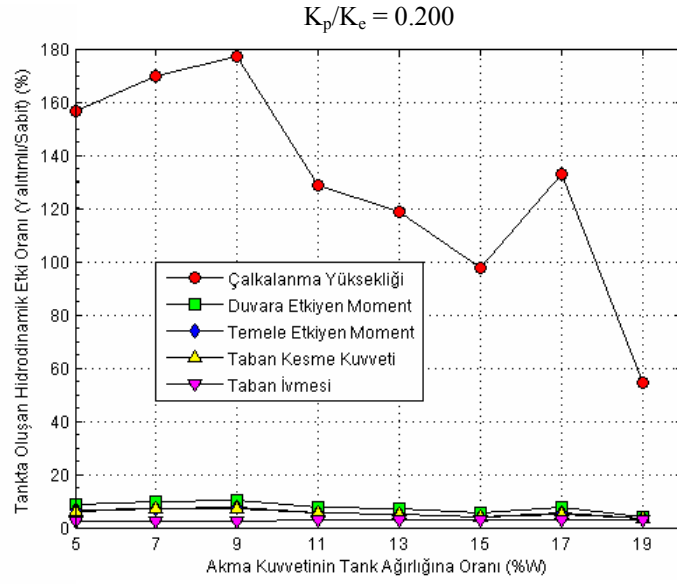
Şekil D.2 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - El$ Centro)



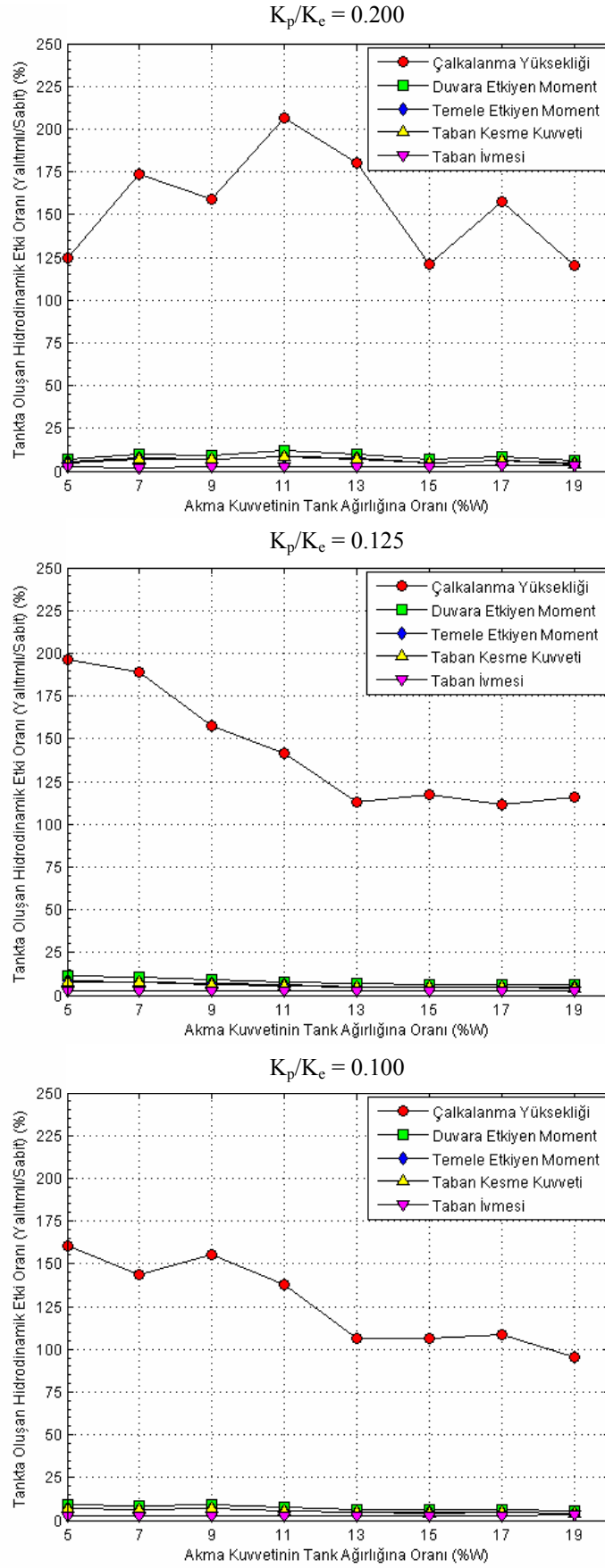
Şekil D.3 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - El Centro$)



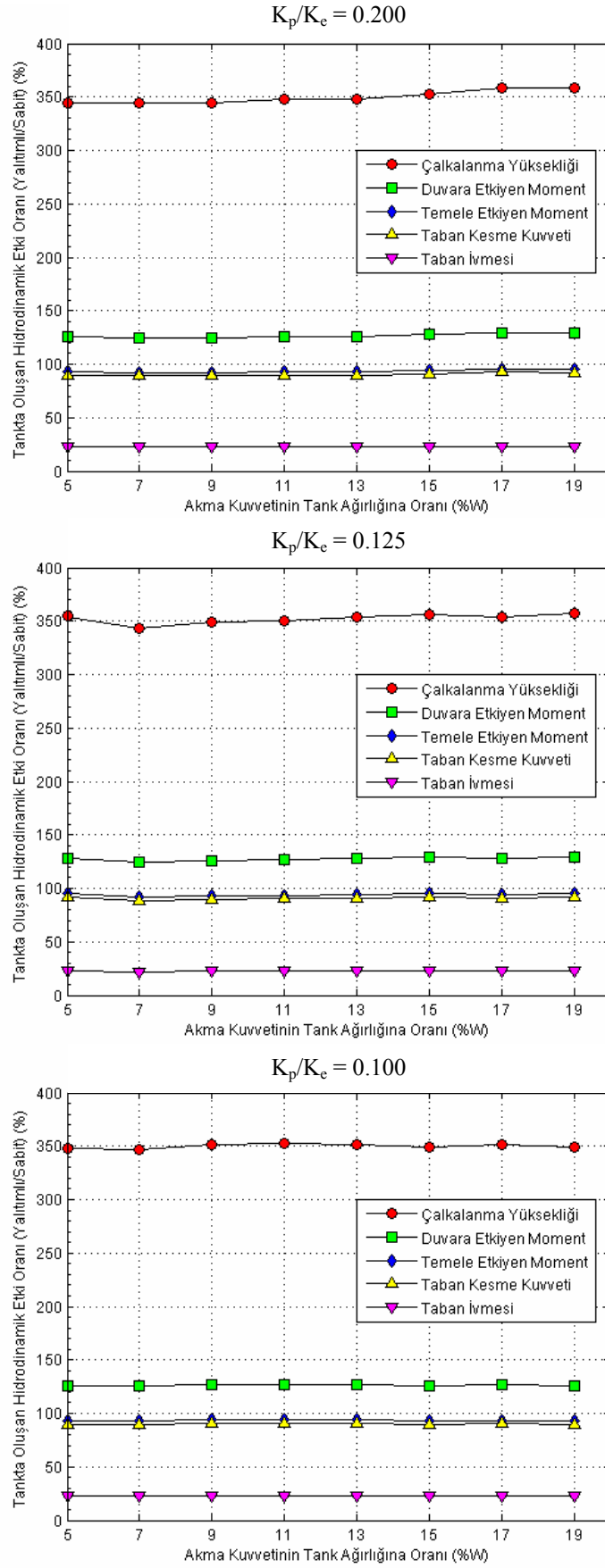
Şekil D.4 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s$ – Erzincan)



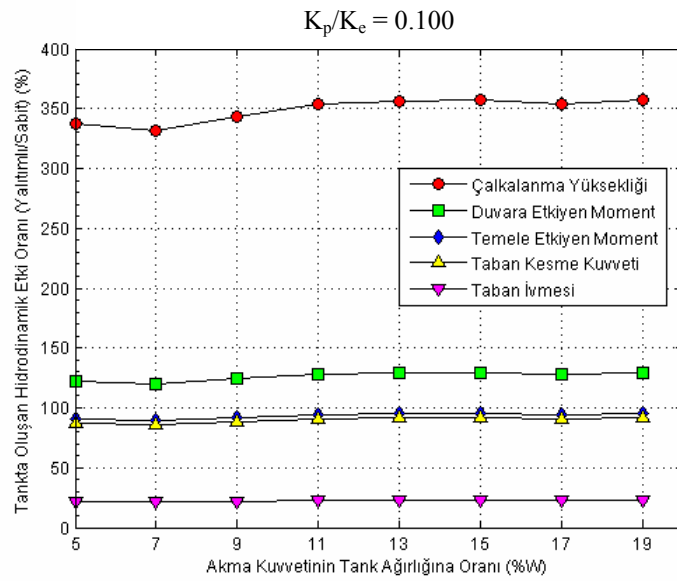
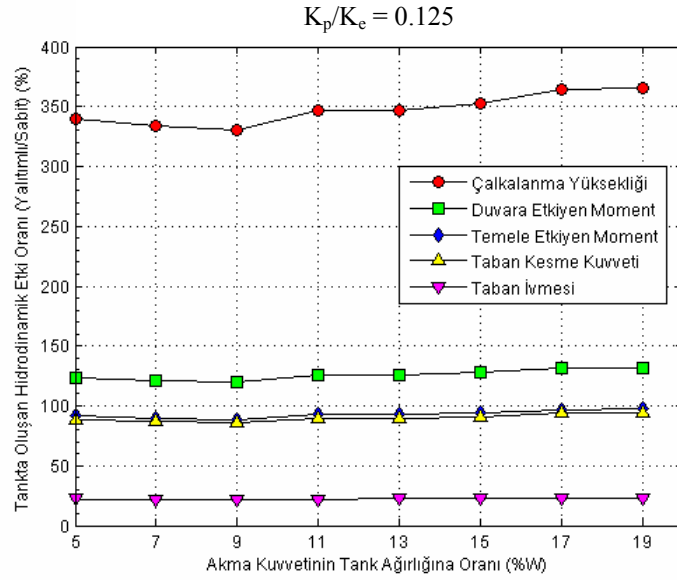
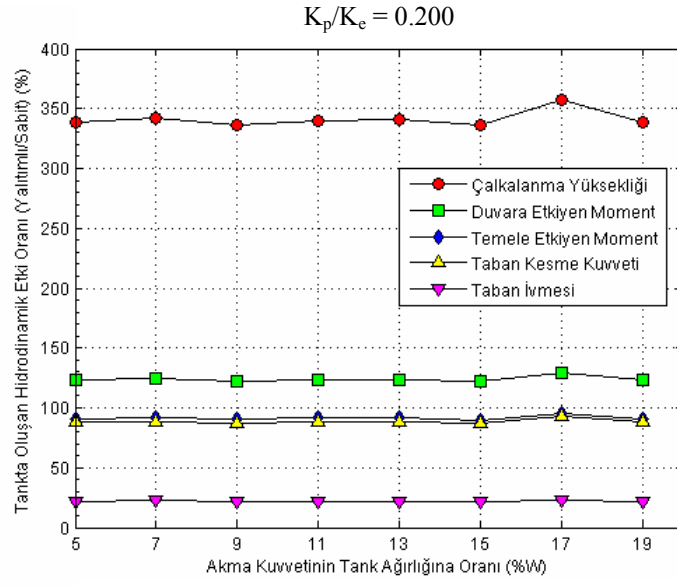
Şekil D.5 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{Erzincan}$)



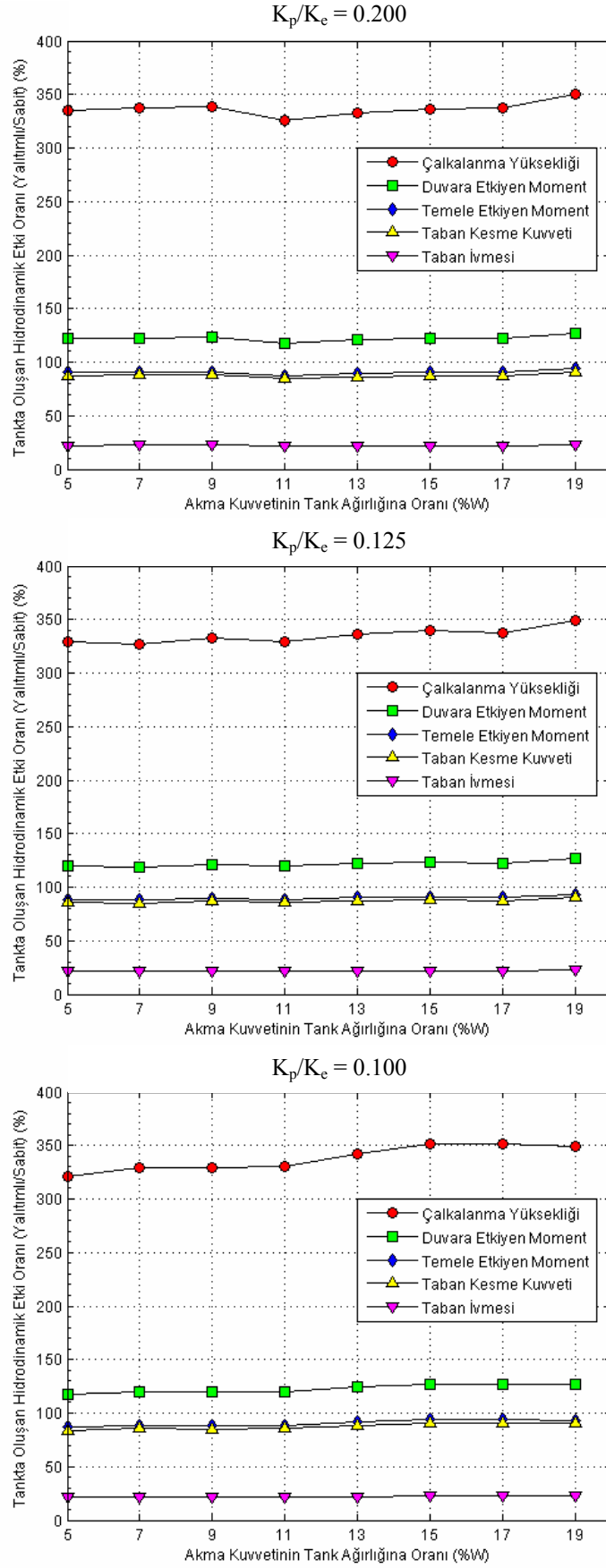
Şekil D.6 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Erzincan)



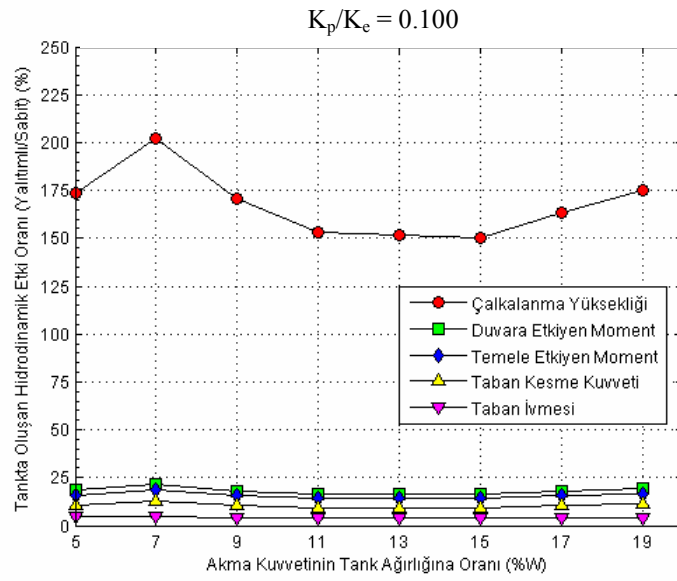
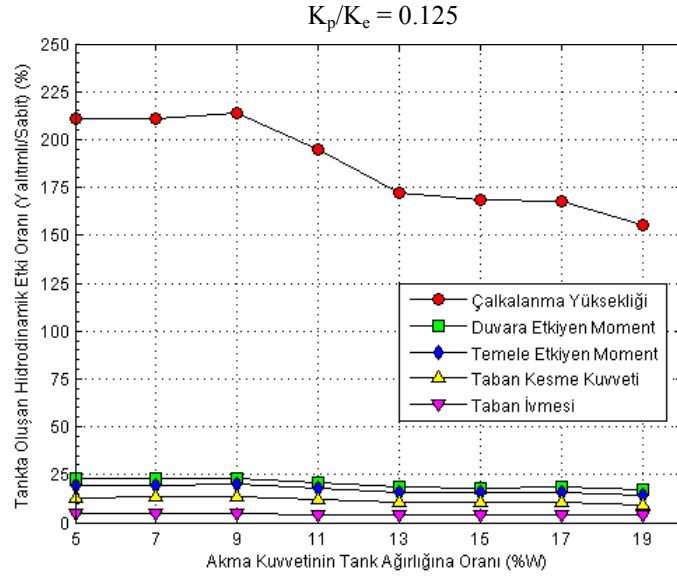
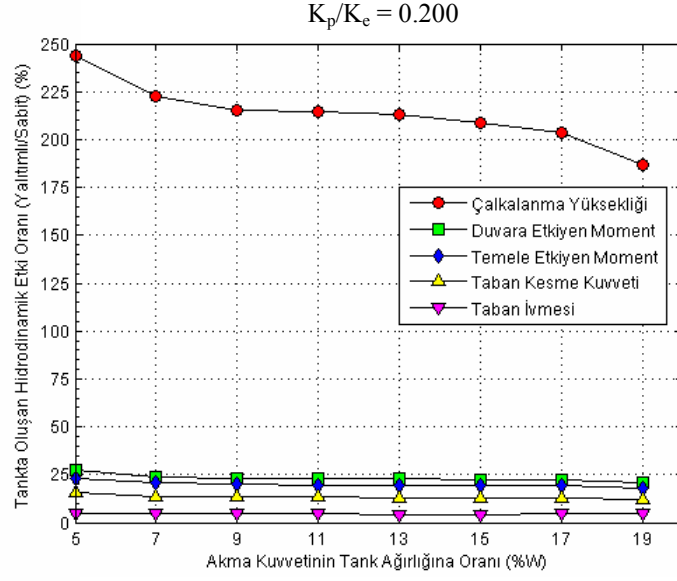
Şekil D.7 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s$ – Yarımcı)



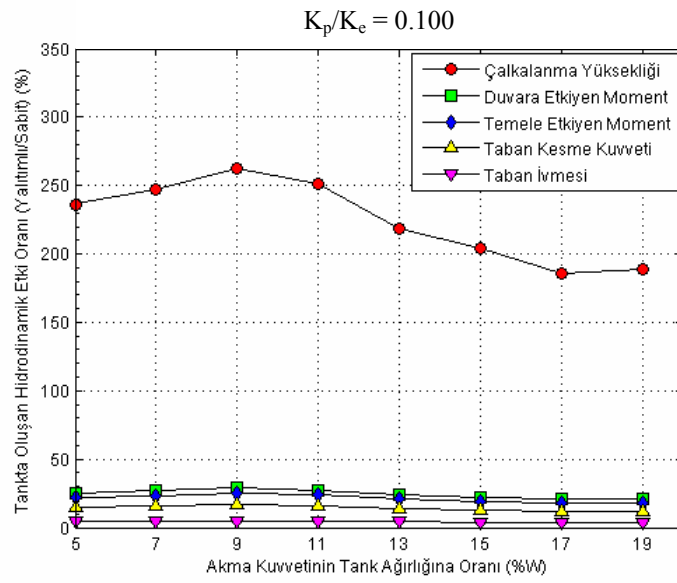
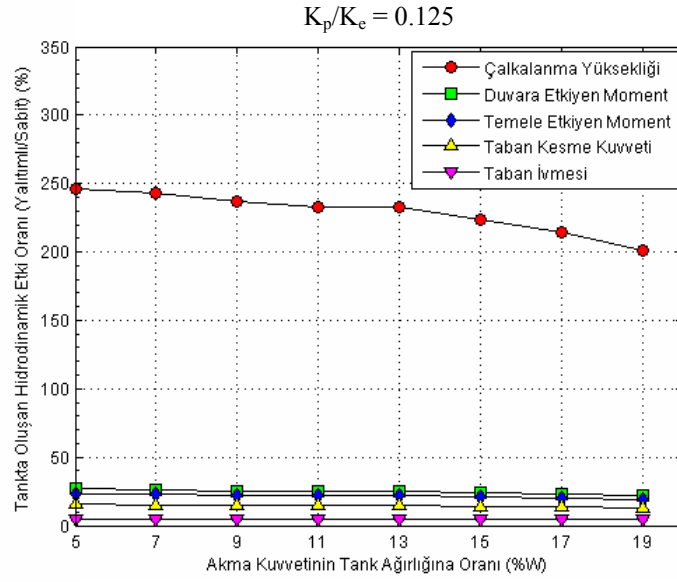
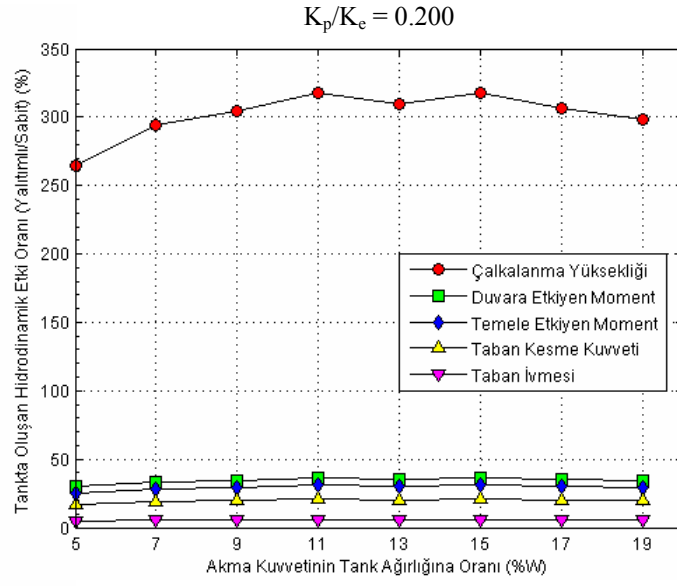
Şekil D.8 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s$ – Yarımcı)



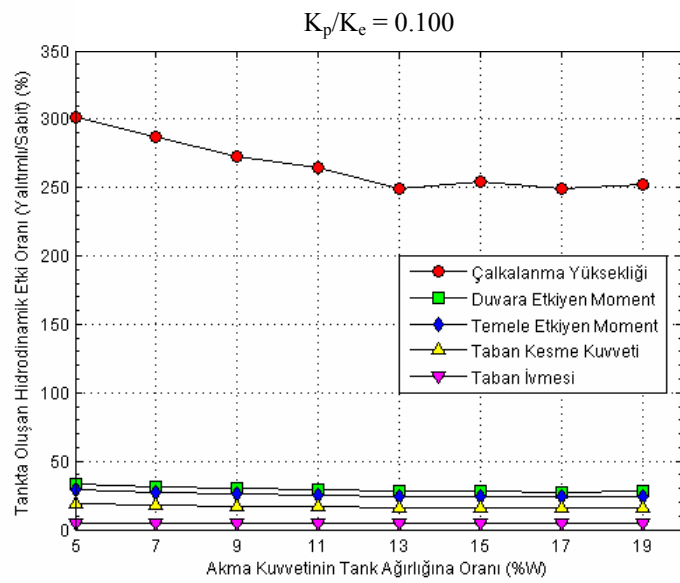
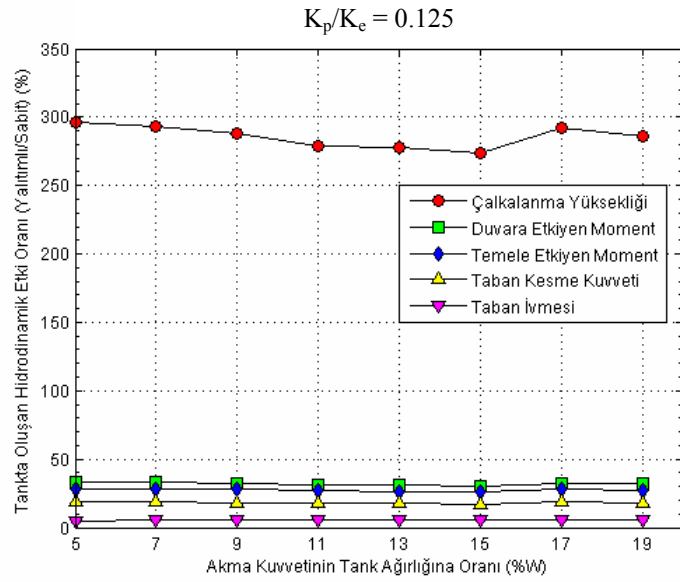
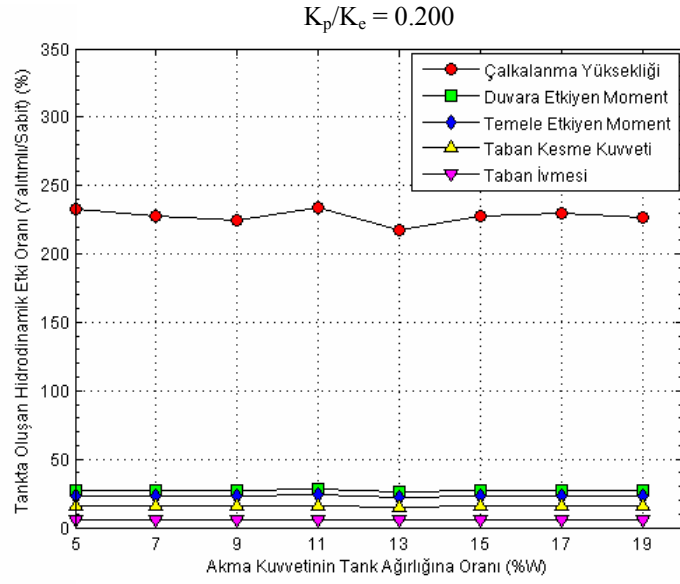
Şekil D.9 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Yarımcı)



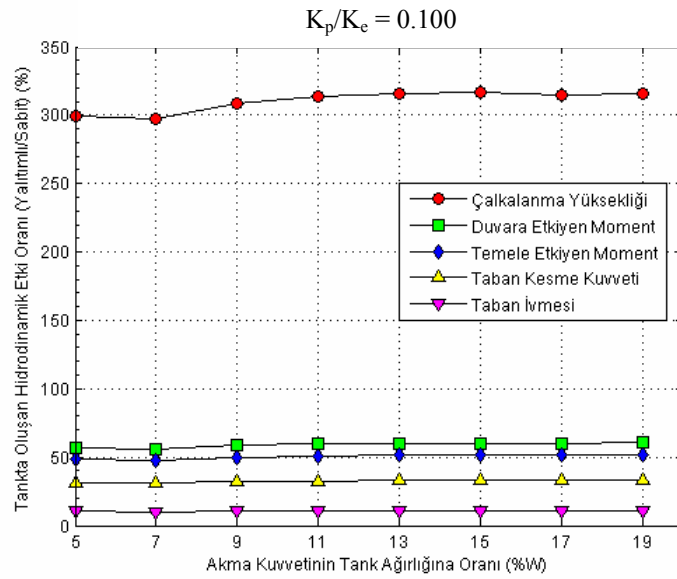
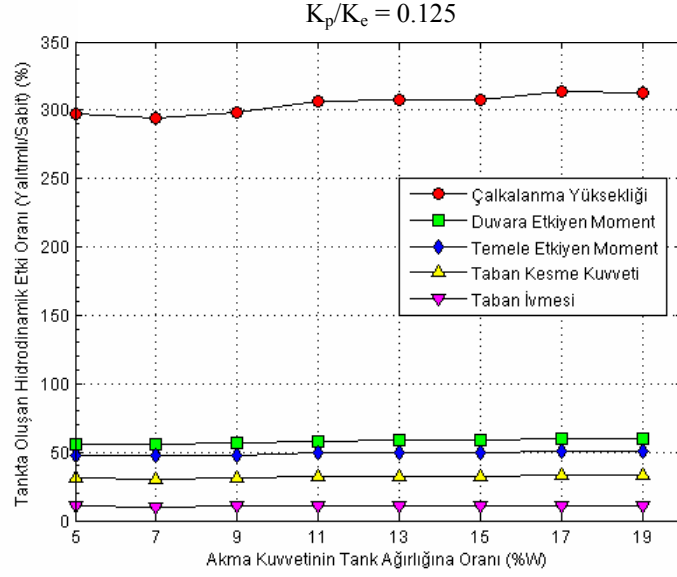
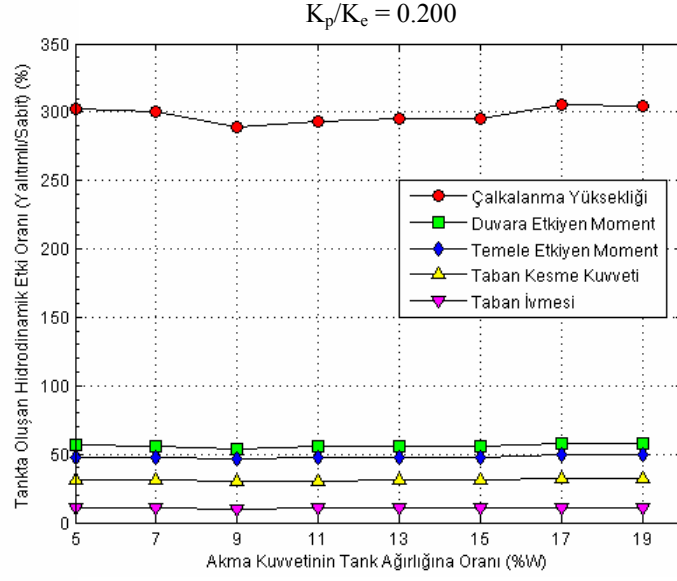
Şekil D.10 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – El Centro)



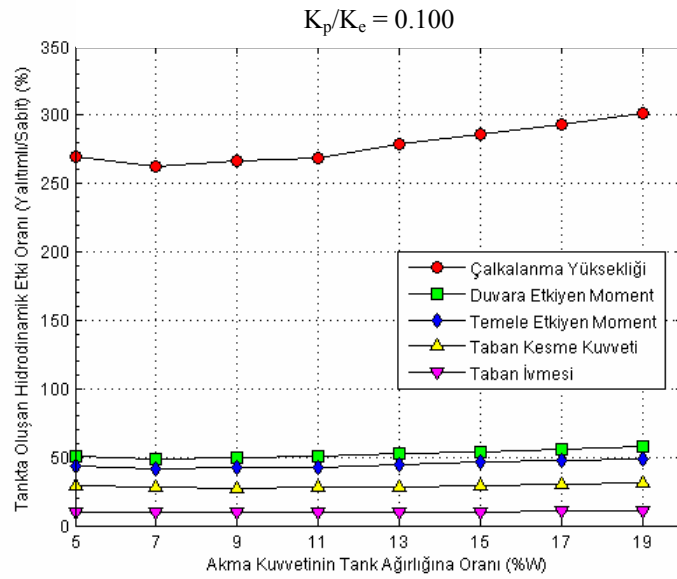
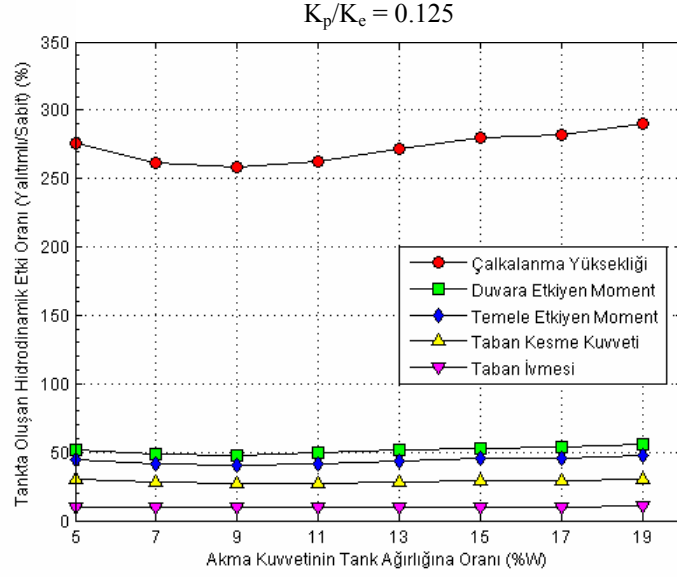
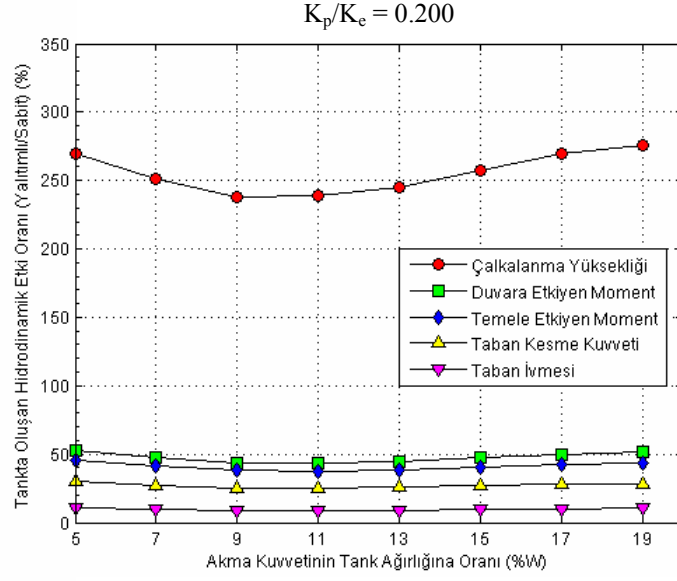
Şekil D.11 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – El Centro)



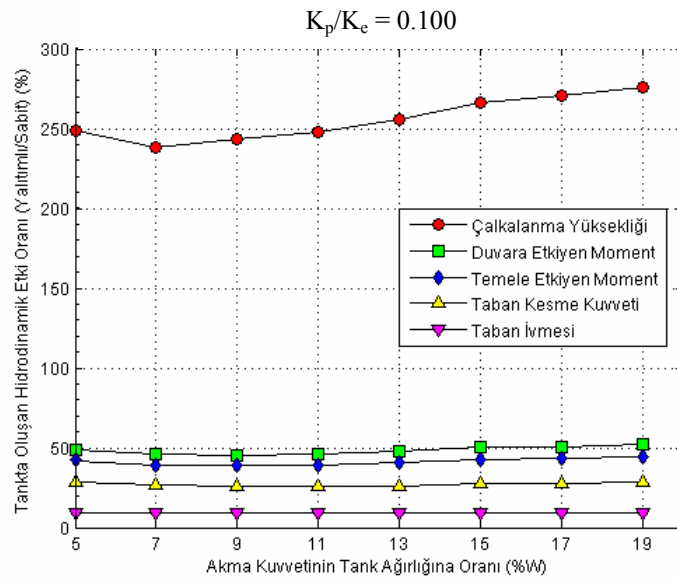
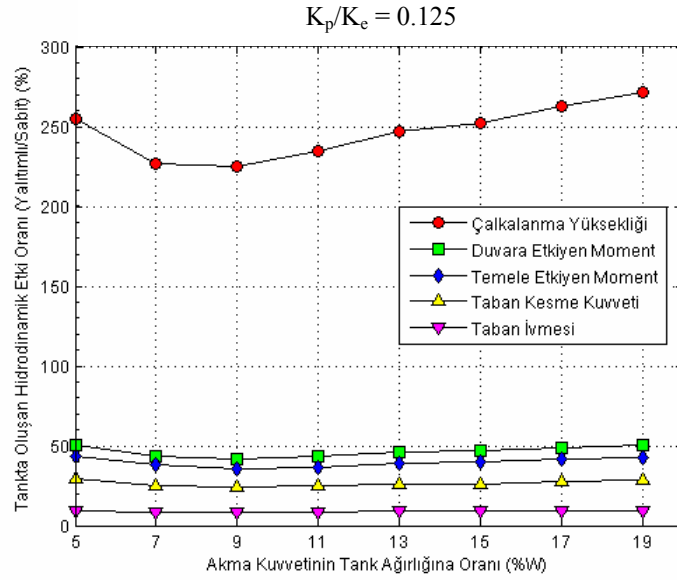
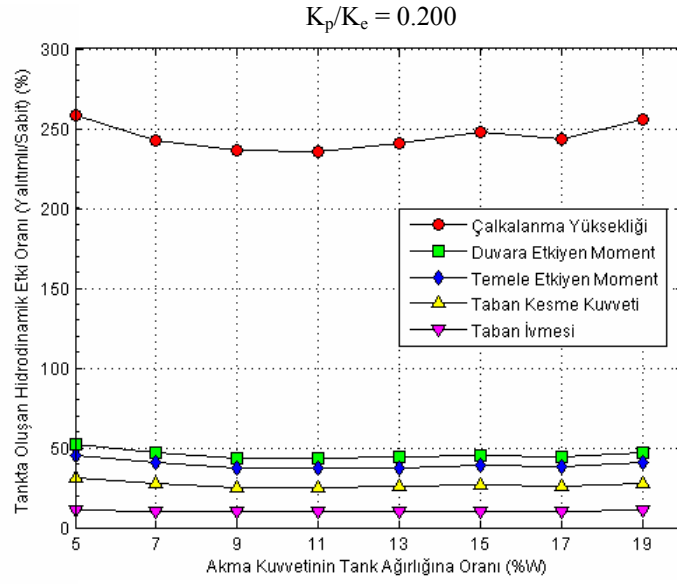
Şekil D.12 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – El Centro)



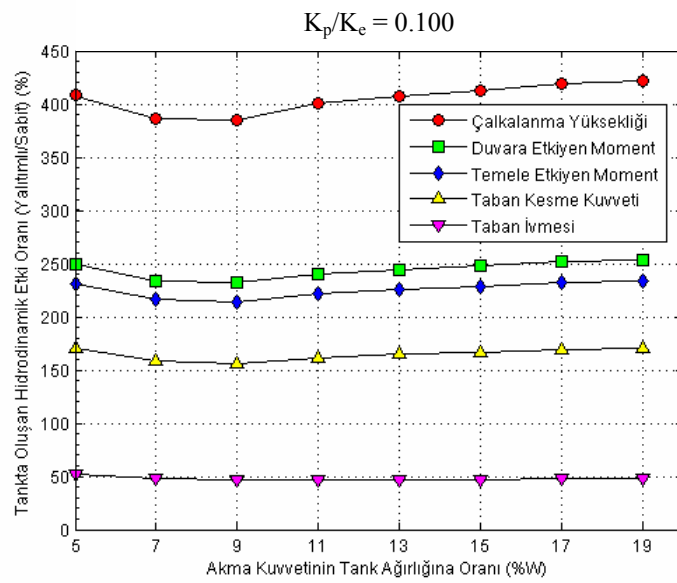
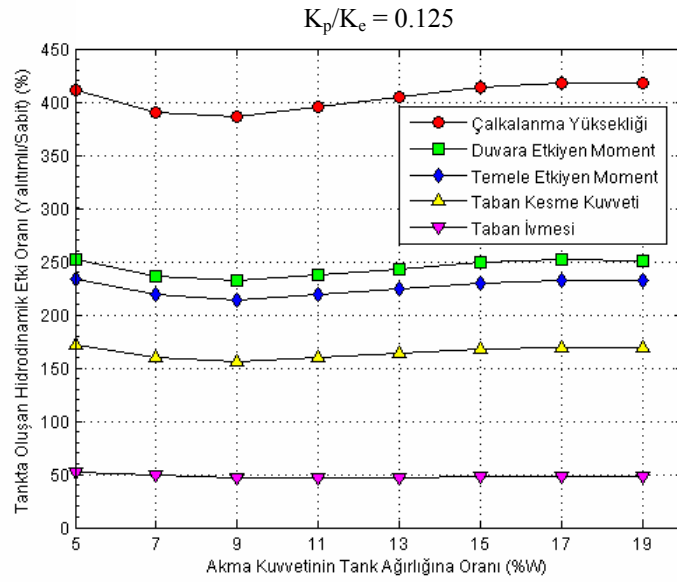
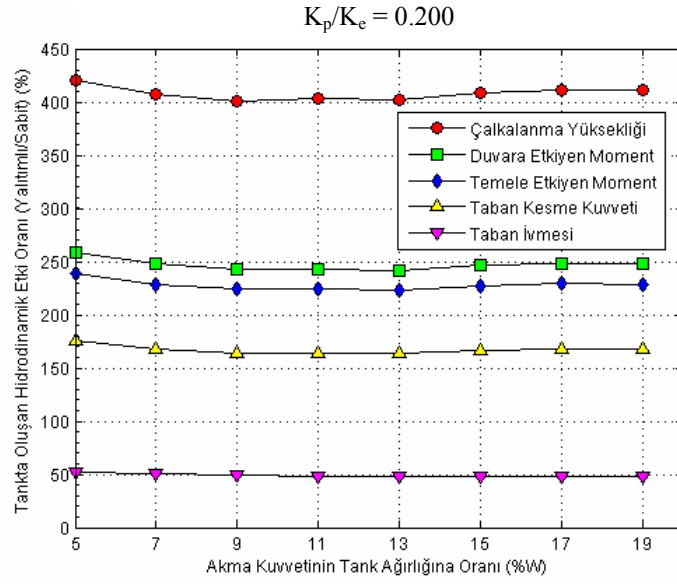
Şekil D.13 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – Erzincan)



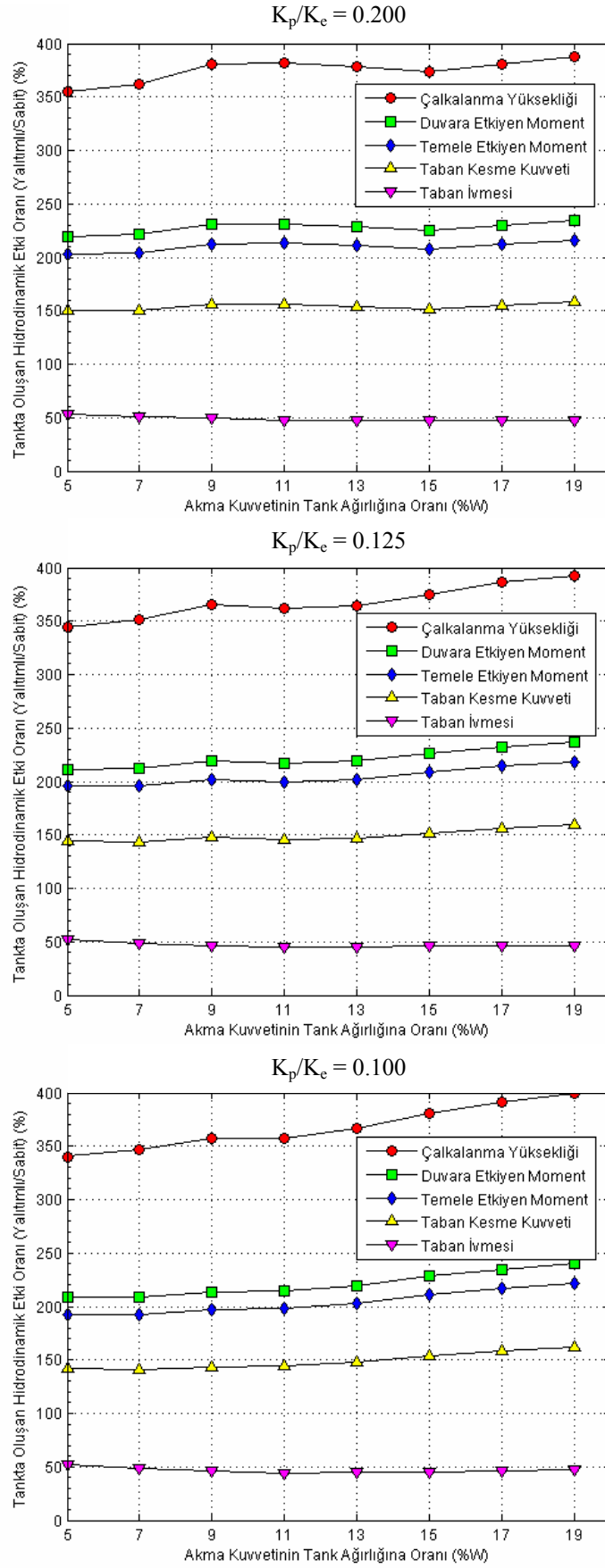
Şekil D.14 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)



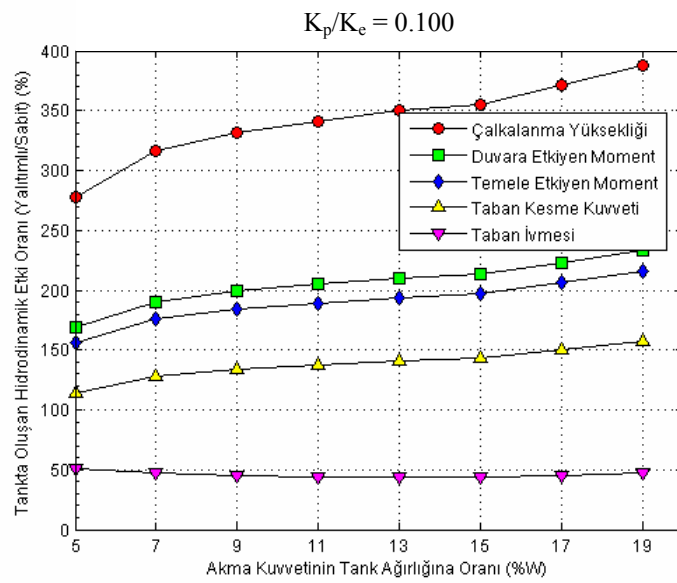
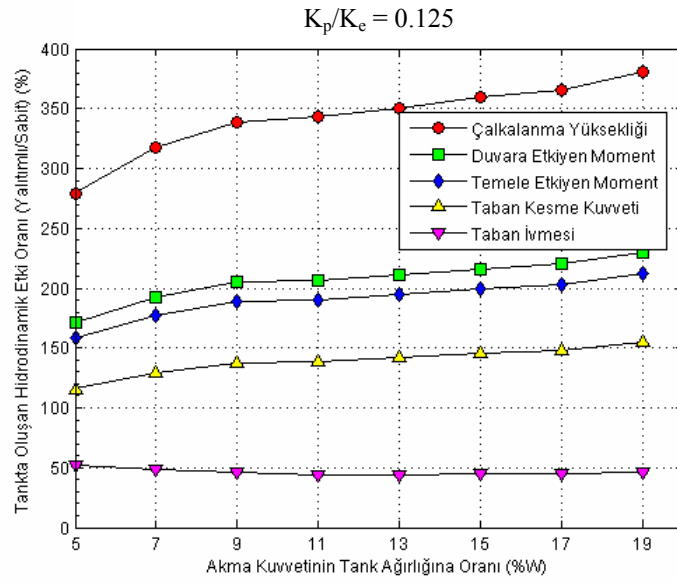
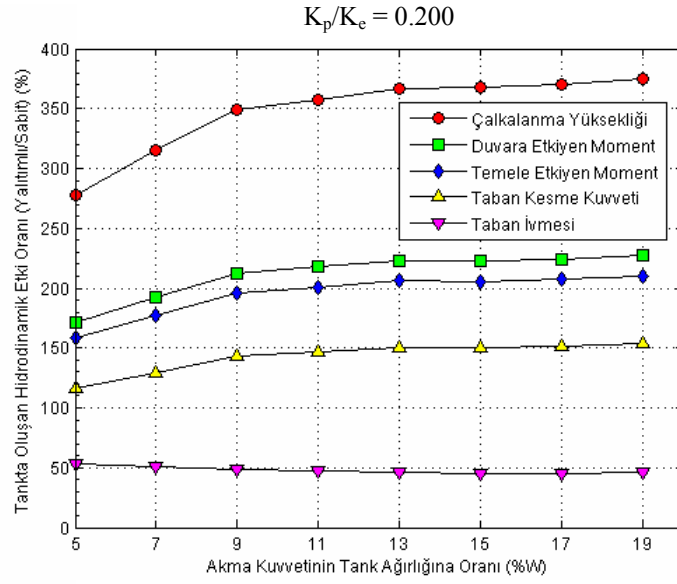
Şekil D.15 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - \text{Erzincan}$)



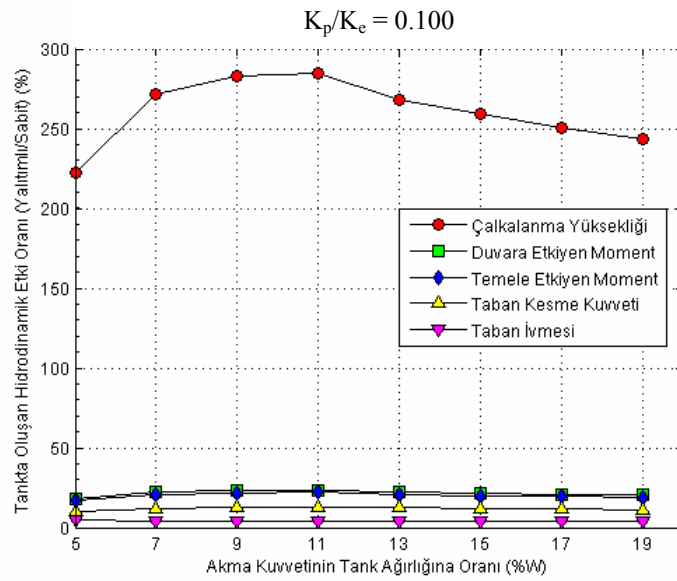
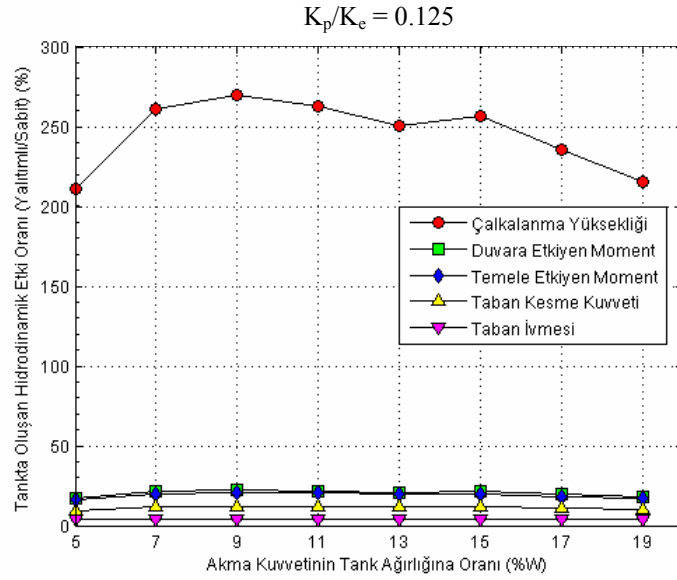
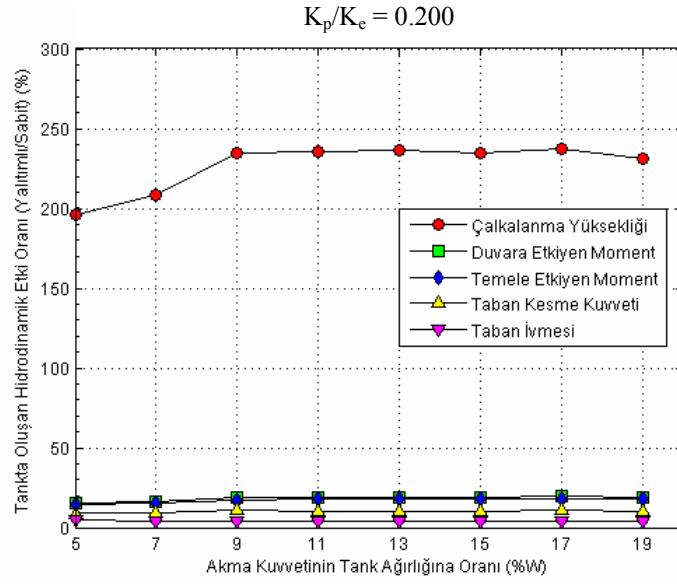
Şekil D.16 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s - \text{Yarımca}$)



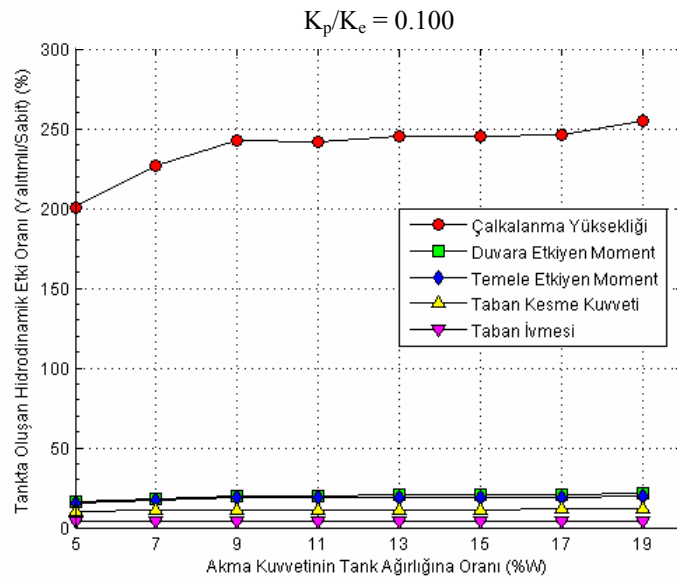
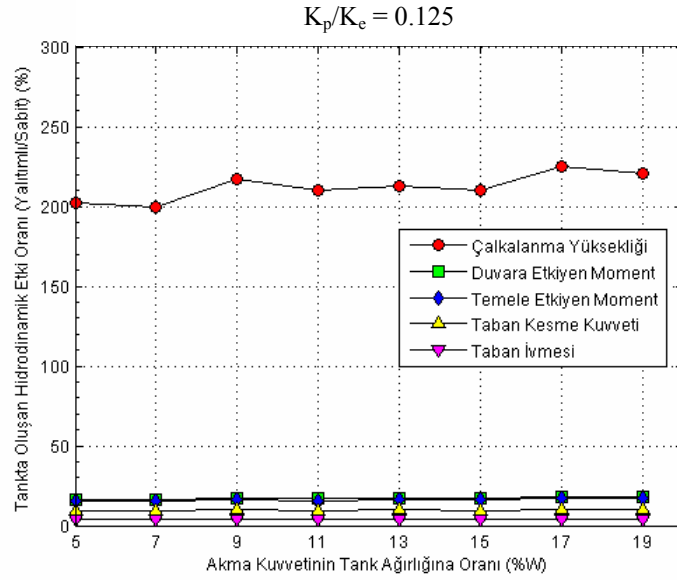
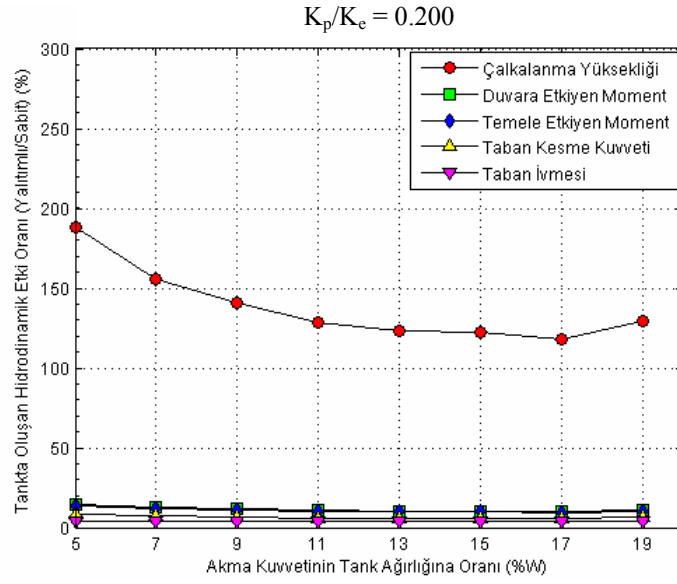
Şekil D.17 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Yarımca)



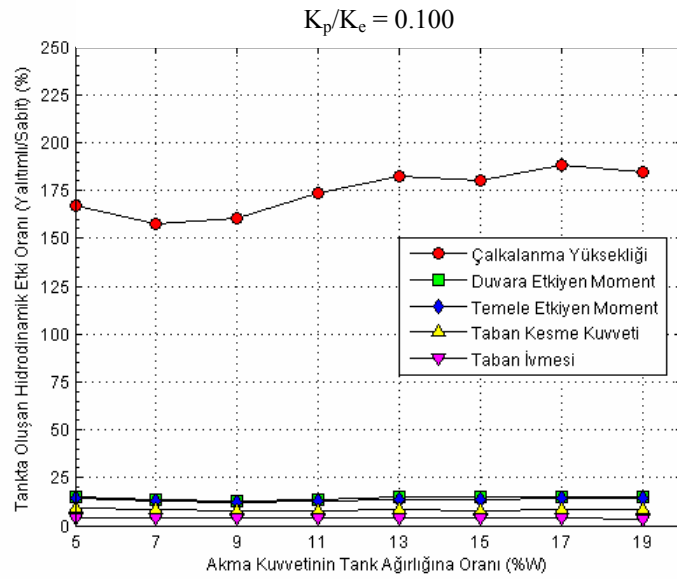
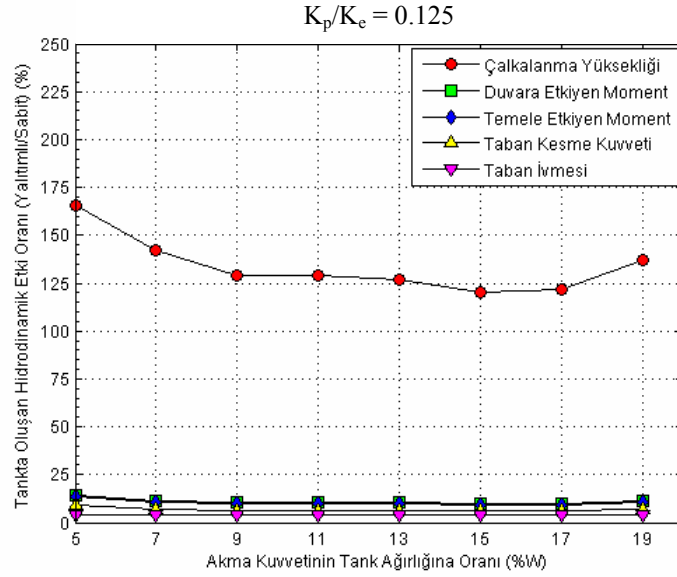
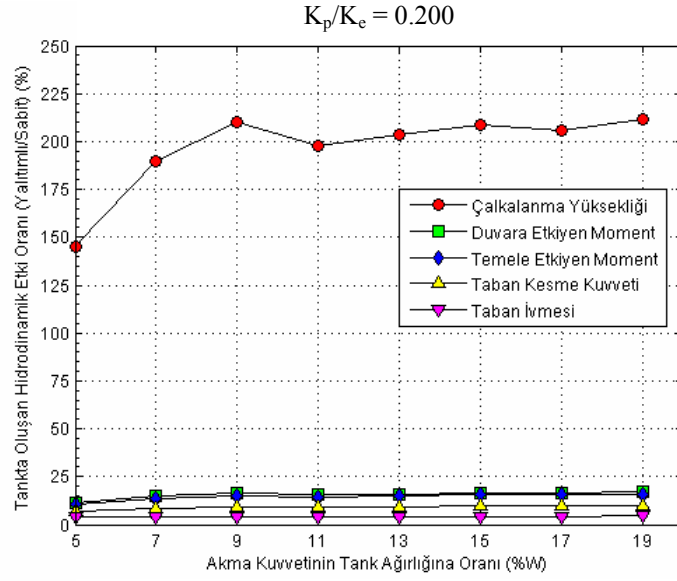
Şekil D.18 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - \text{Yarımca}$)



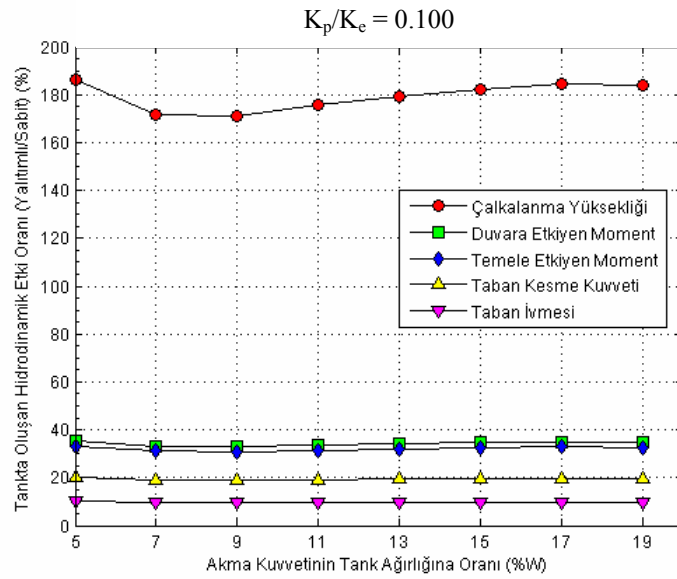
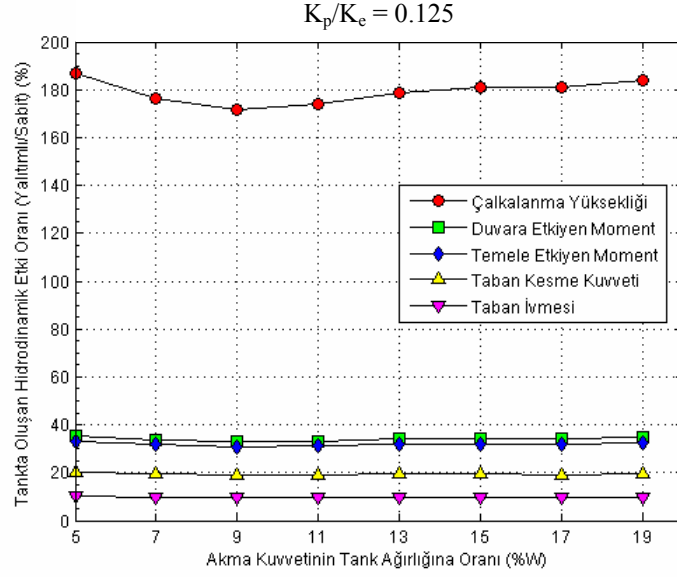
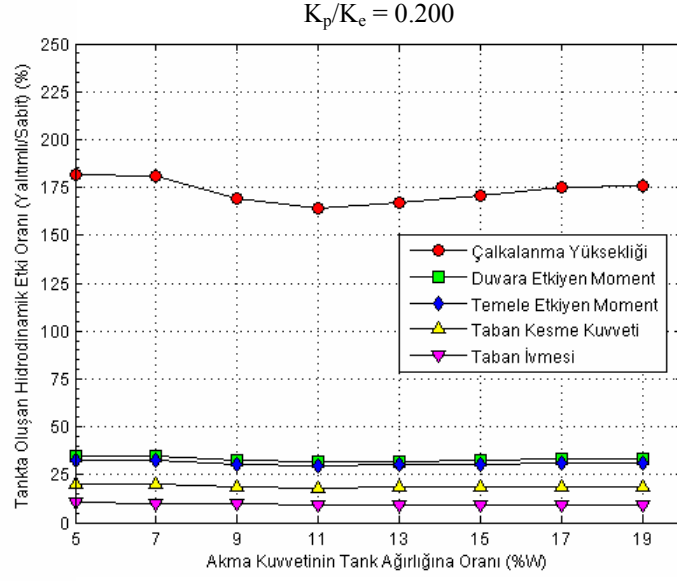
Şekil D.19 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – El Centro)



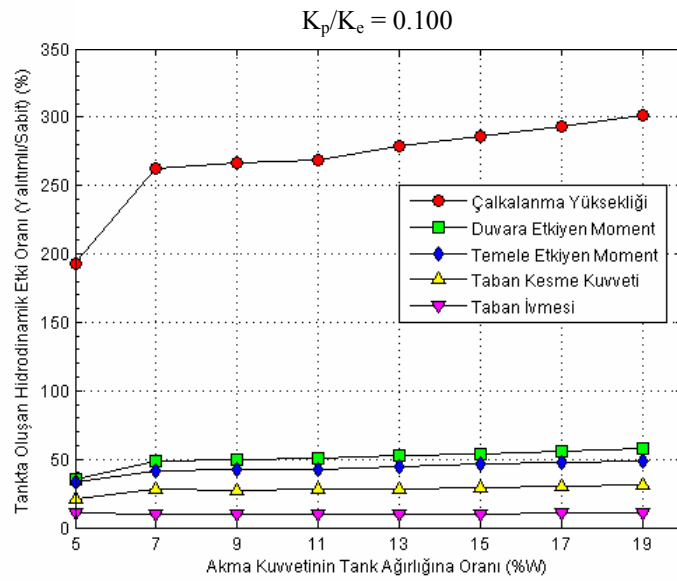
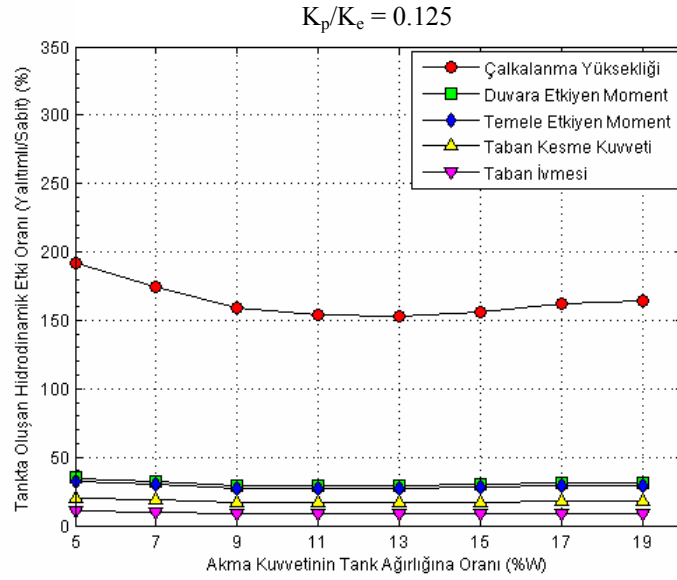
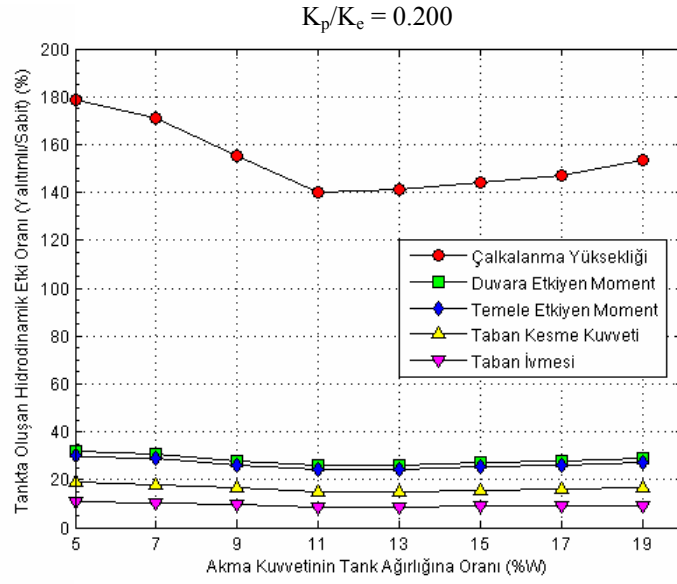
Şekil D.20 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s - El Centro$)



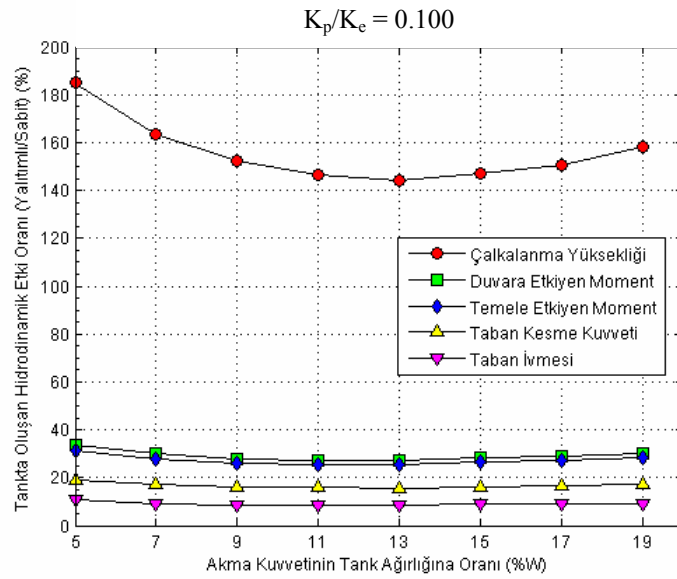
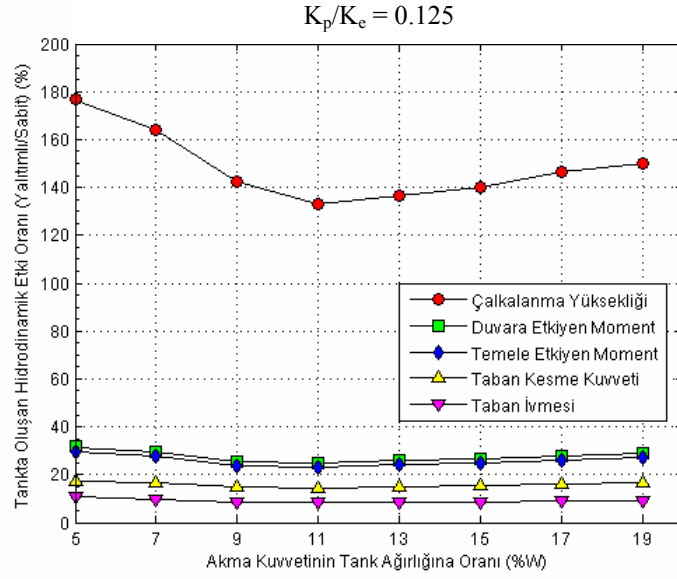
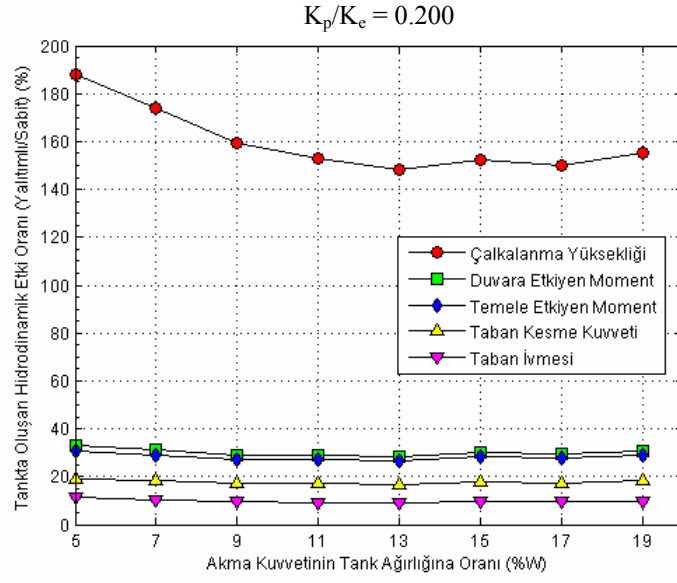
Şekil D.21 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - El Centro$)



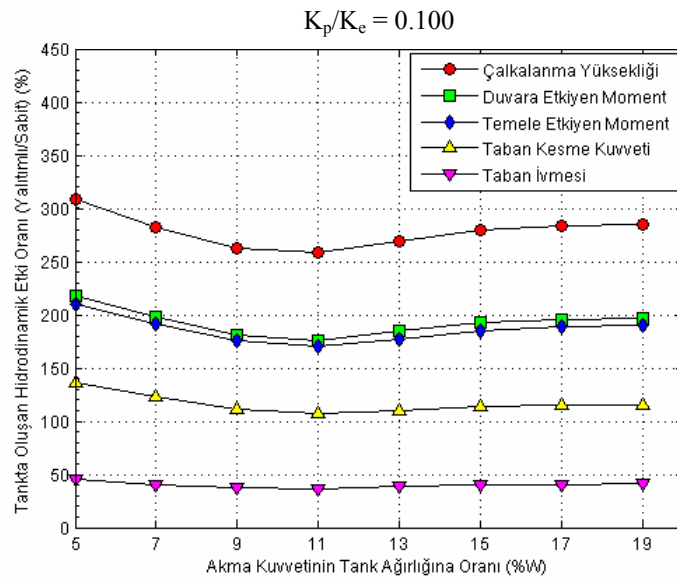
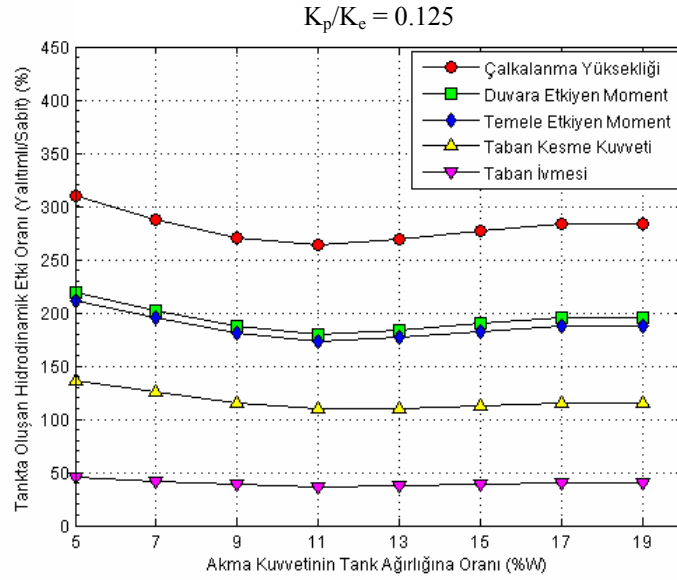
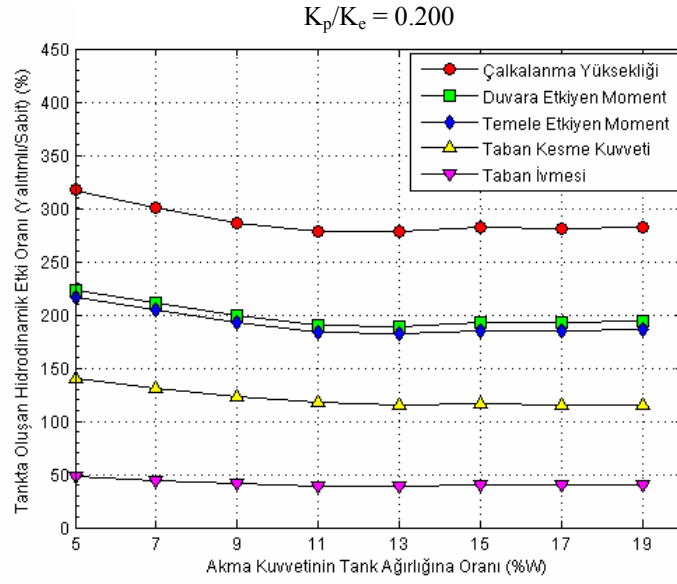
Şekil D.22 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Erzincan)



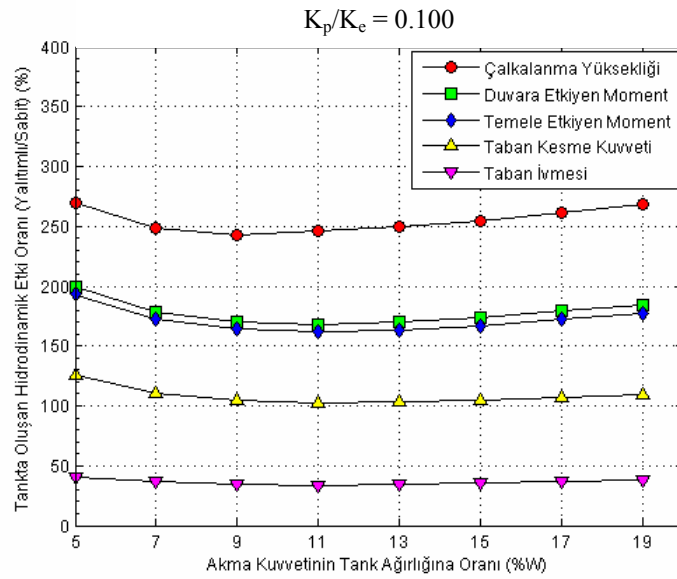
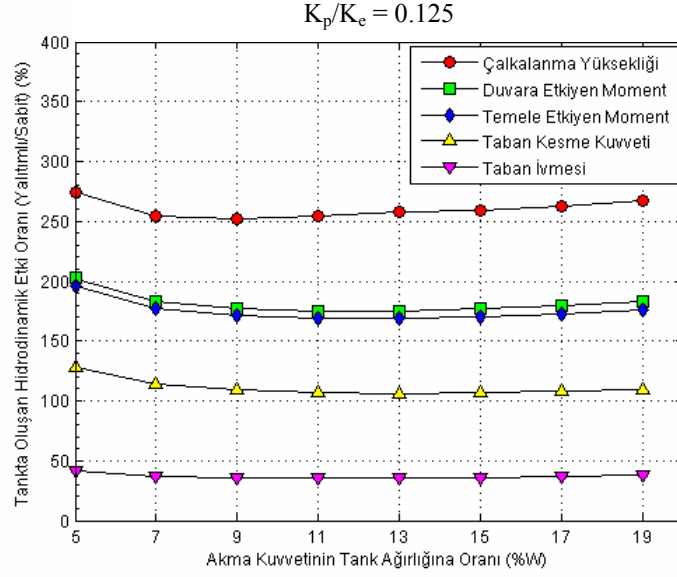
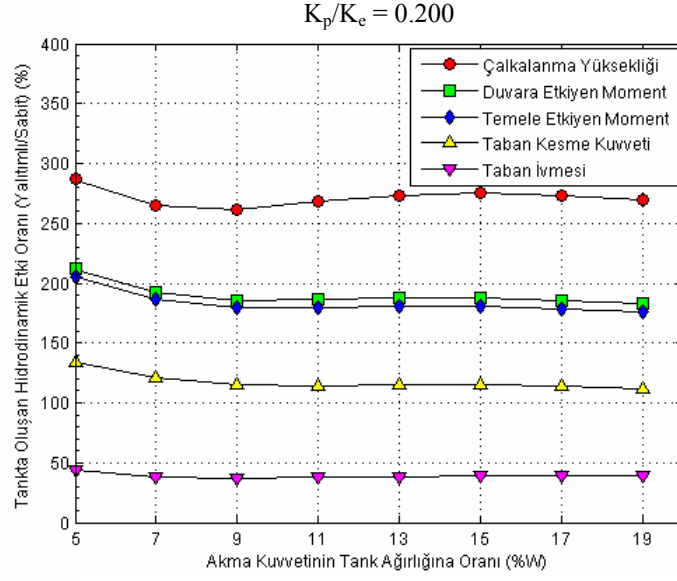
Şekil D.23 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)



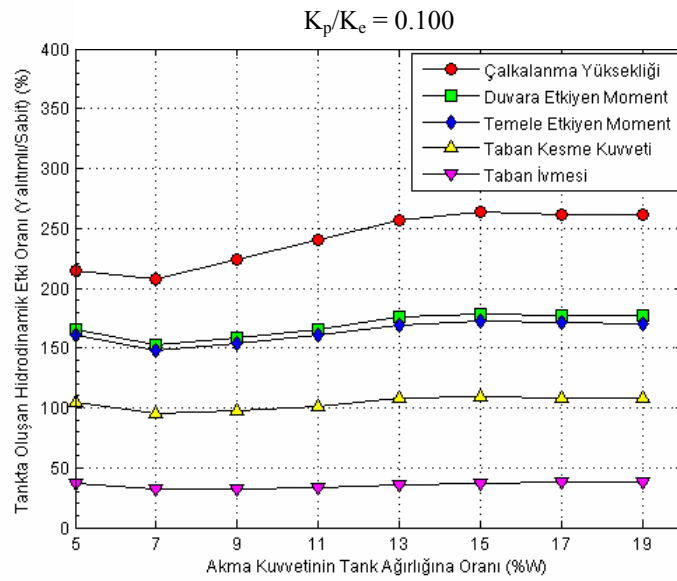
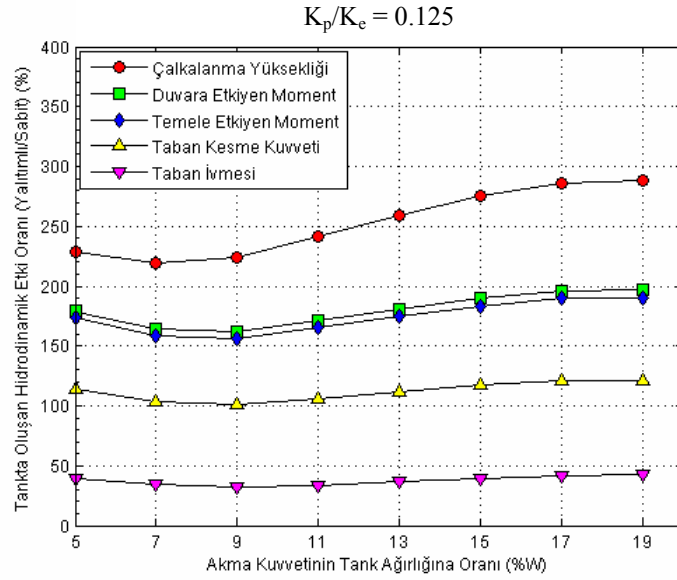
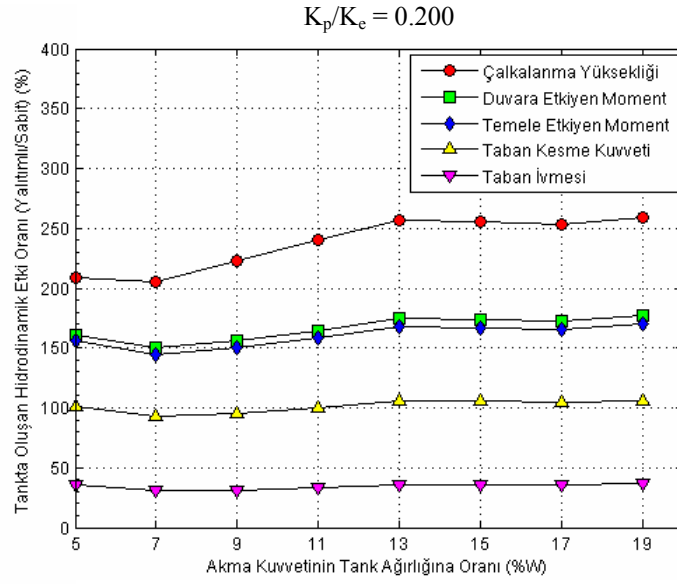
Şekil D.24 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - \text{Erzincan}$)



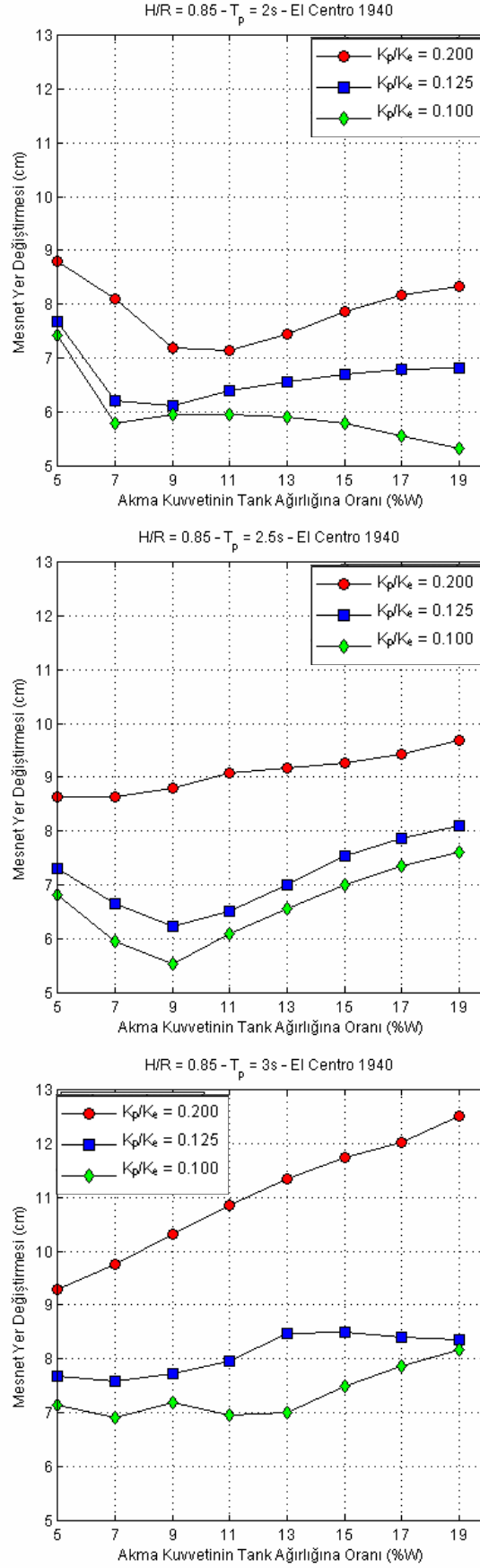
Şekil D.25 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s - \text{Yarımca}$)



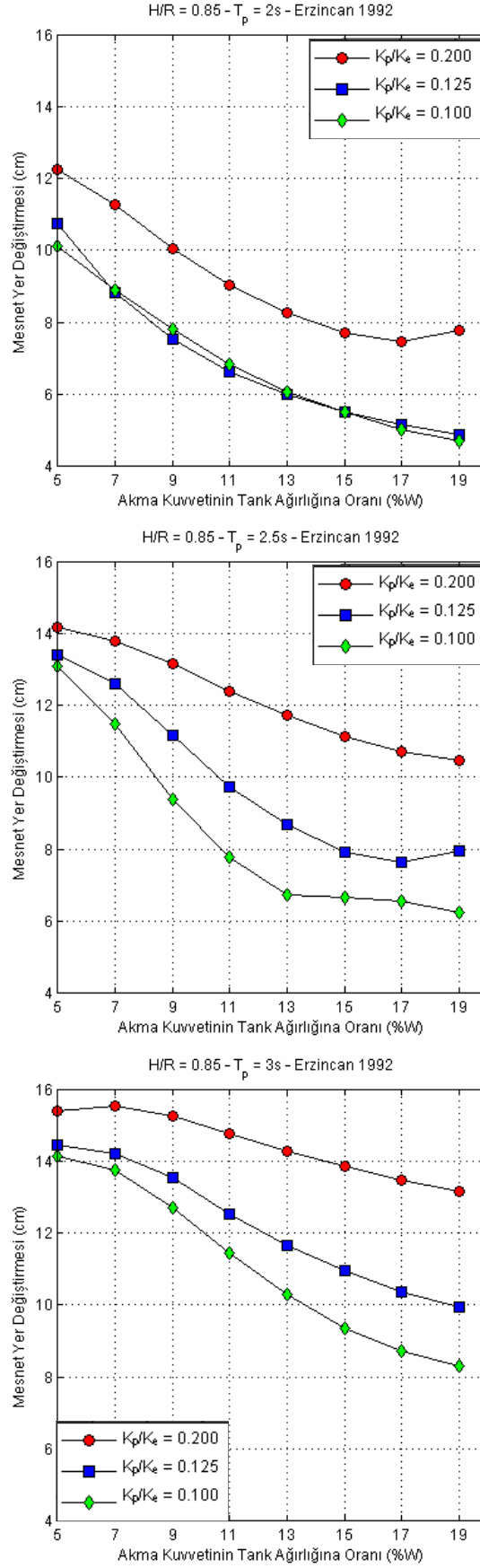
Şekil D.26 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Yarımcı)



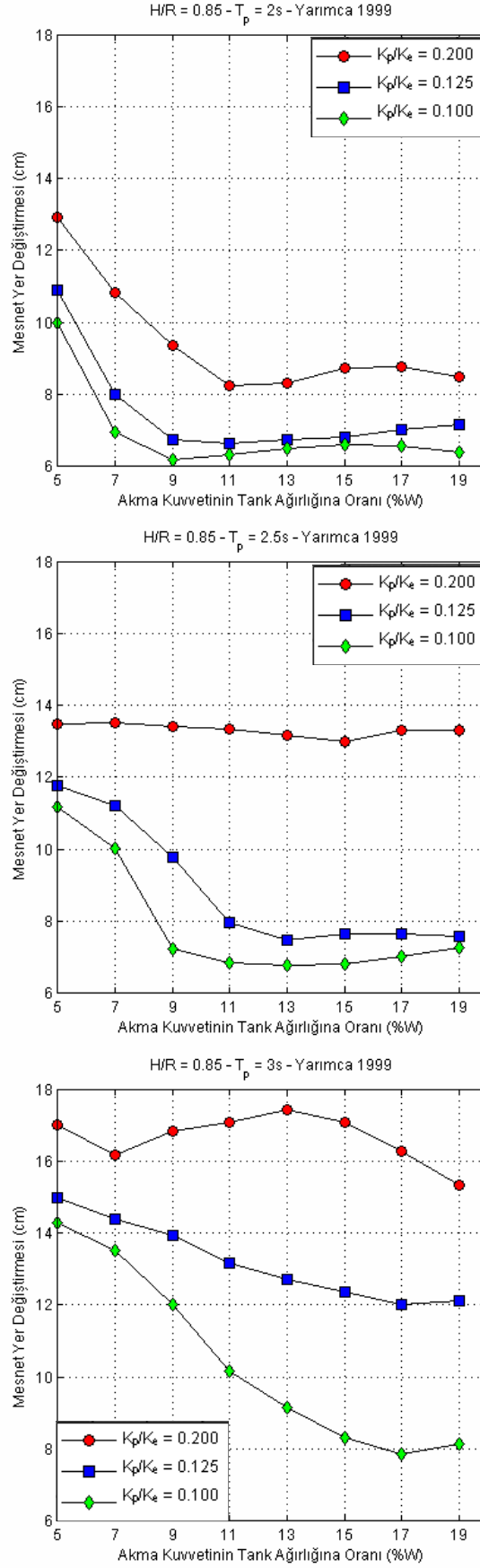
Şekil D.27 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - \text{Yarımca}$)



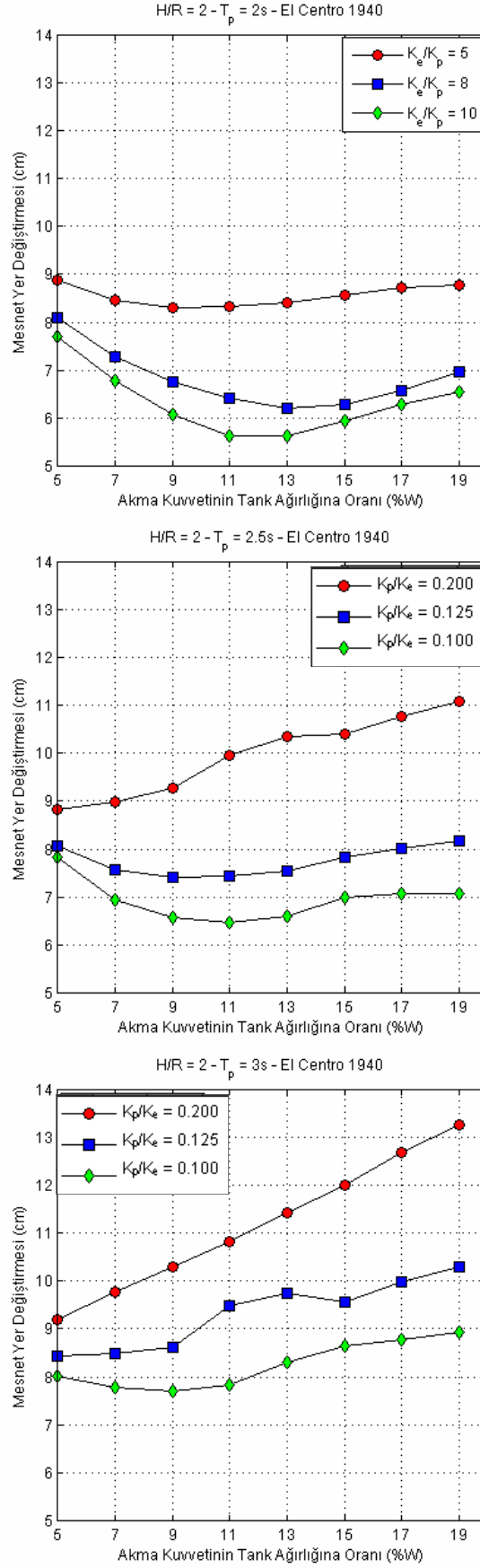
Şekil D.28 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$)



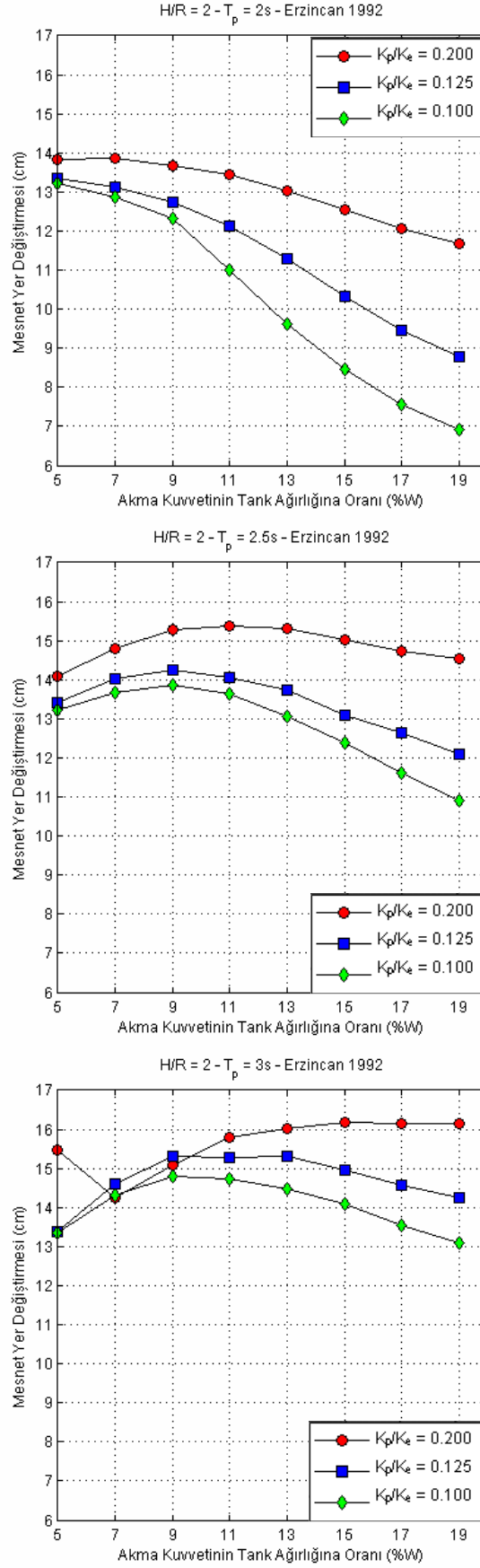
Şekil D.29 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan}$)



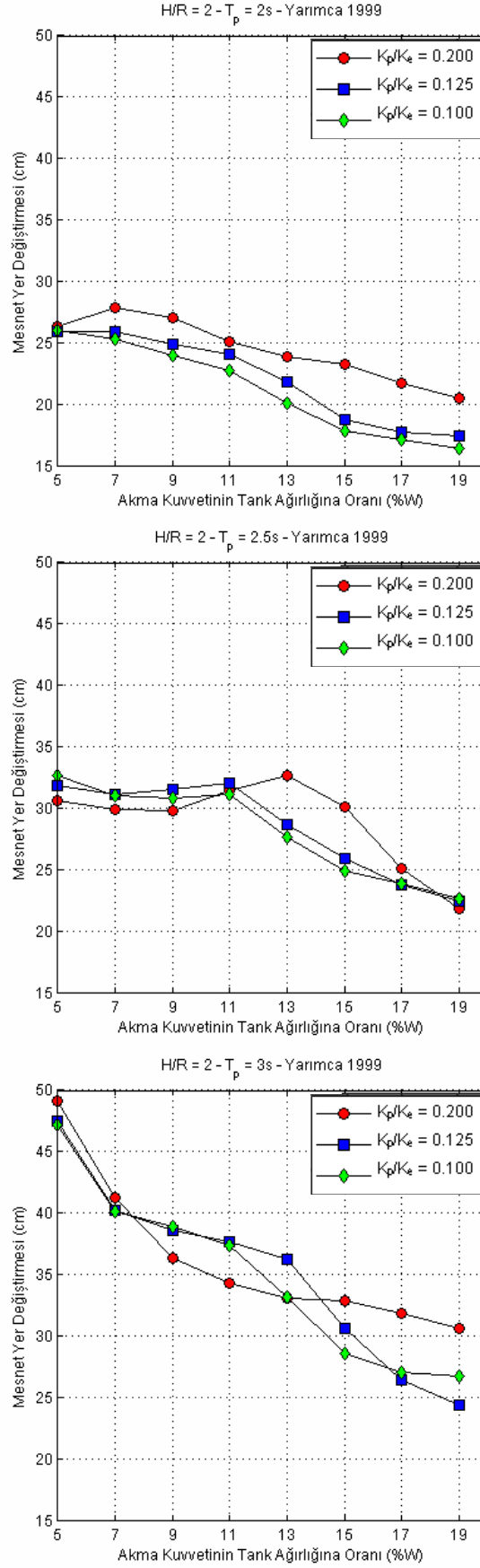
Şekil D.30 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Yarımca}$)



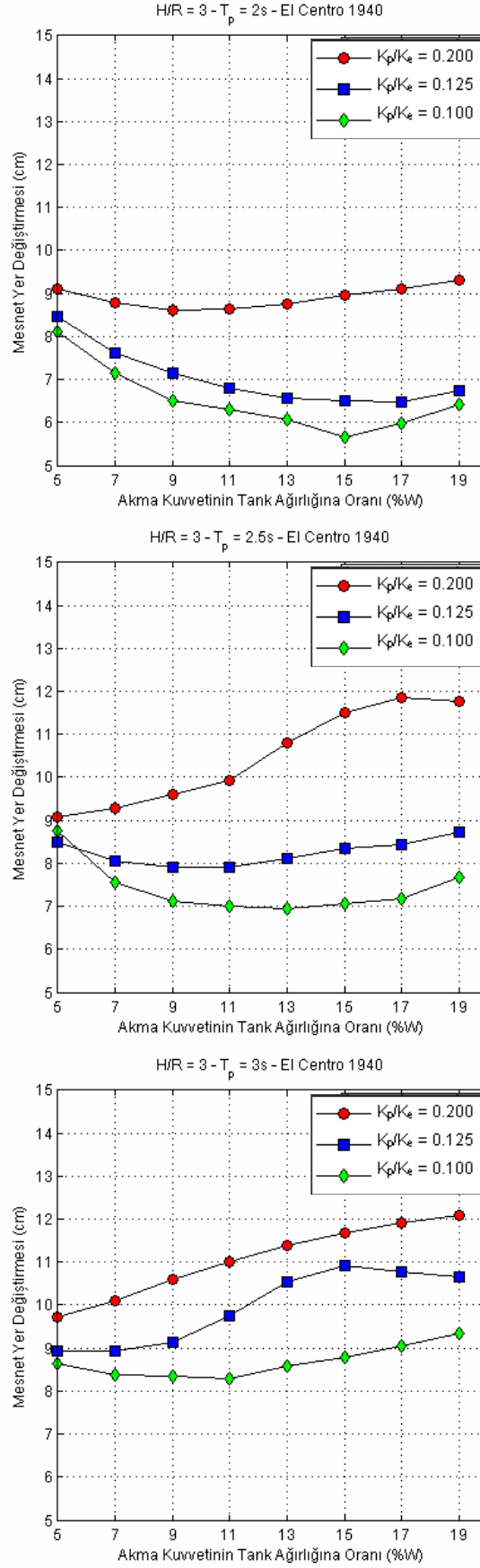
Şekil D.31 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – El Centro)



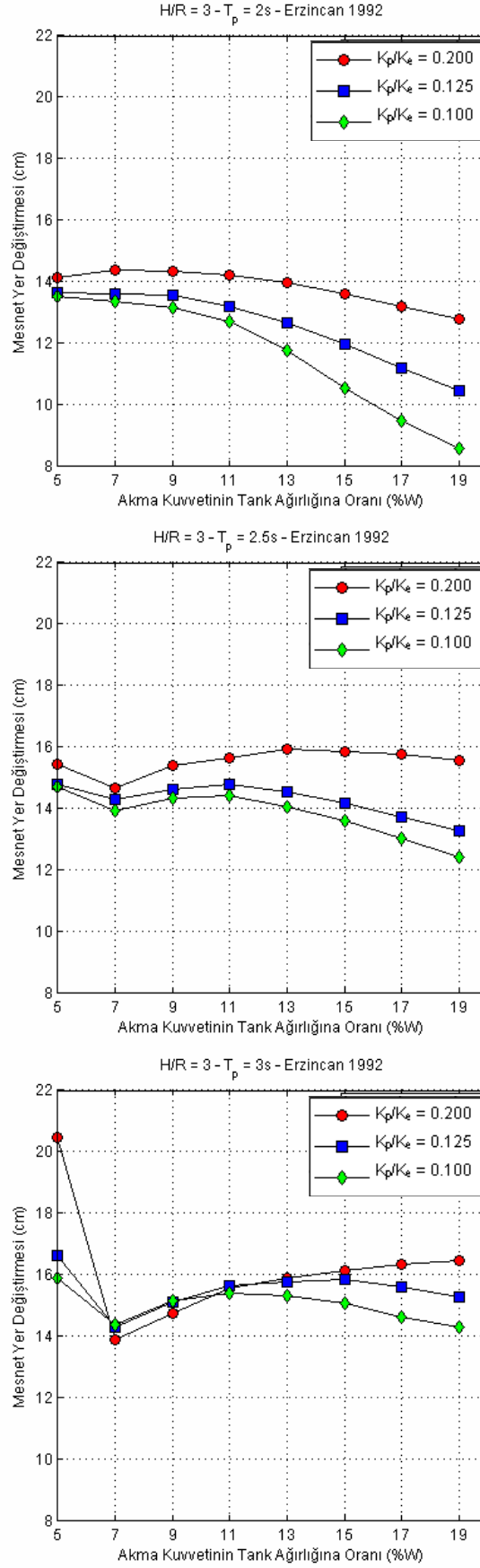
Şekil D.32 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Erzincan)



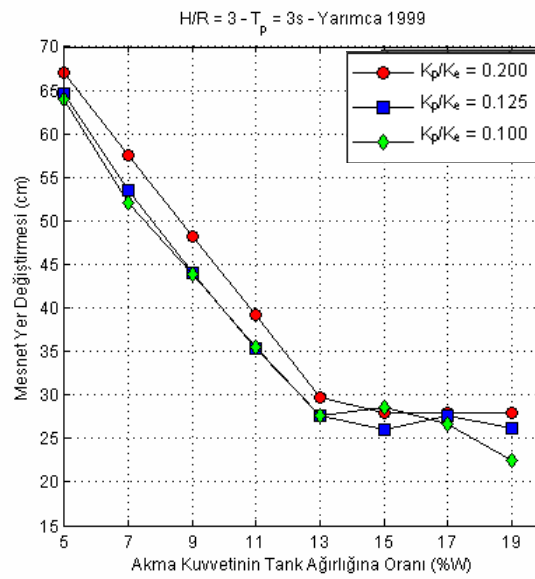
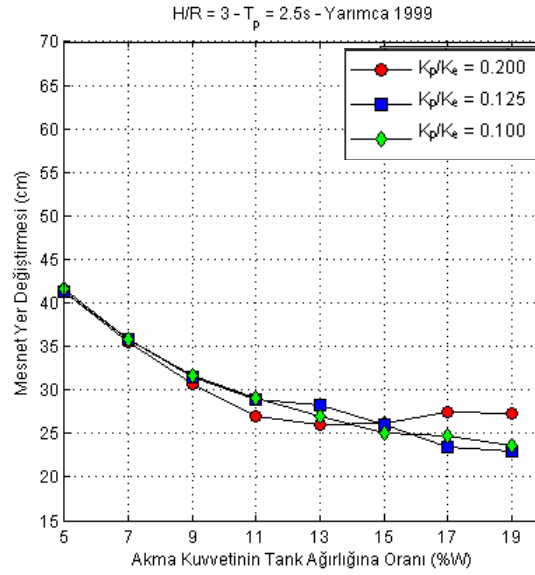
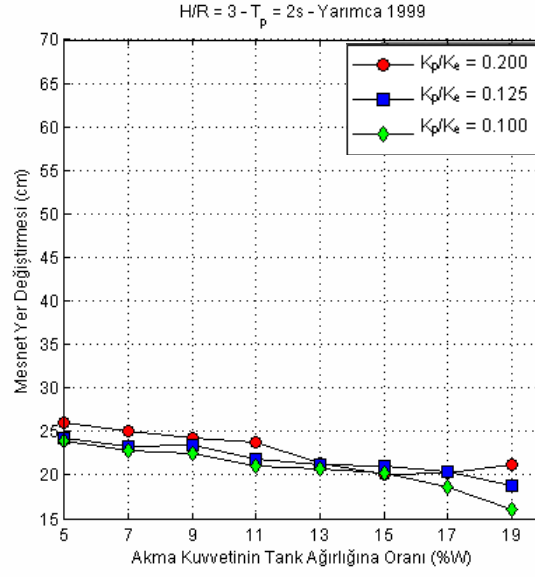
Şekil D.33 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Yarımcı)



Şekil D.34 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – El Centro)

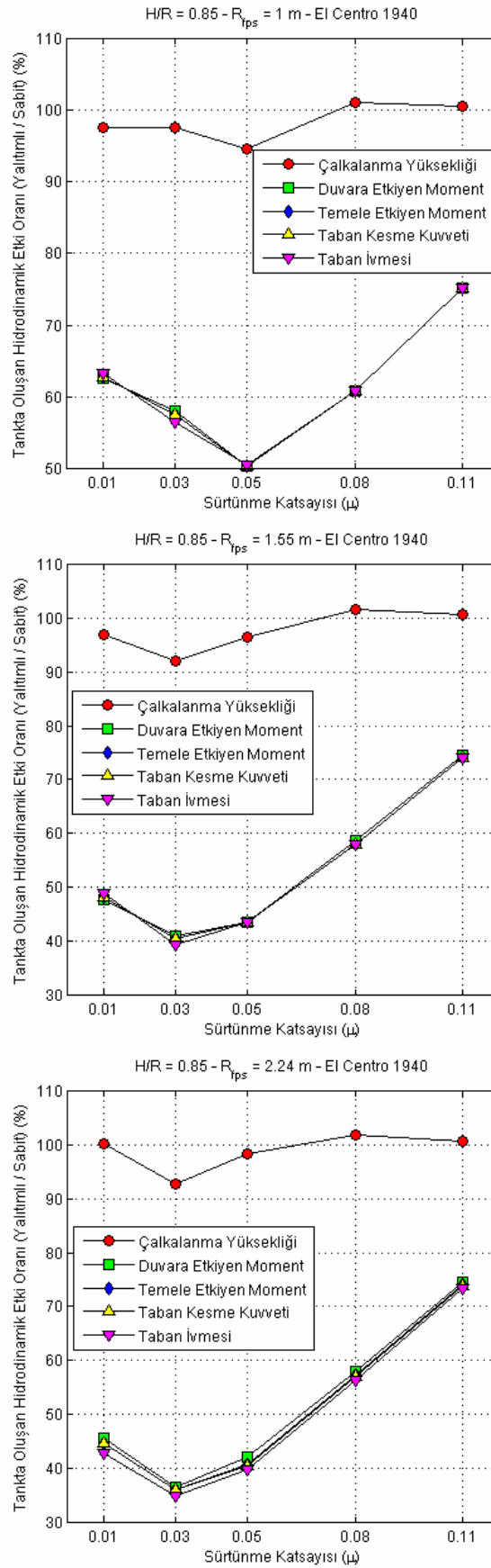


Şekil D.35 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Erzincan)

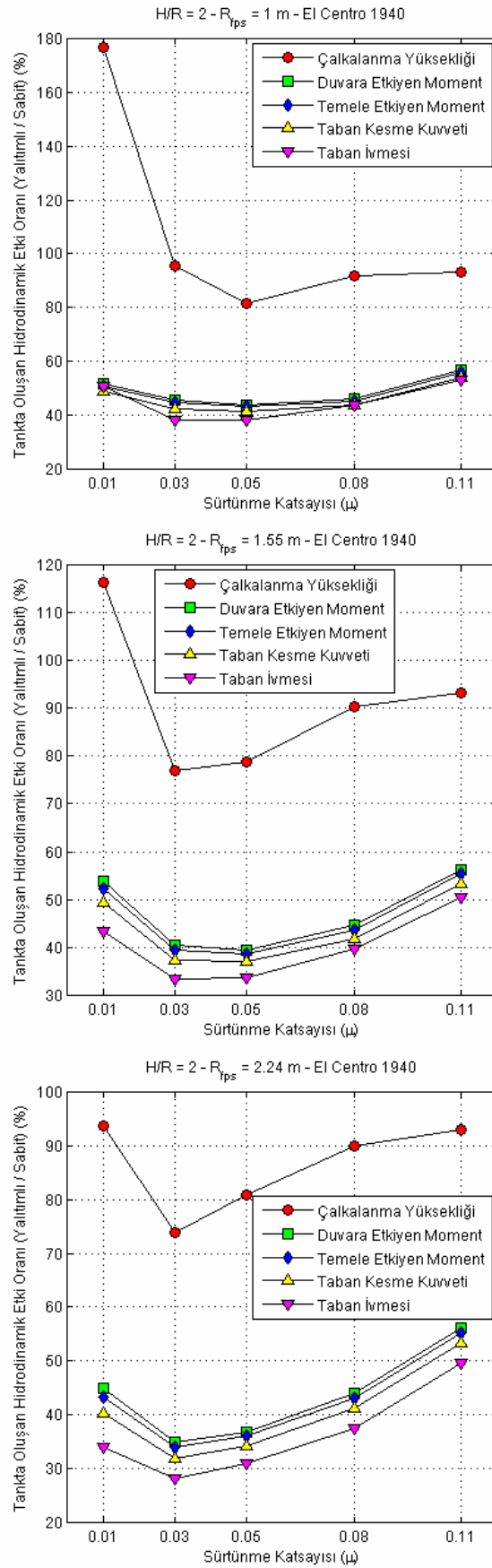


Şekil D.36 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Yarımcı)

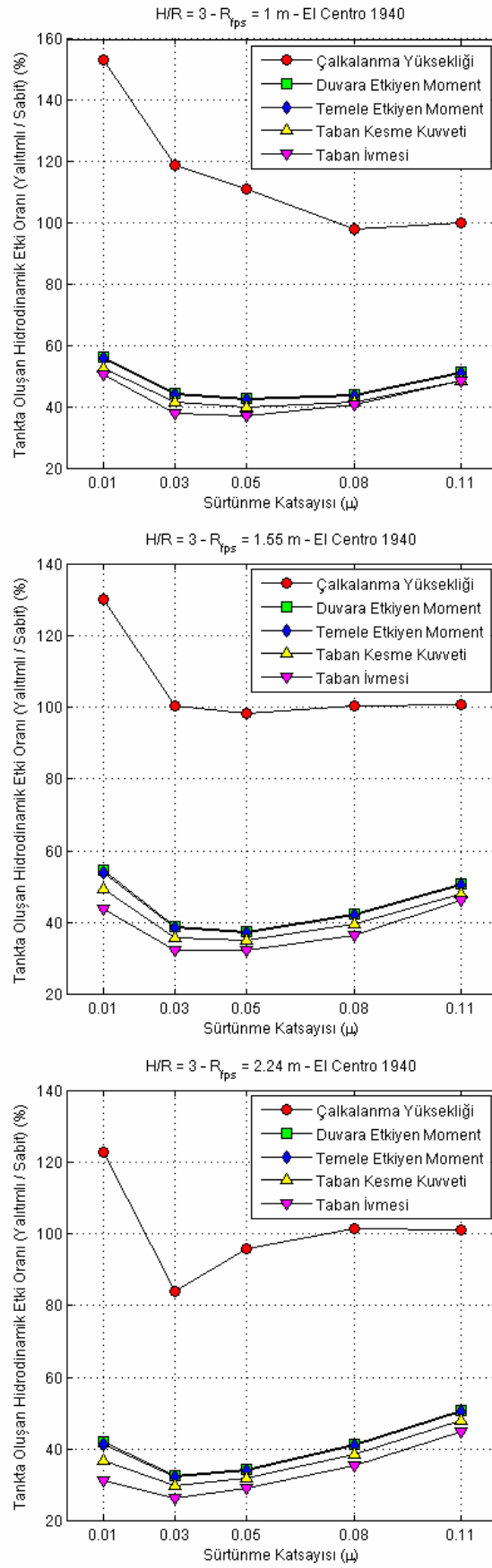
**EK E. SÜRTÜNMELİ SARKAÇ MESNETLİ SIVI DEPOLARI İÇİN
ÖLÇEKLENMEMİŞ İVME KAYITLARININ KULLANILDIĞI
ÇALIŞMANIN SONUÇLARI**



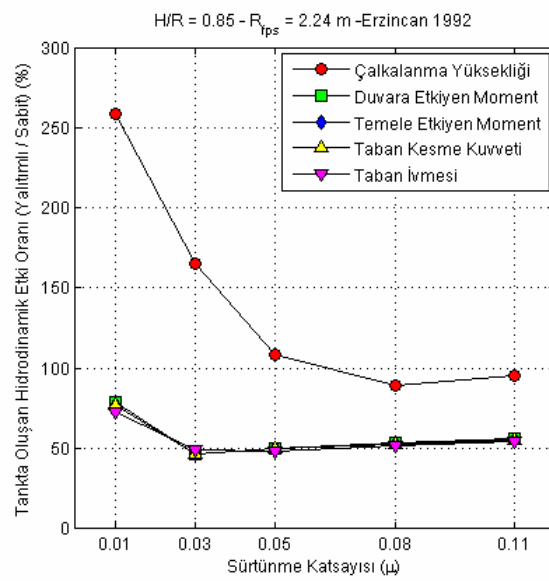
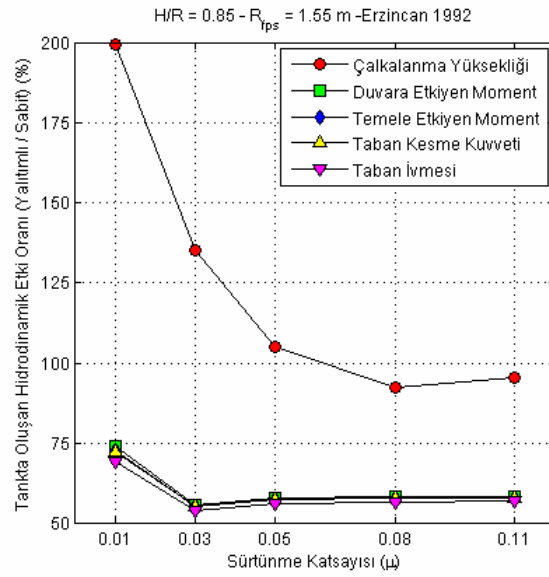
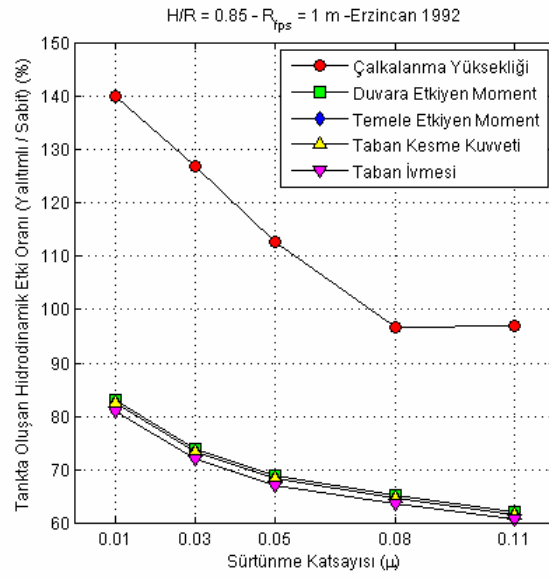
Şekil E.1 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{El Centro}$)



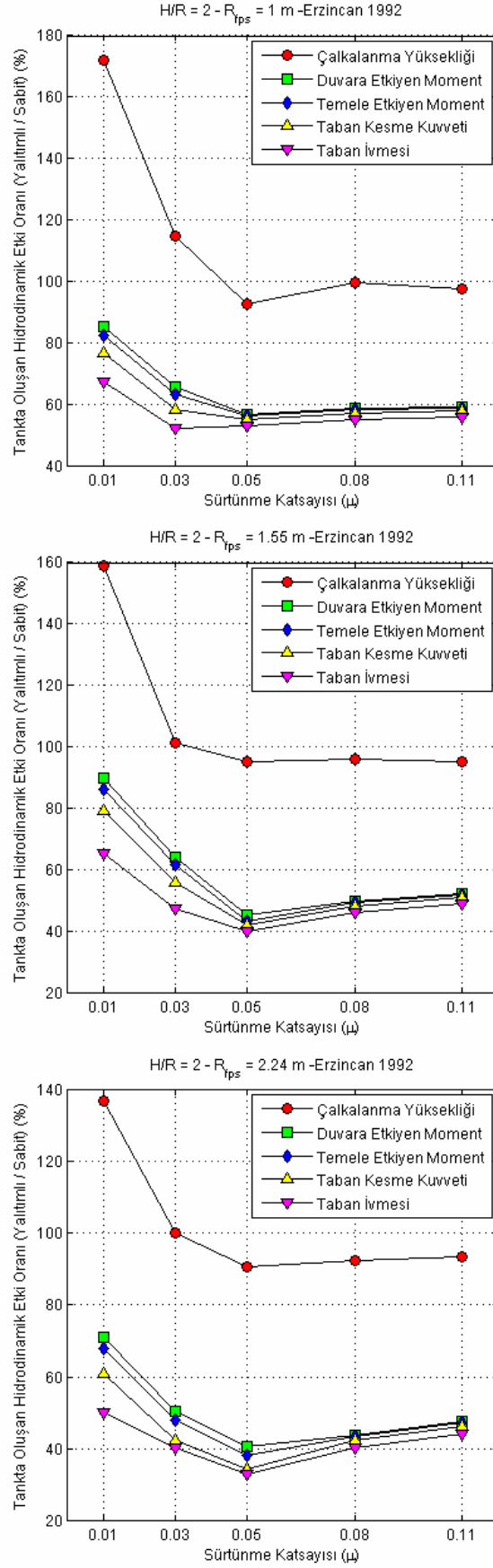
Şekil E.2 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{El Centro}$)



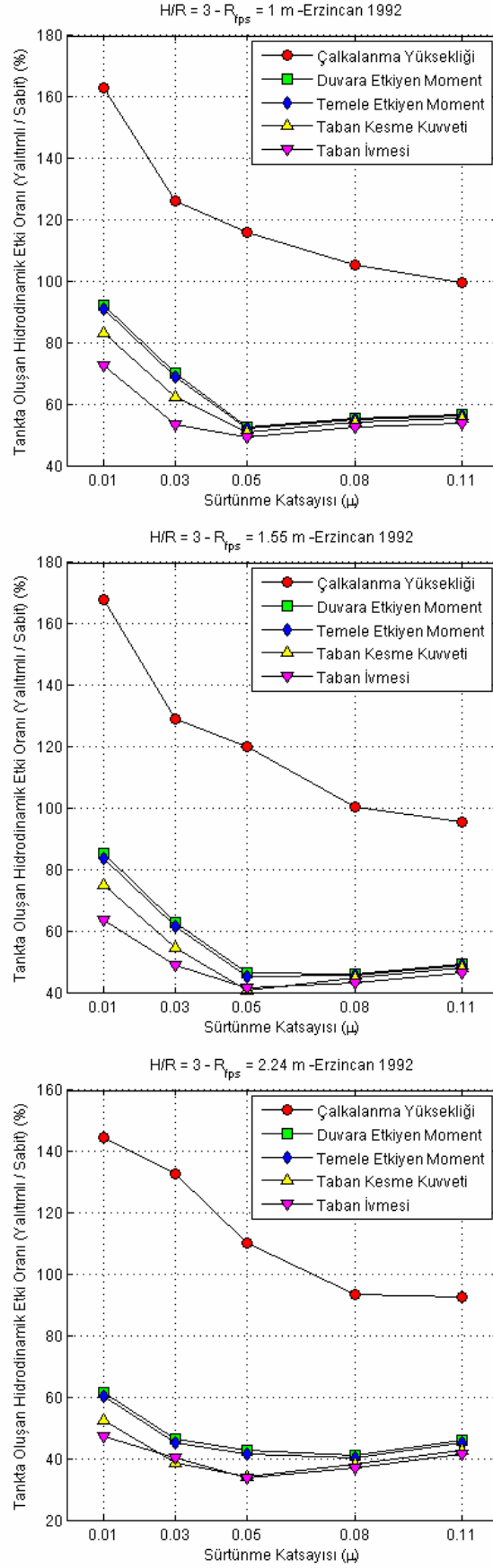
Şekil E.3 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{El Centro}$)



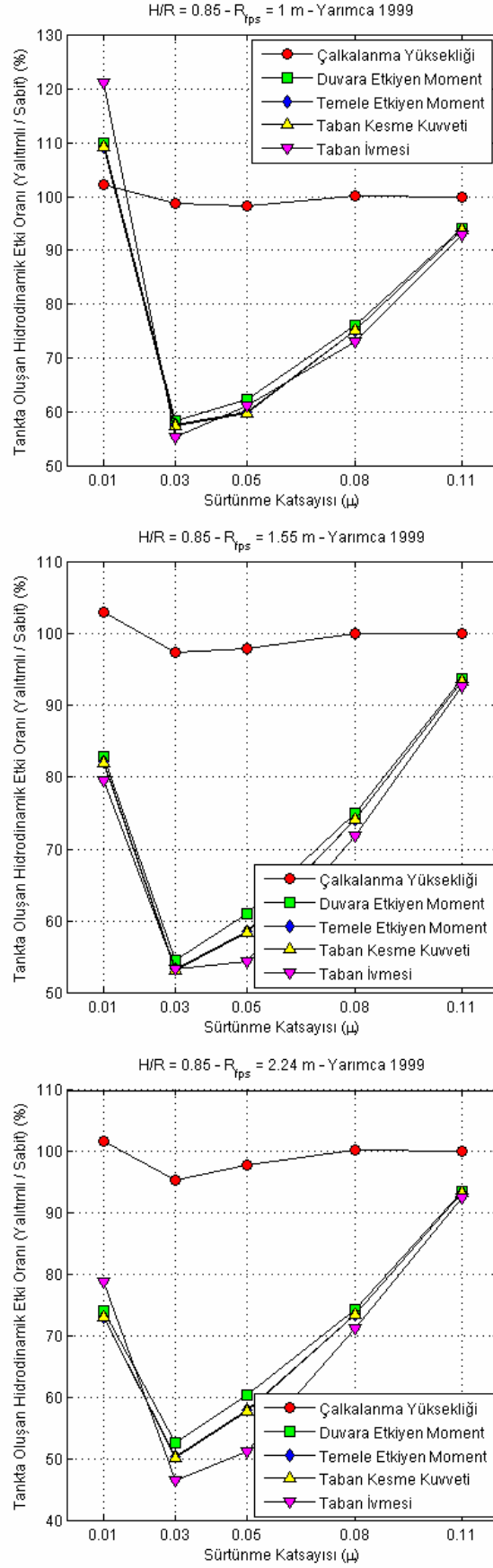
Şekil E.4 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – Erzincan)



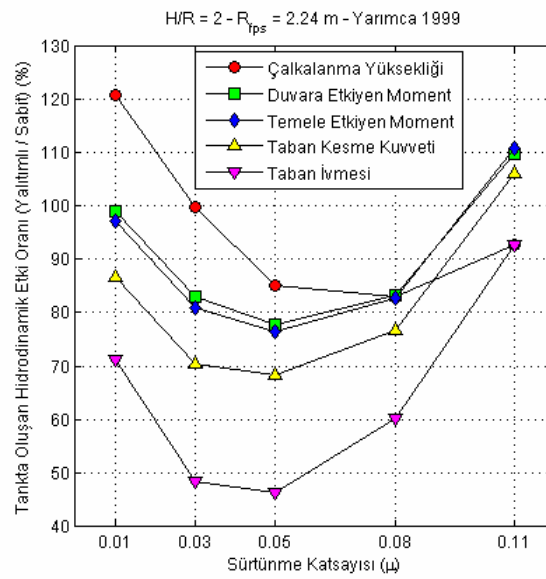
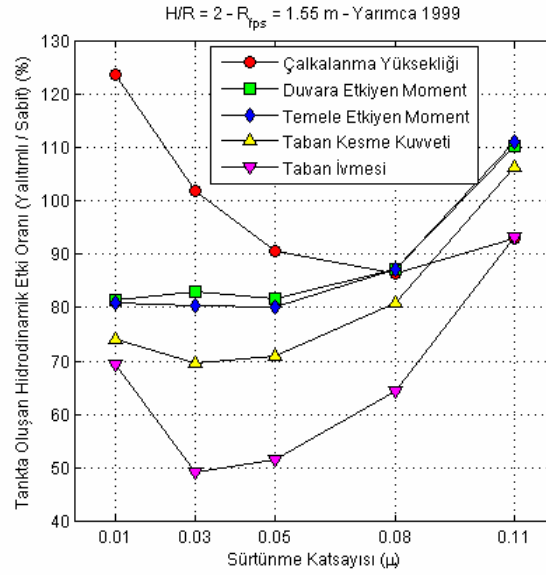
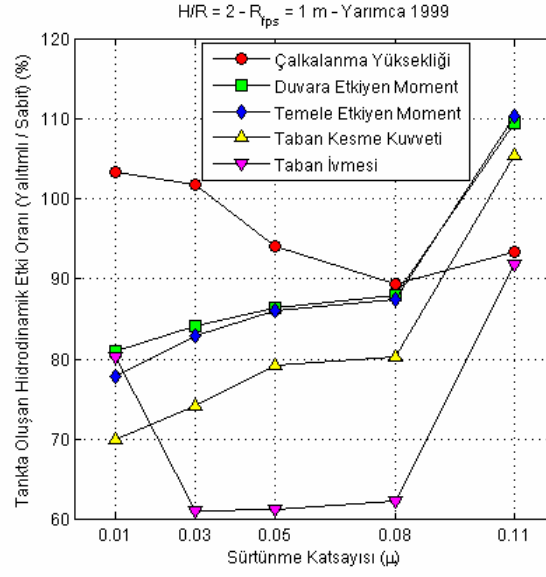
Şekil E.5 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Erzincan}$)



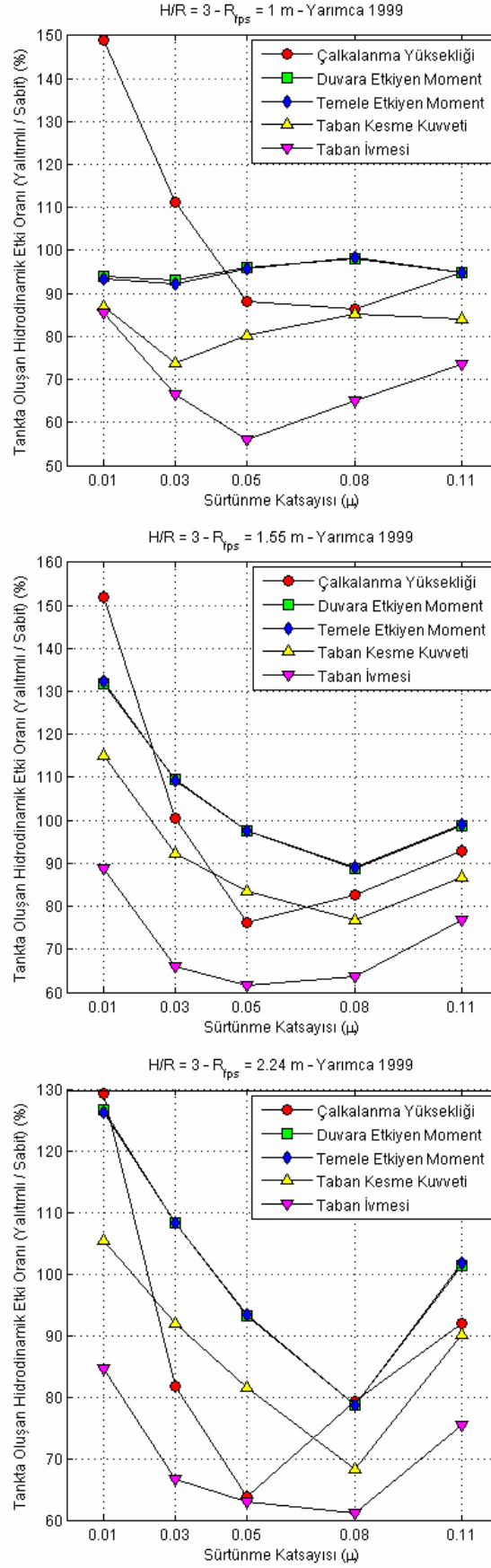
Şekil E.6 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - \text{Erzincan}$)



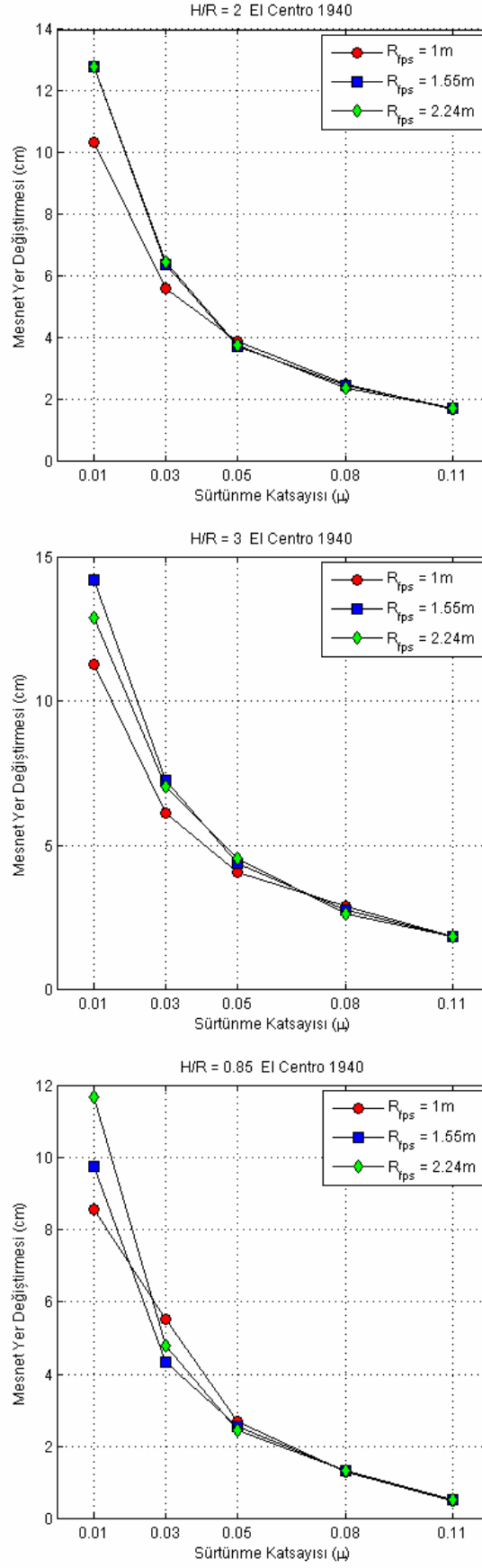
Şekil E.7 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Yarımca}$)



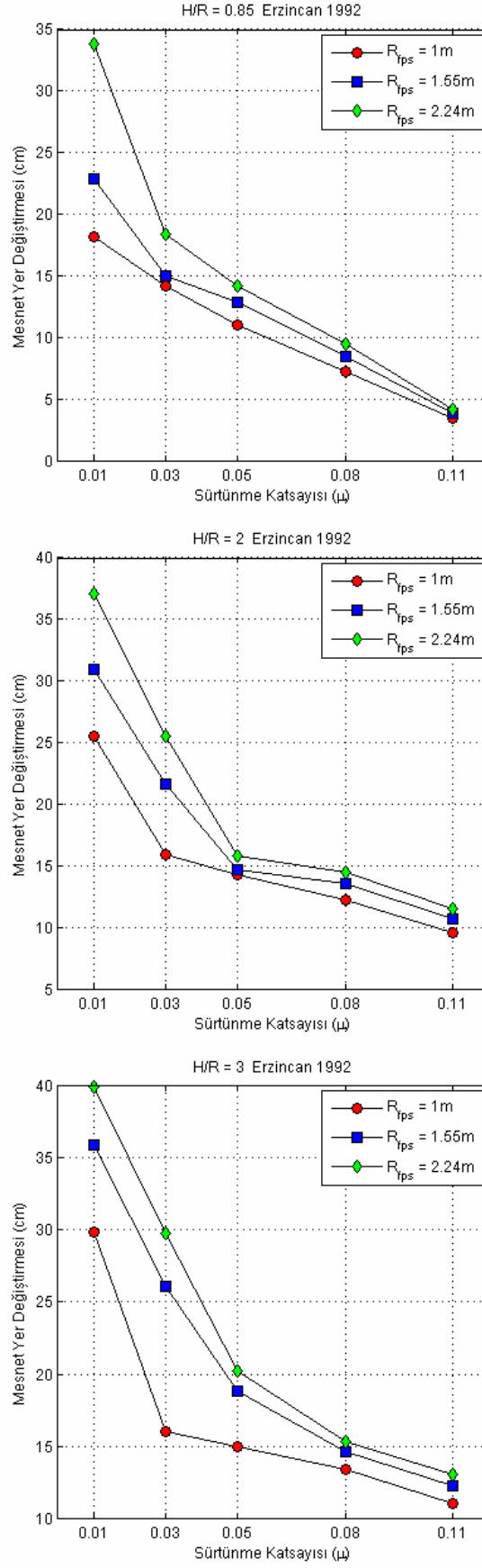
Şekil E.8 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Yarımca}$)



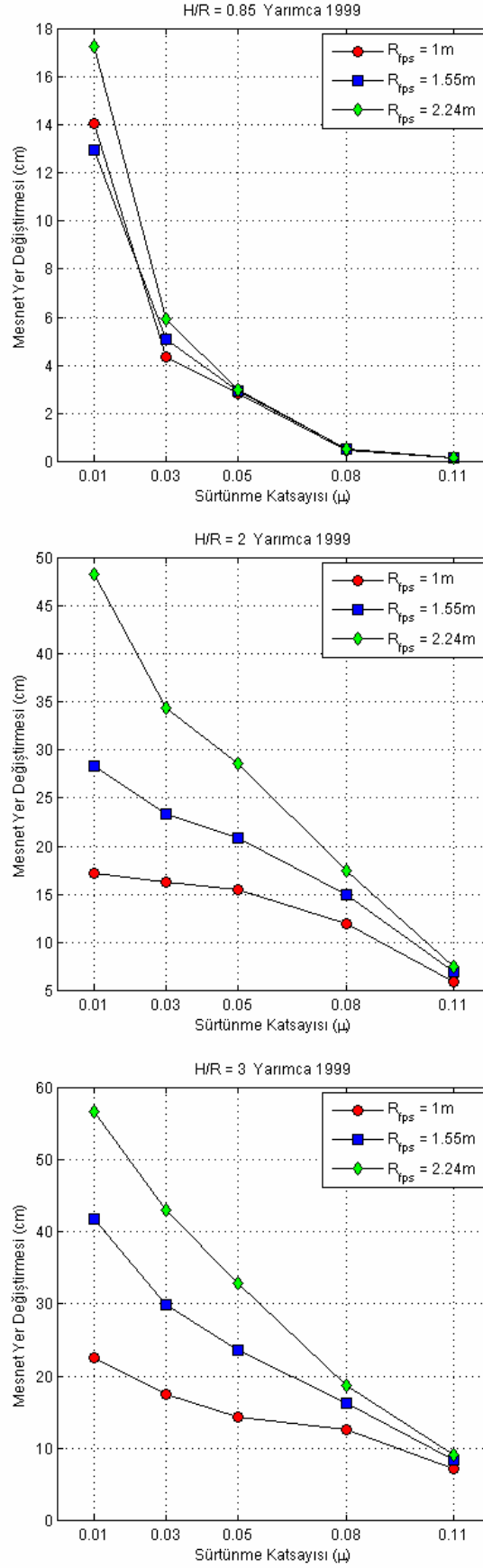
Şekil E.9 : Kayma yüzeyi eğrilik yarıçapının ve sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - \text{Yarımcı}$)



Şekil E.10 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (El Centro 1940 KG)

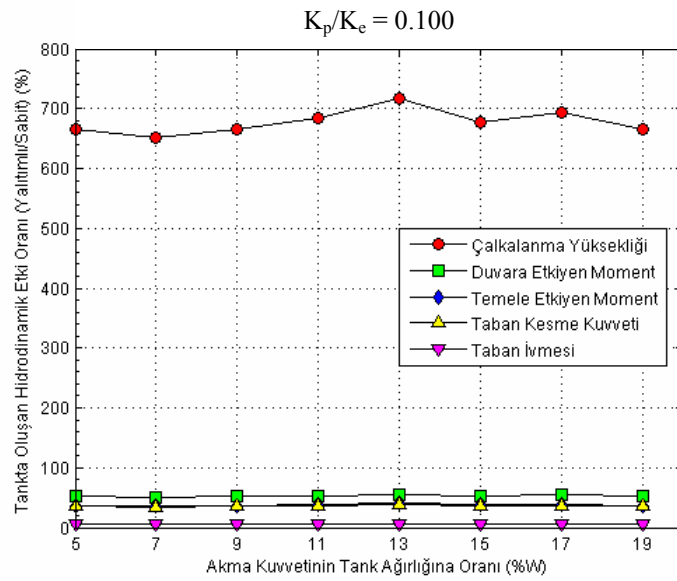
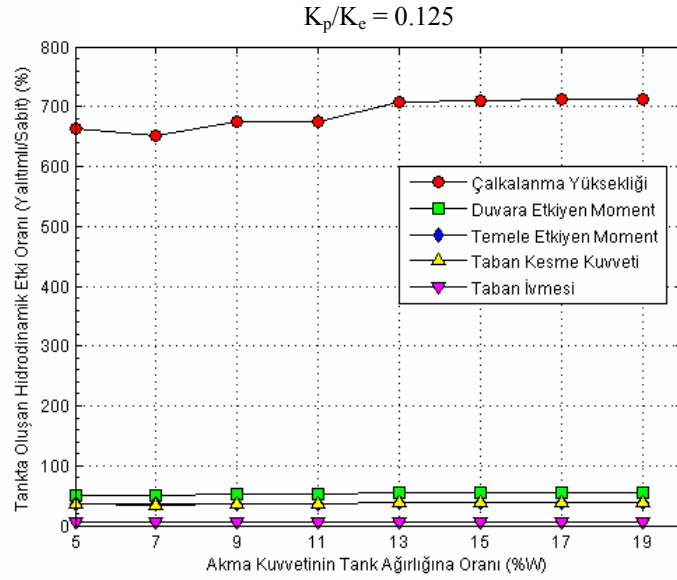
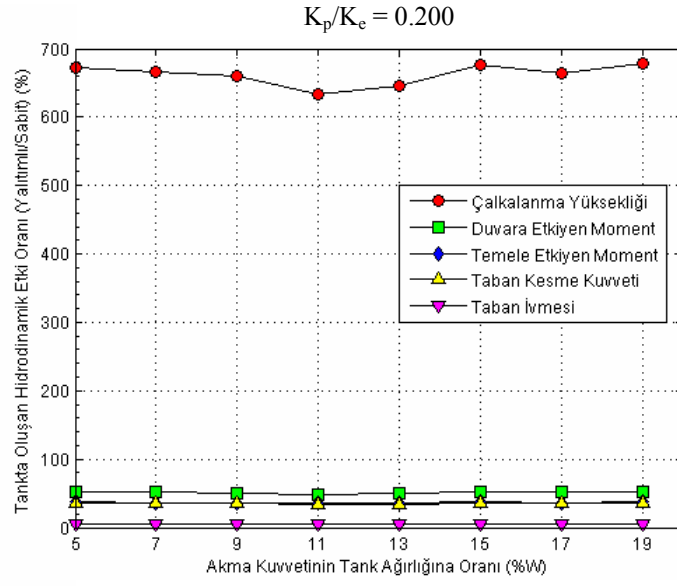


Şekil E.11 : Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Erzincan 1992 DB)

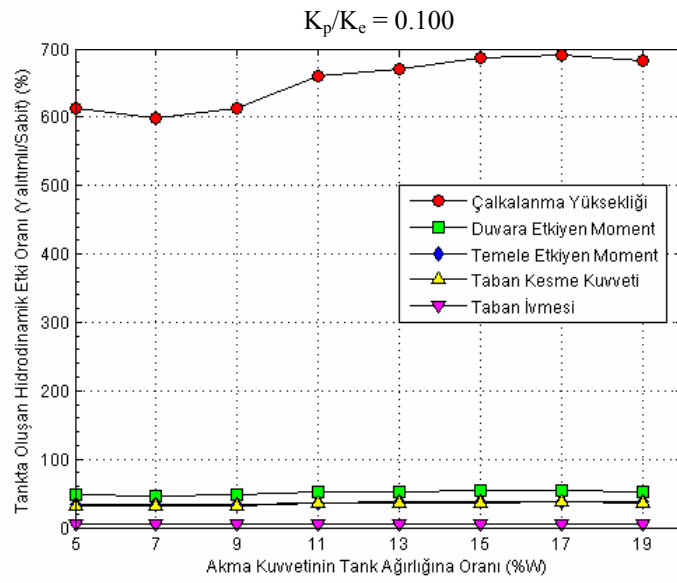
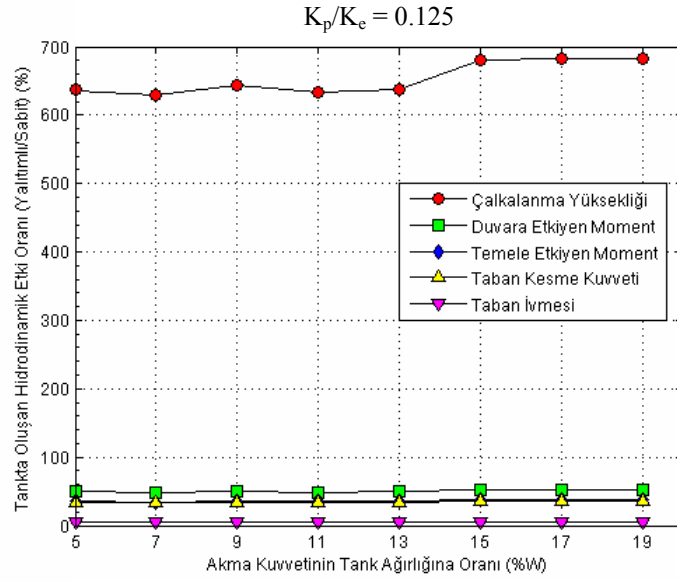
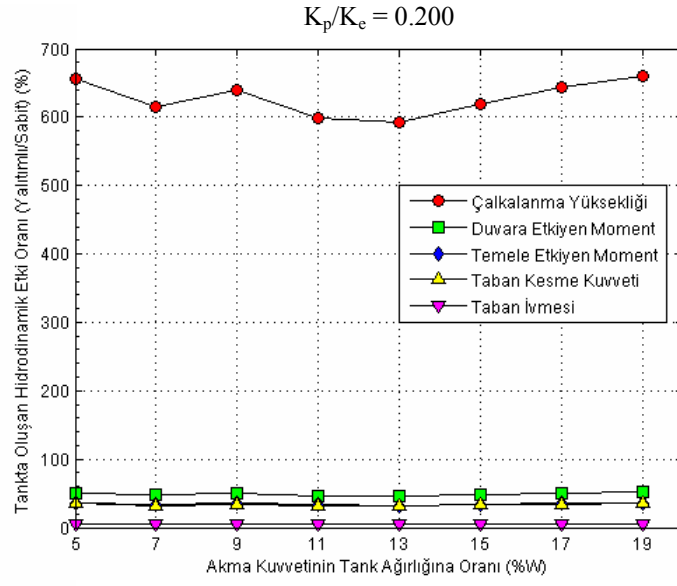


Şekil E.12 : Sürtünlü sarkaç mesnetlerinin yer değiştirmeleri (Yarımca 1999 DB)

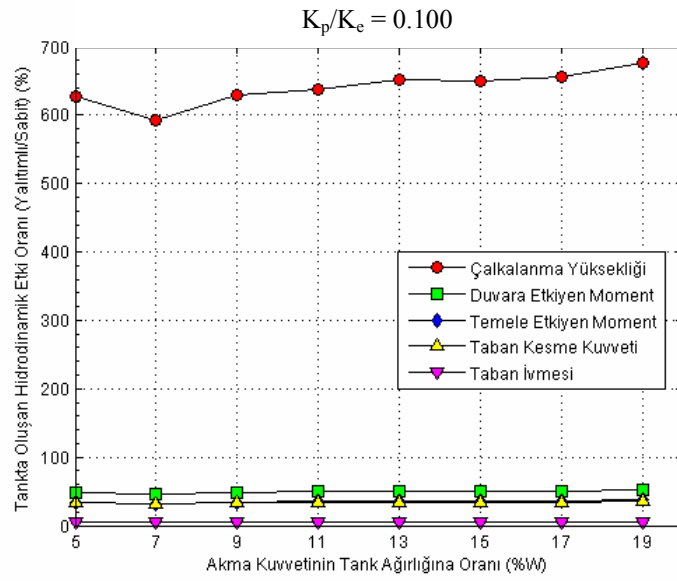
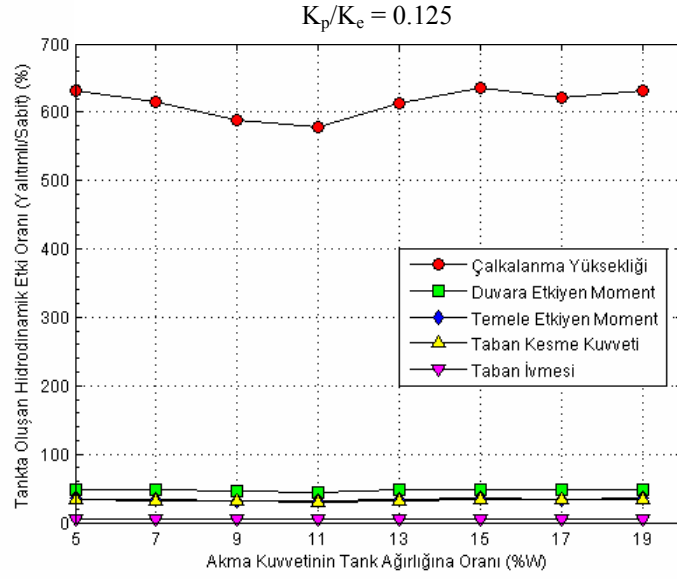
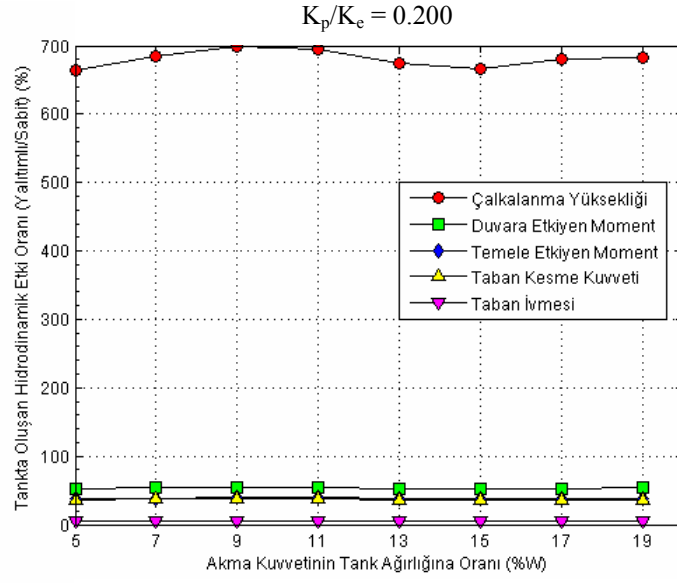
**EK F. KURŞUN ÇEKİRDEKLİ ELASTOMER MESNETLİ SIVI DEPOLARI
İÇİN ÖLÇEKLENMEMİŞ İVME KAYITLARININ KULLANILDIĞI
ÇALIŞMANIN SONUÇLARI**



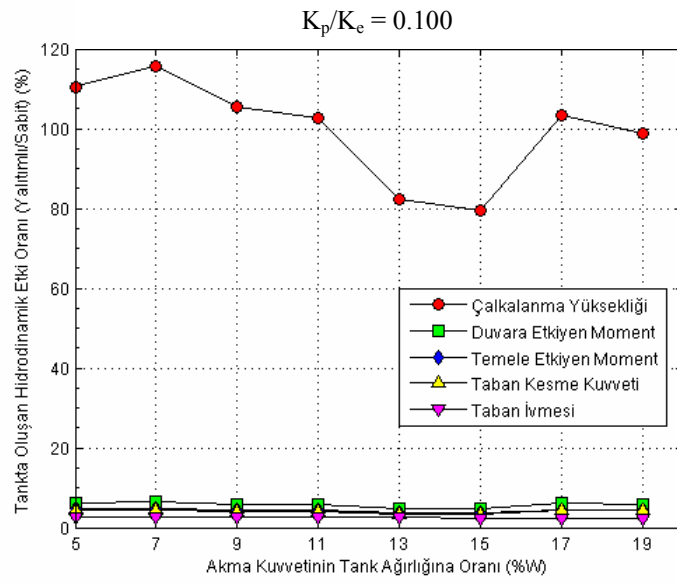
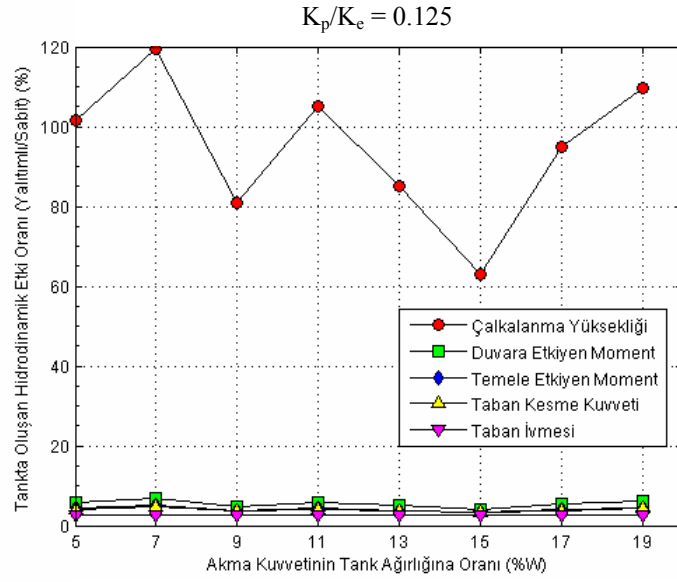
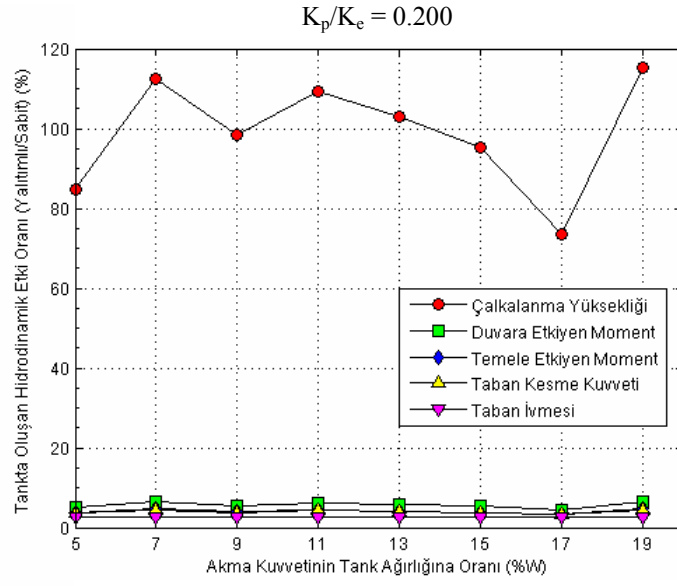
Şekil F.1 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s - El Centro$)



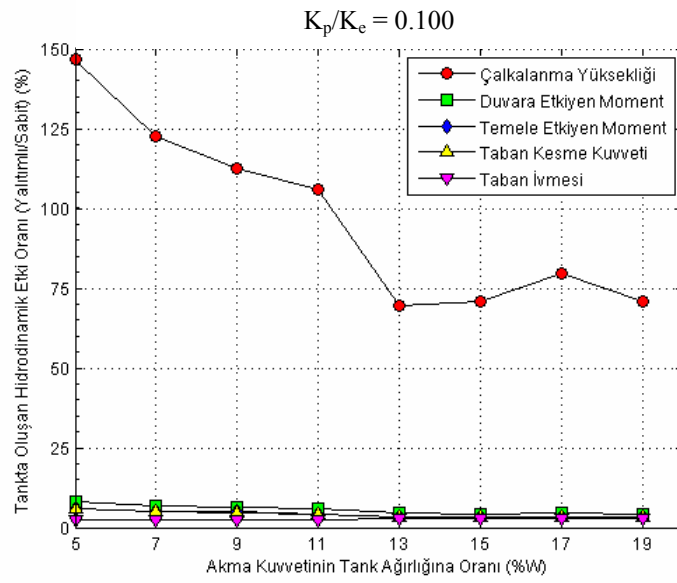
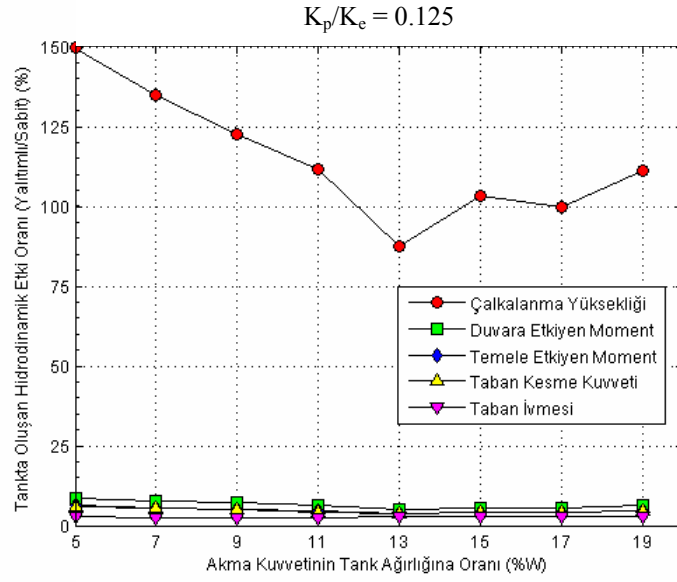
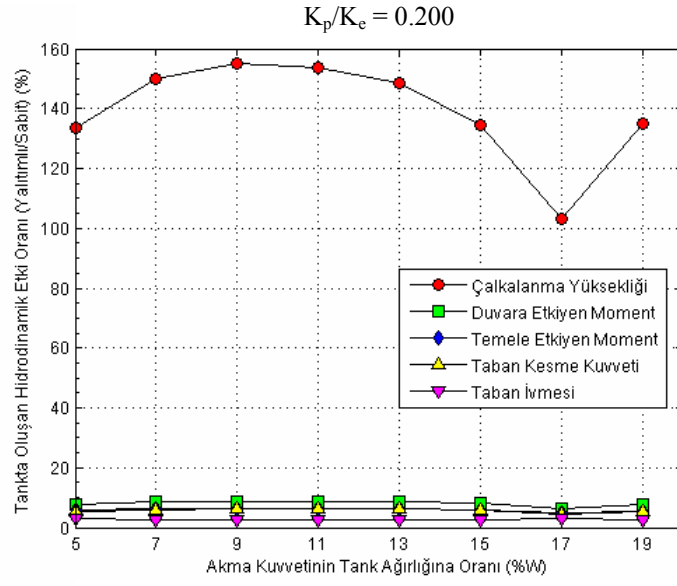
Şekil F.2 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - El Centro$)



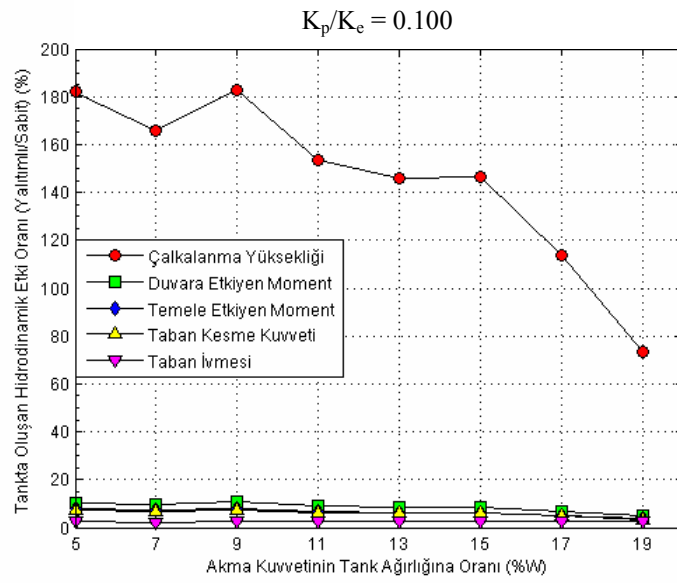
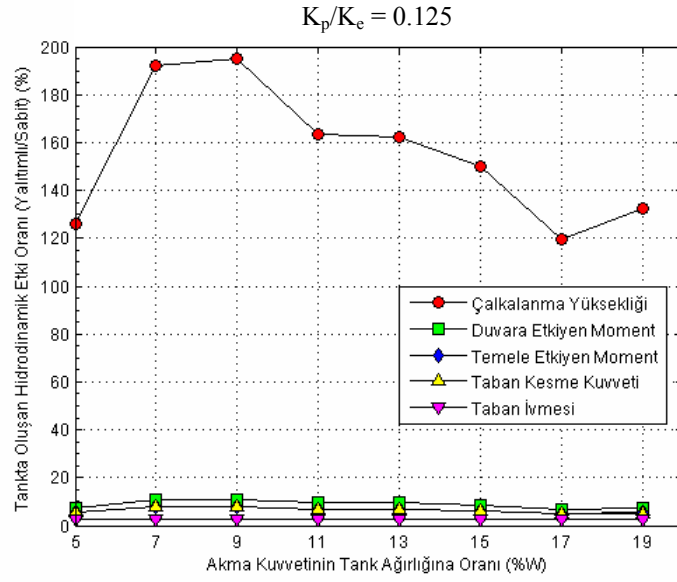
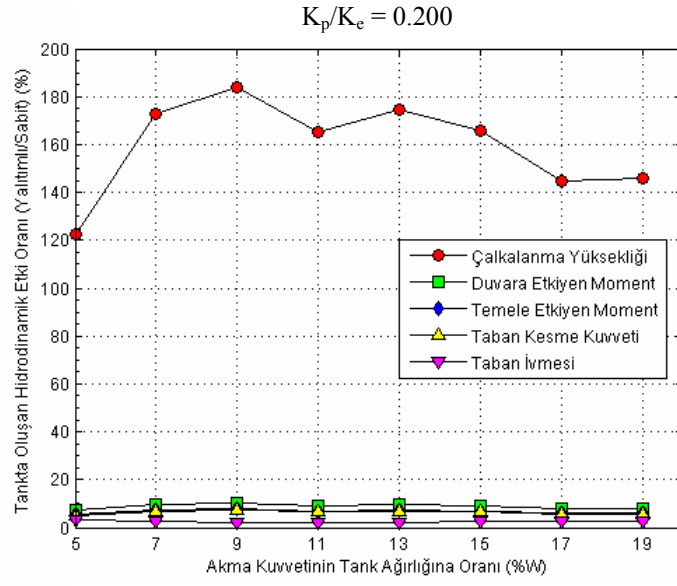
Şekil F.3 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s - El Centro$)



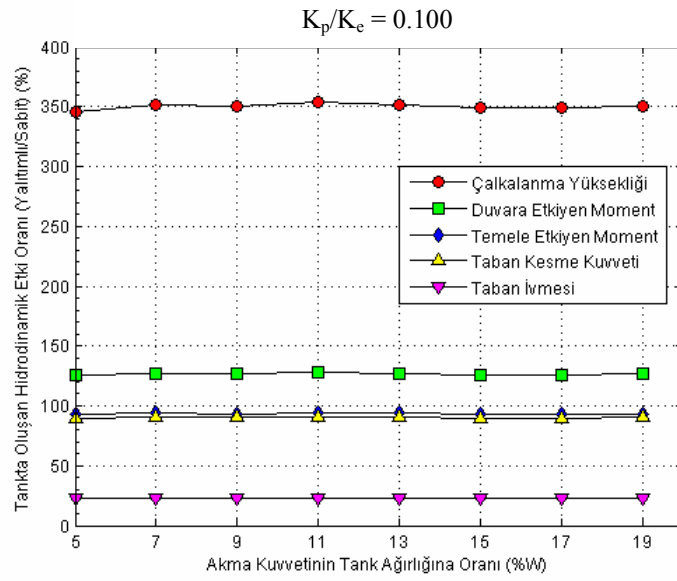
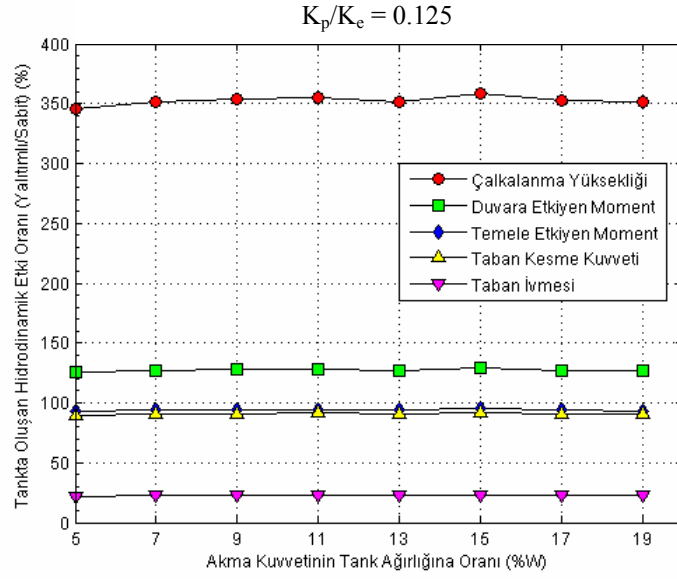
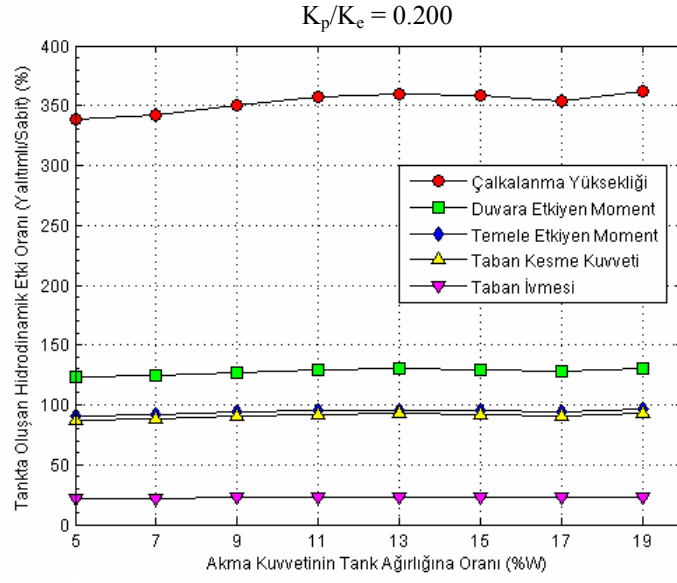
Şekil F.4 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s$ – Erzincan)



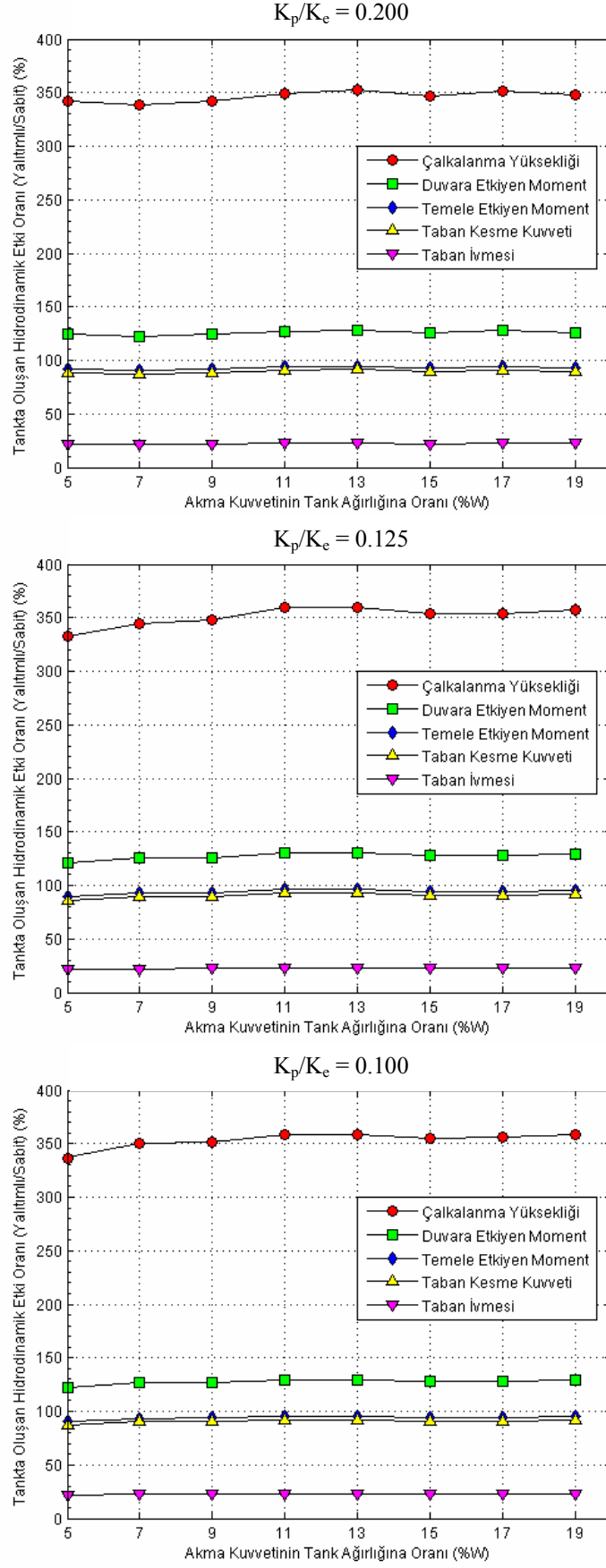
Şekil F.5 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – $T_p = 2.5s$ – Erzincan)



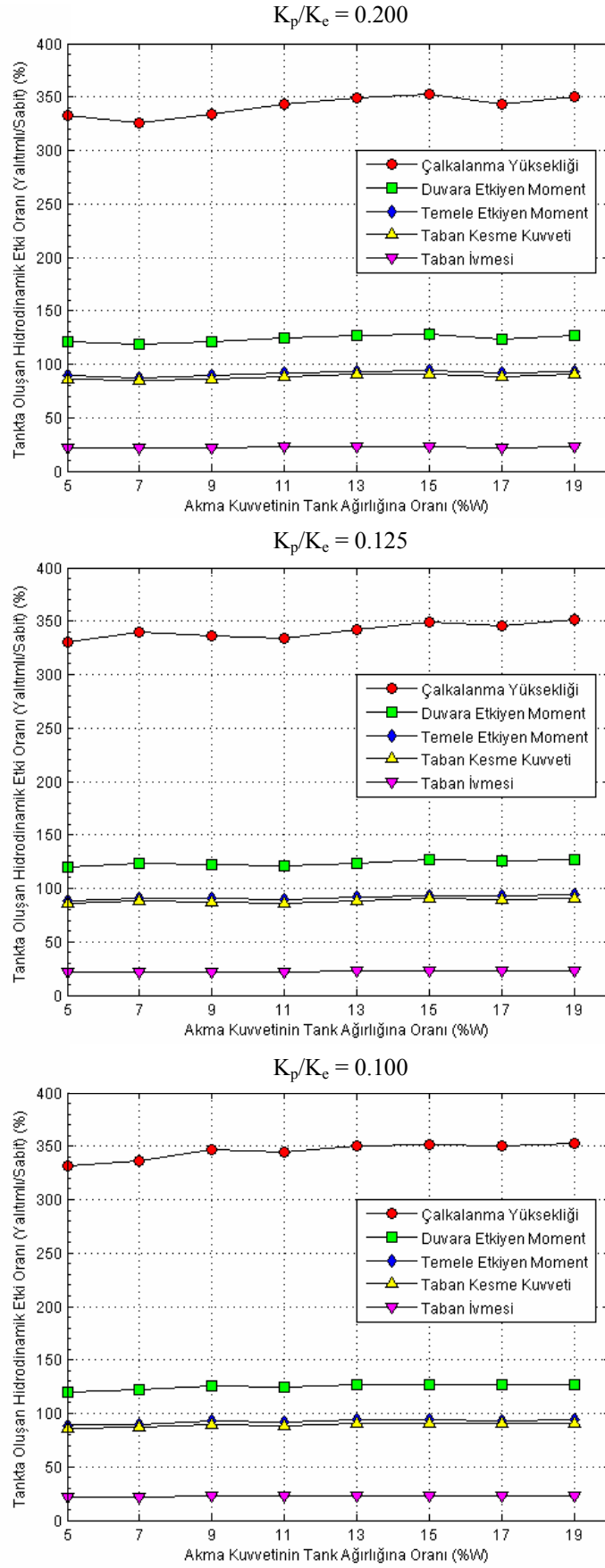
Şekil F.6 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Erzincan)



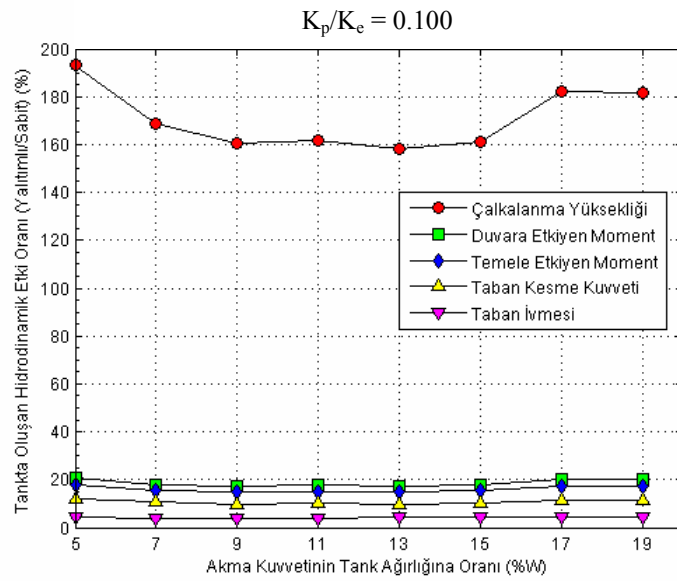
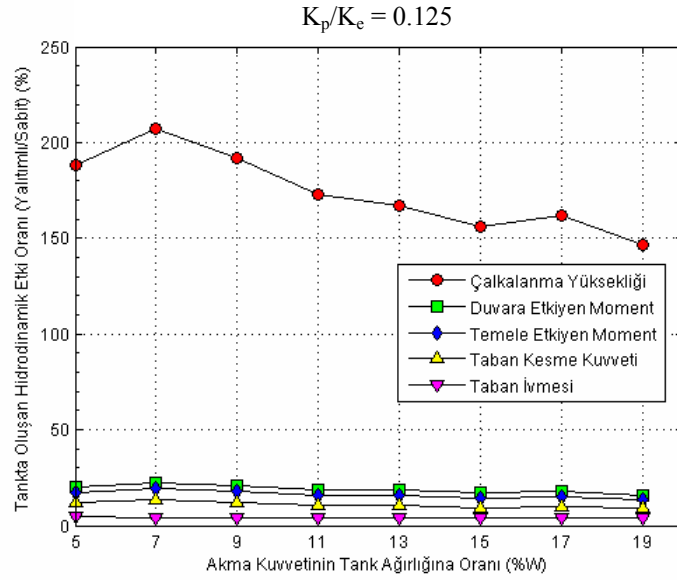
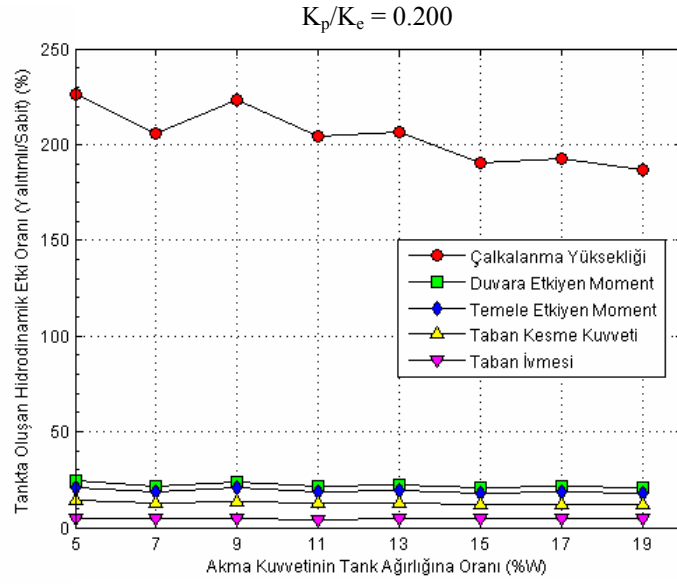
Şekil F.7 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2s$ – Yarımca)



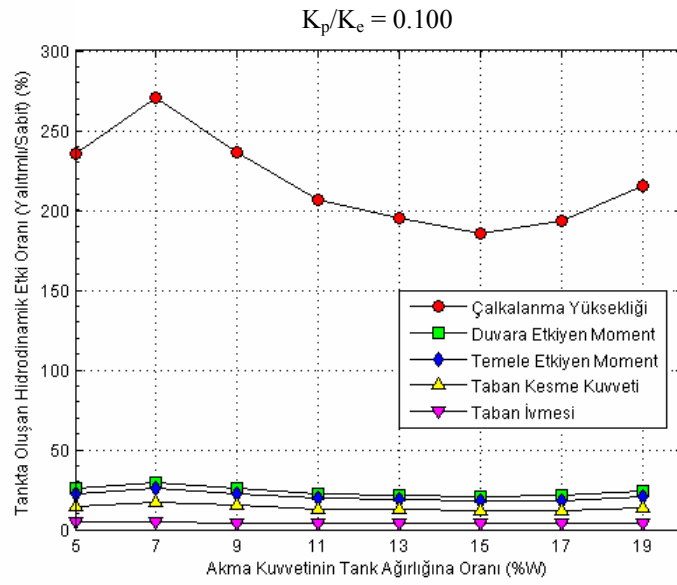
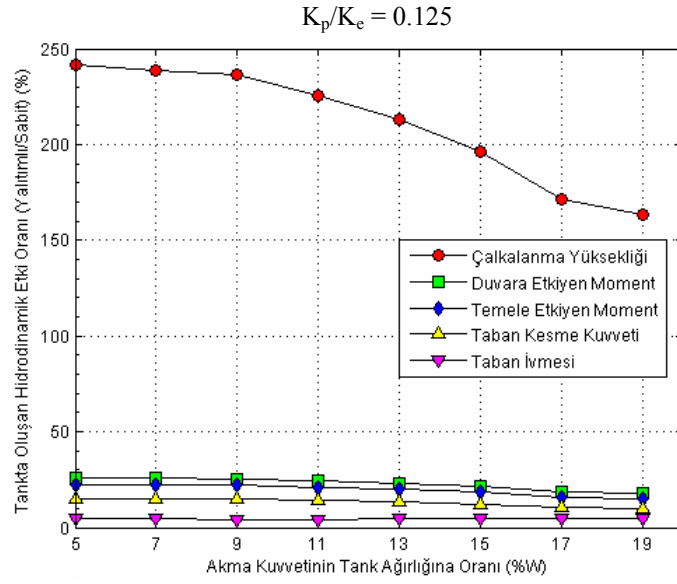
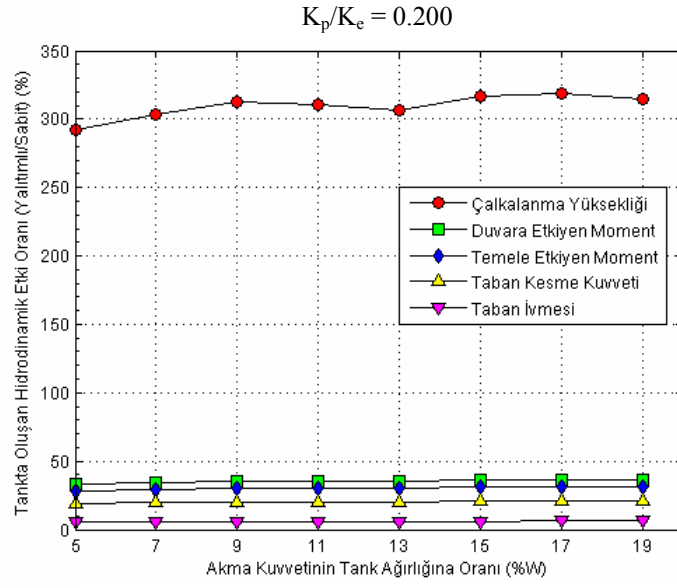
Şekil F.8 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 2.5s - \text{Yarımca}$)



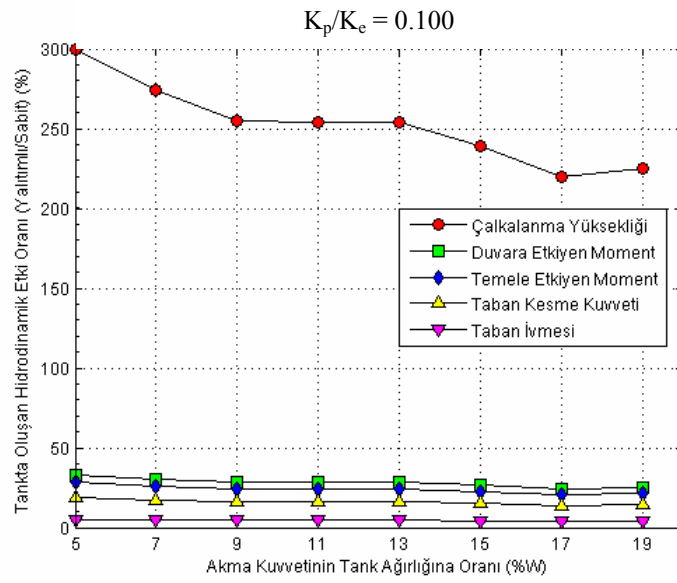
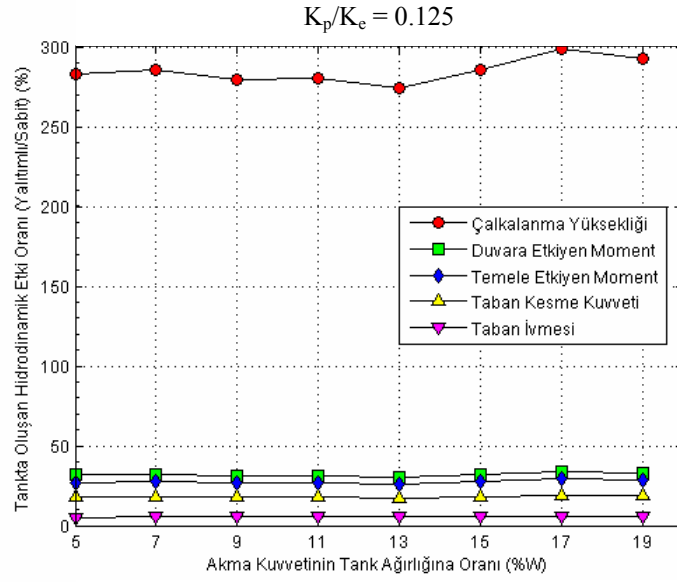
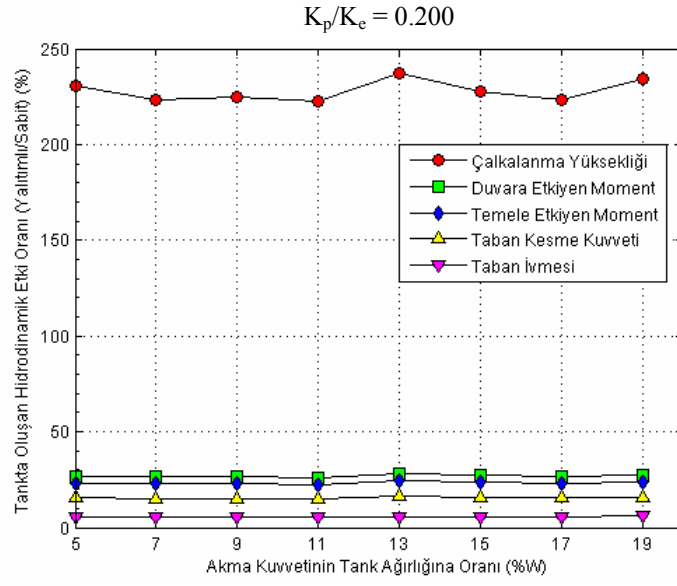
Şekil F.9 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - T_p = 3s$ – Yarımcı)



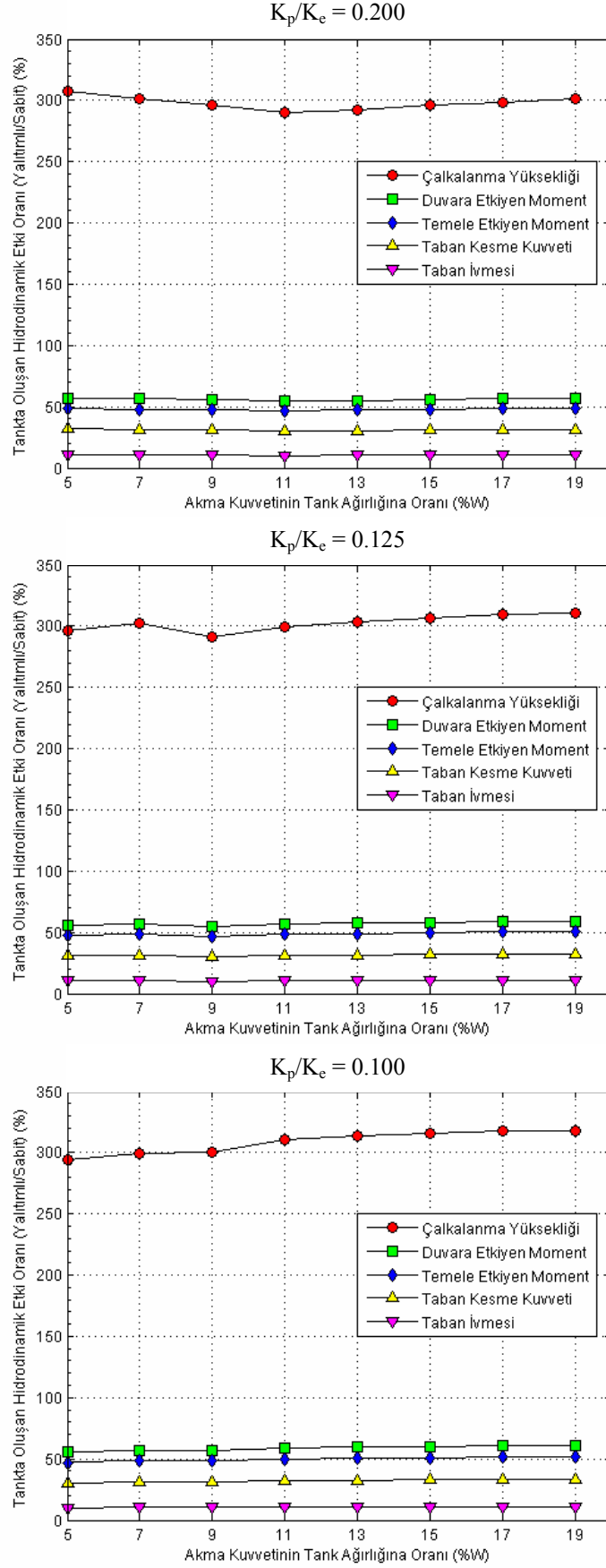
Şekil F.10 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – El Centro)



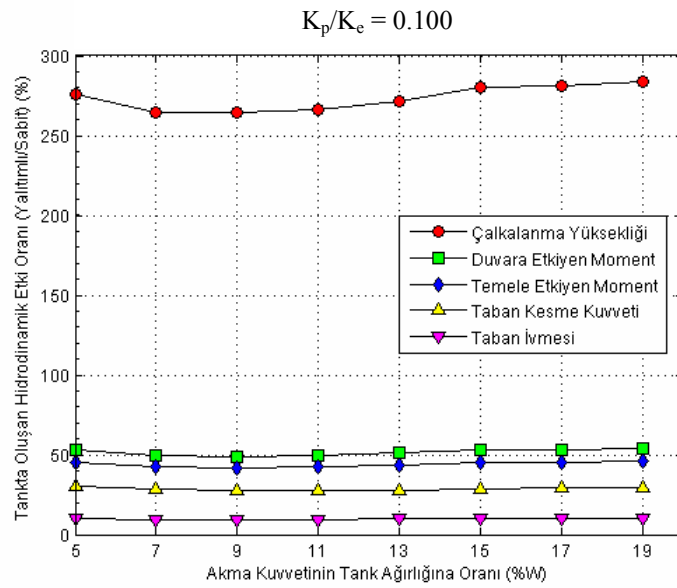
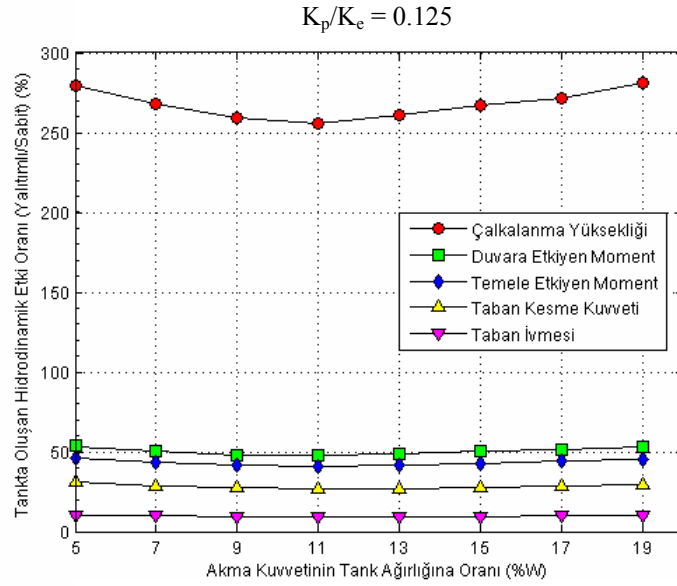
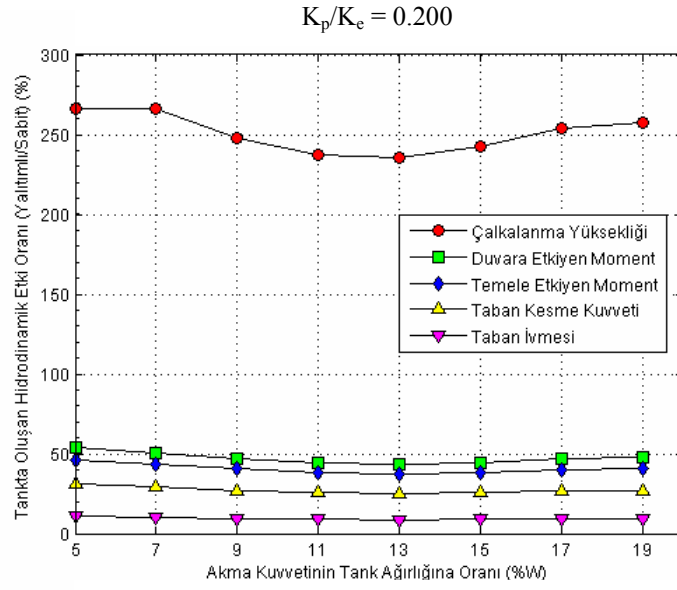
Şekil F.11 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – El Centro)



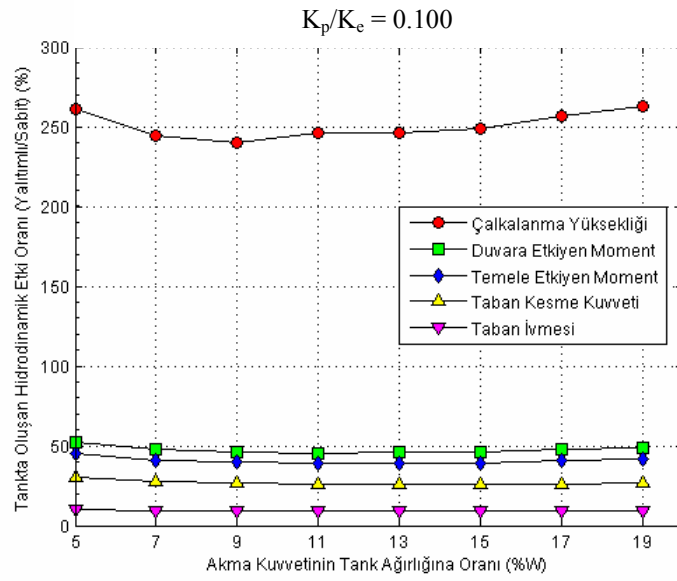
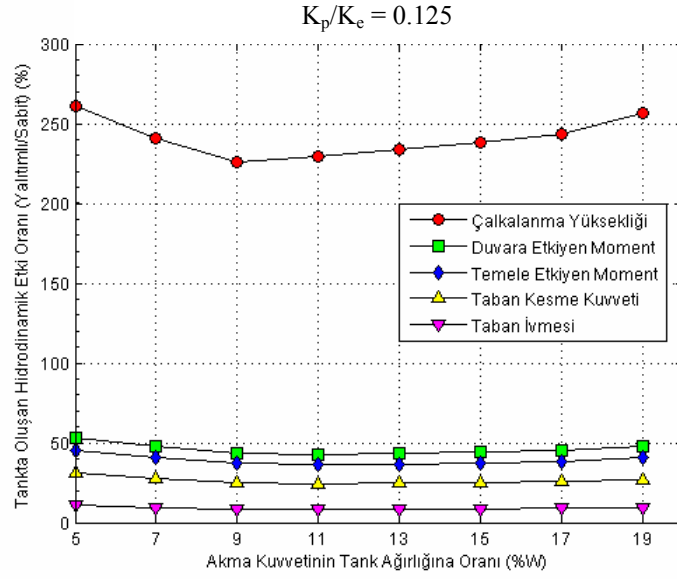
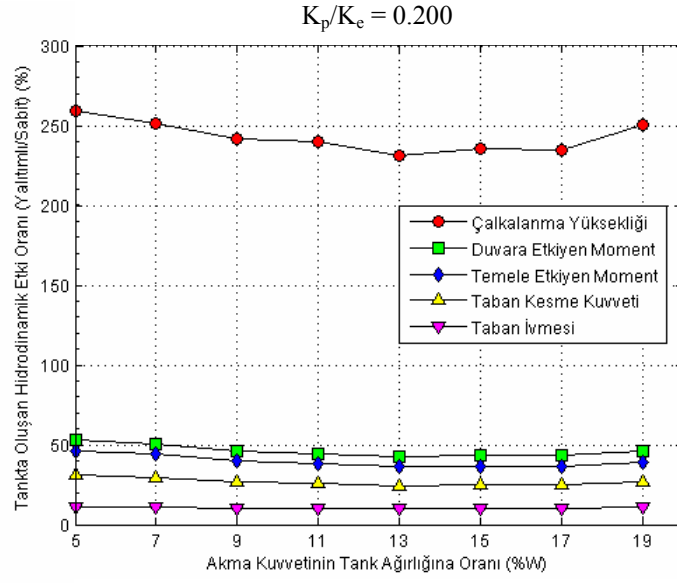
Şekil F.12 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - El Centro$)



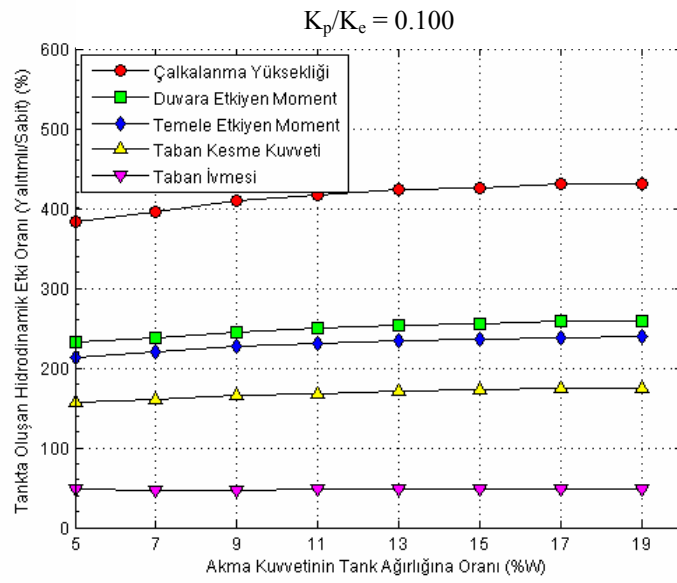
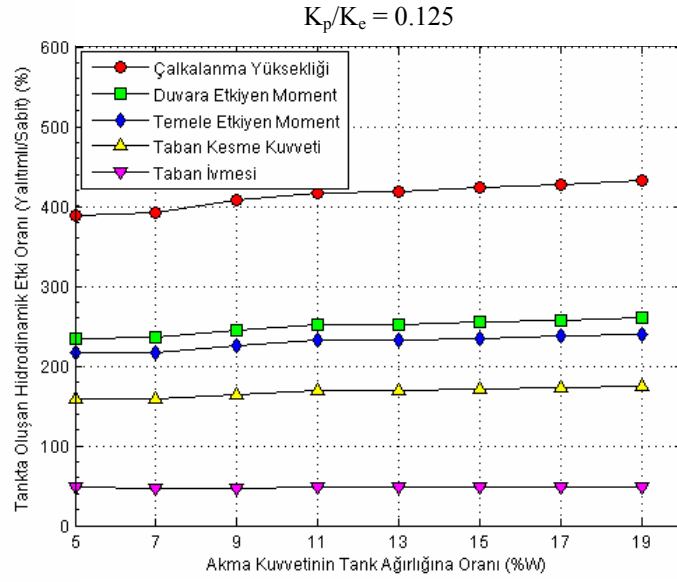
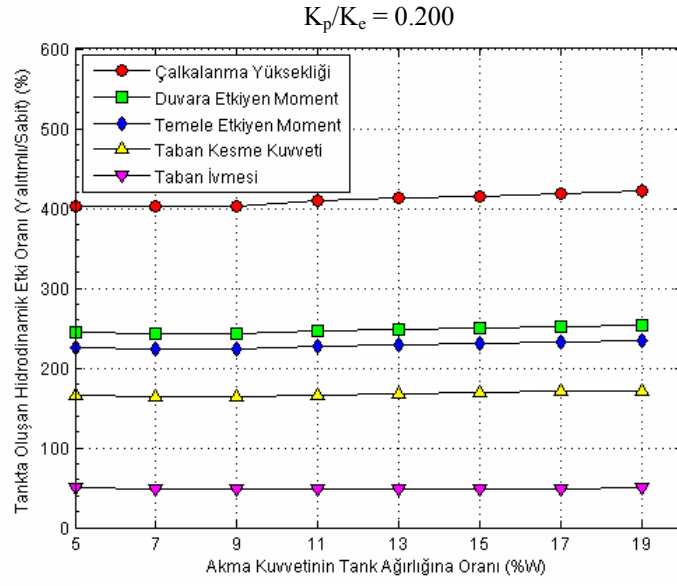
Şekil F.13 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – Erzincan)



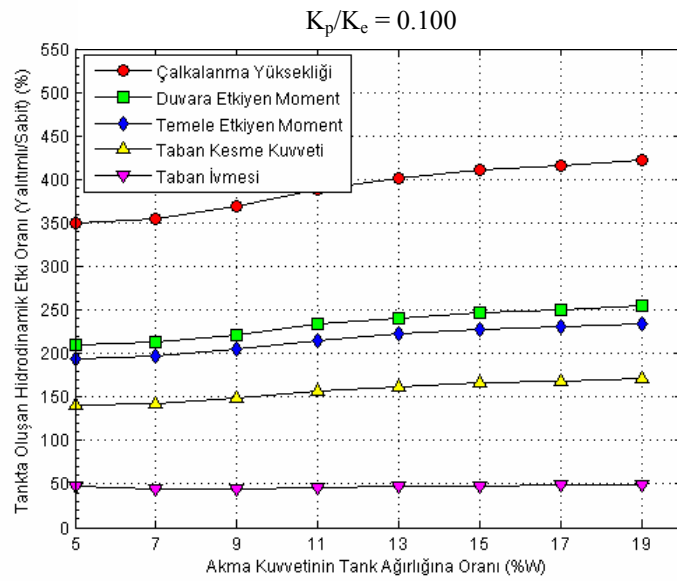
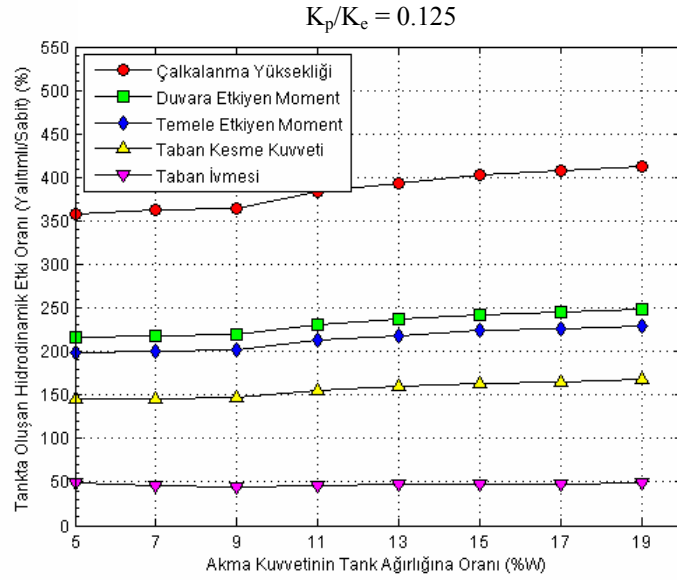
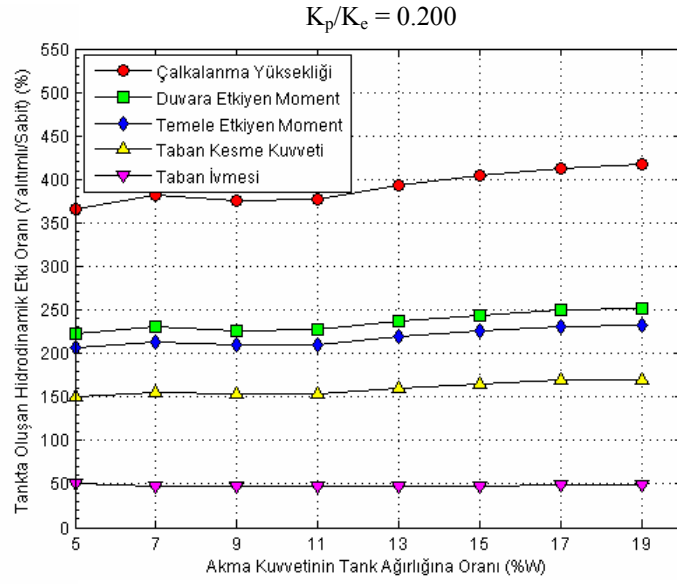
Şekil F.14 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)



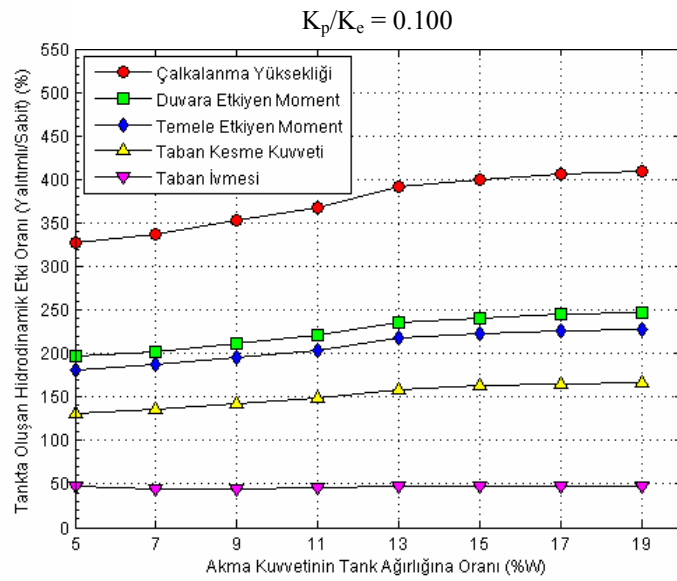
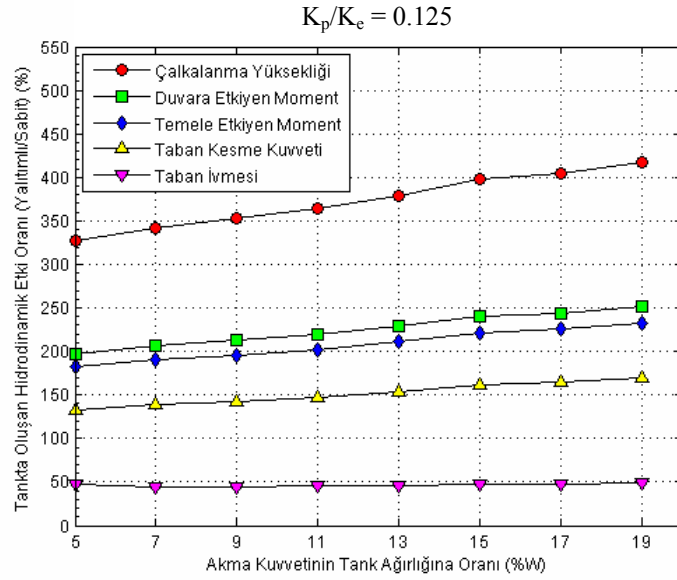
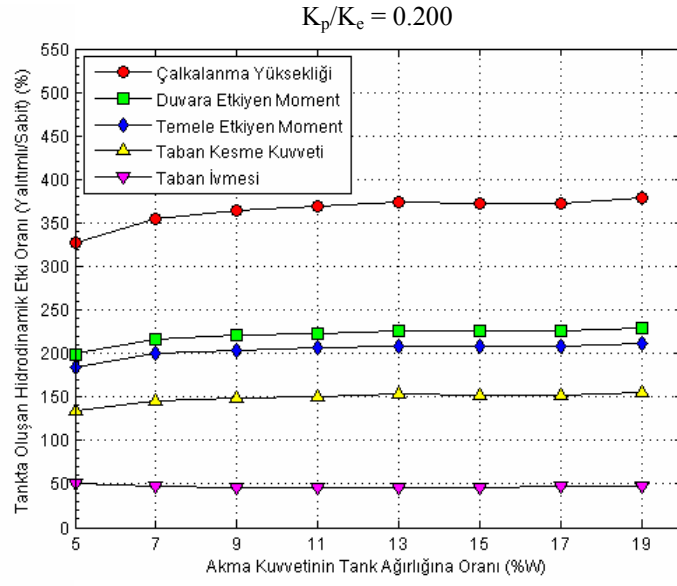
Şekil F.15 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s - \text{Erzincan}$)



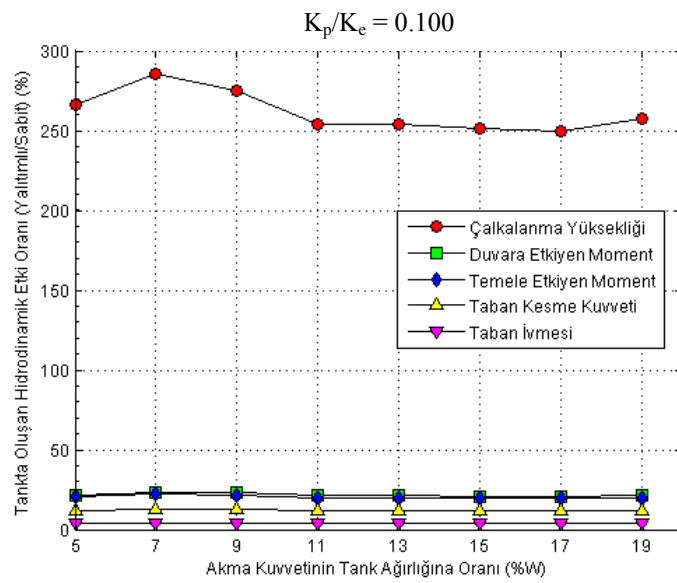
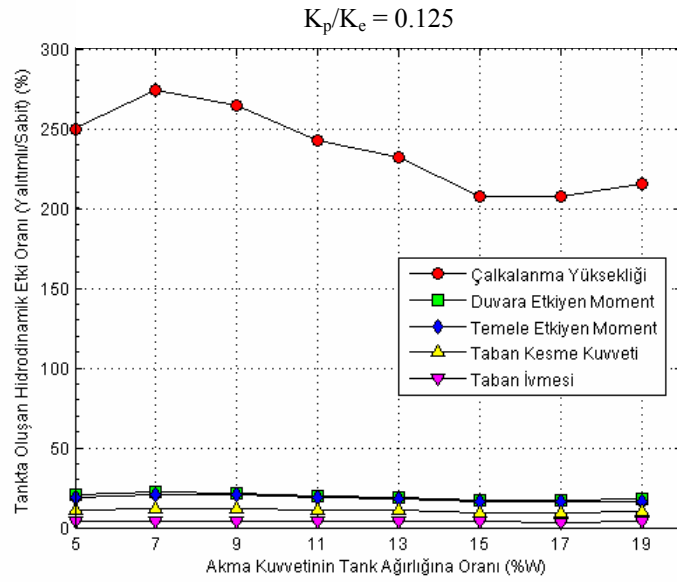
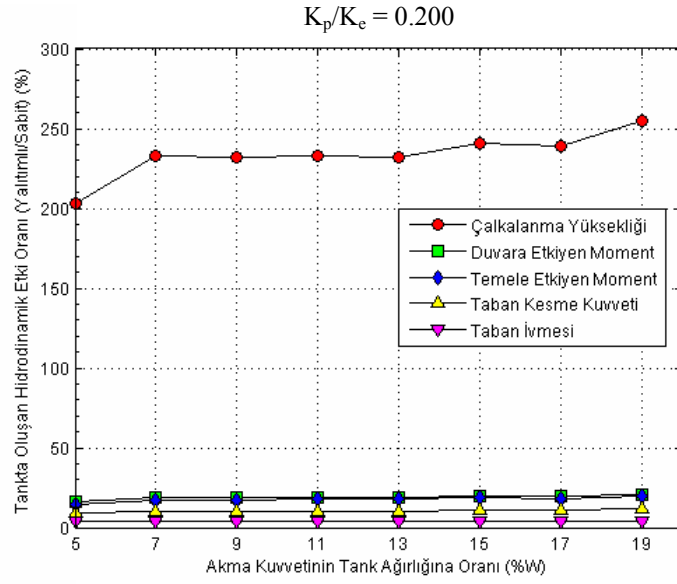
Şekil F.16 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2s$ – Yarımca)



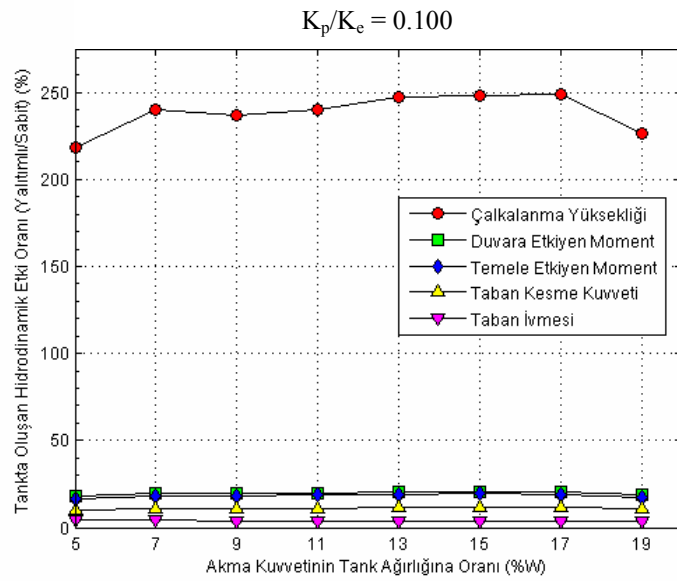
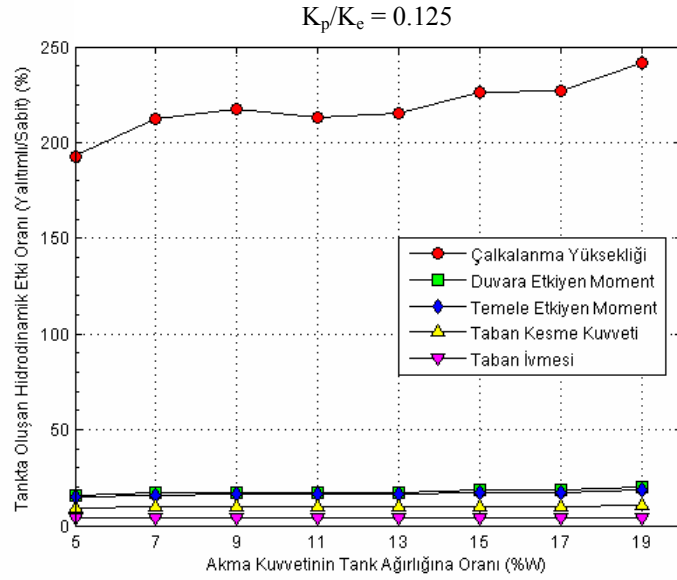
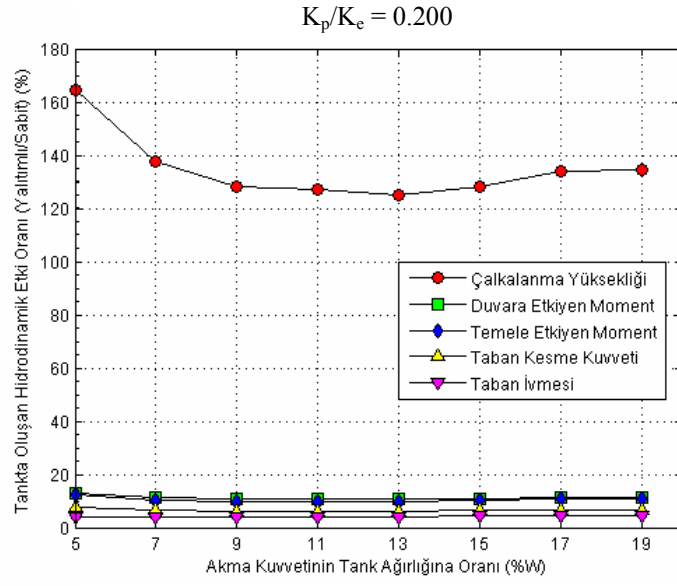
Şekil F.17 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 2.5s$ – Yarımca)



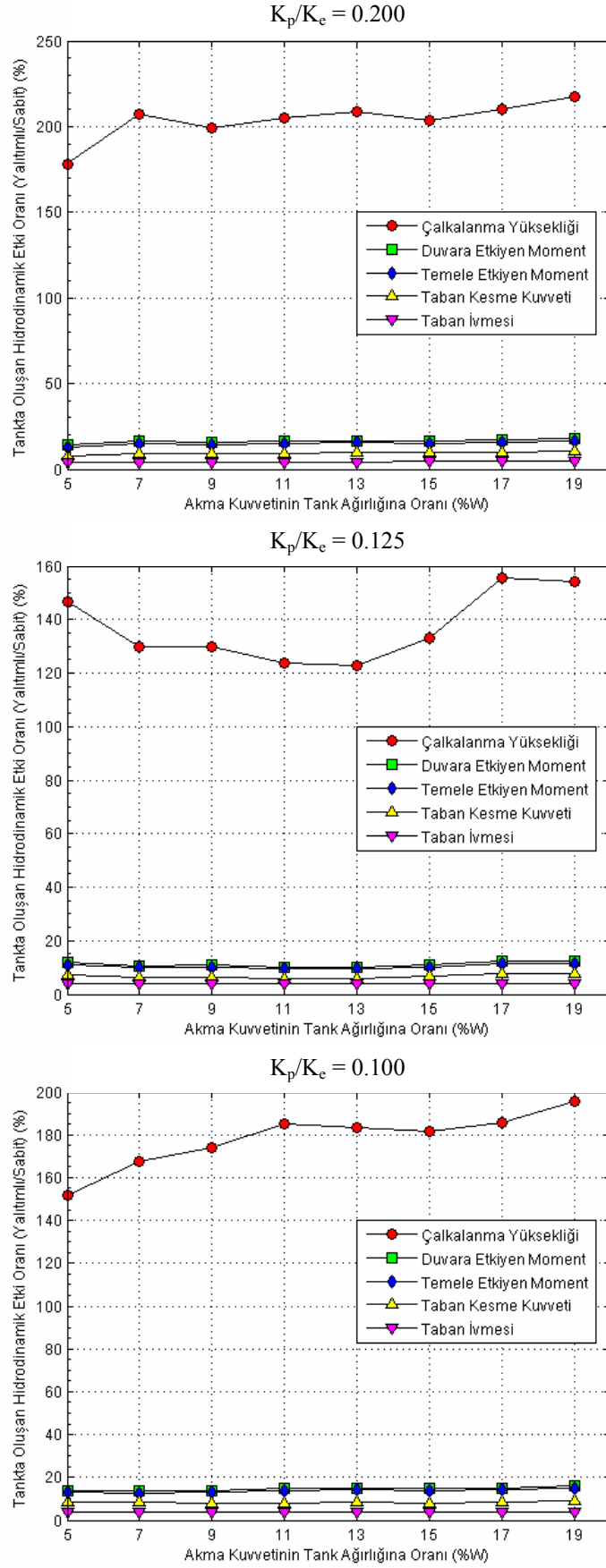
Şekil F.18 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 2 - T_p = 3s$ – Yarımca)



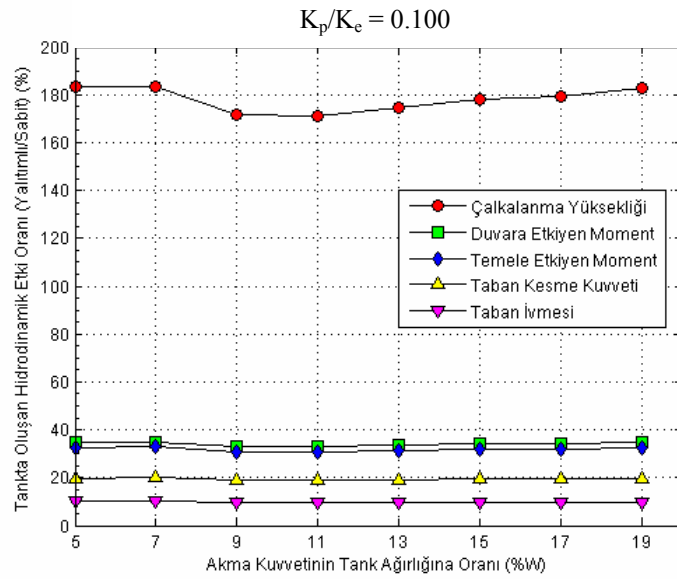
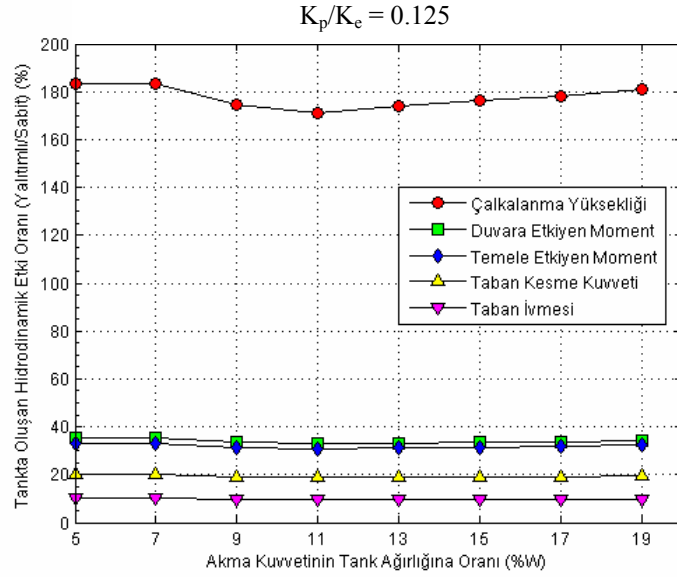
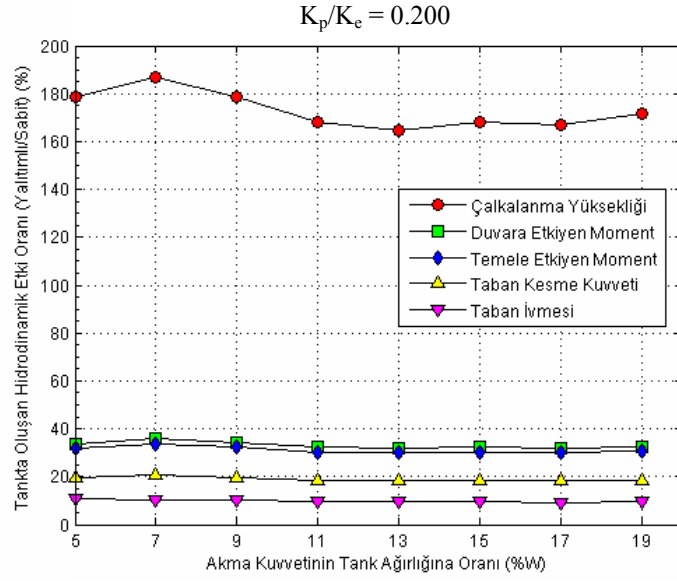
Şekil F.19 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – El Centro)



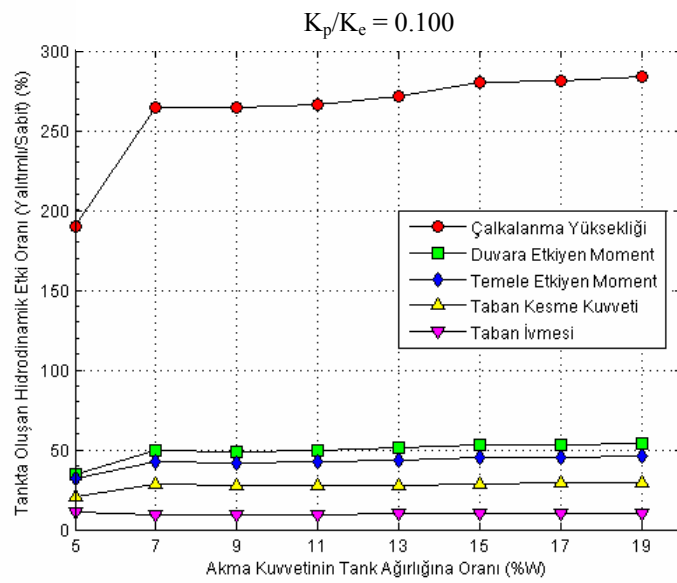
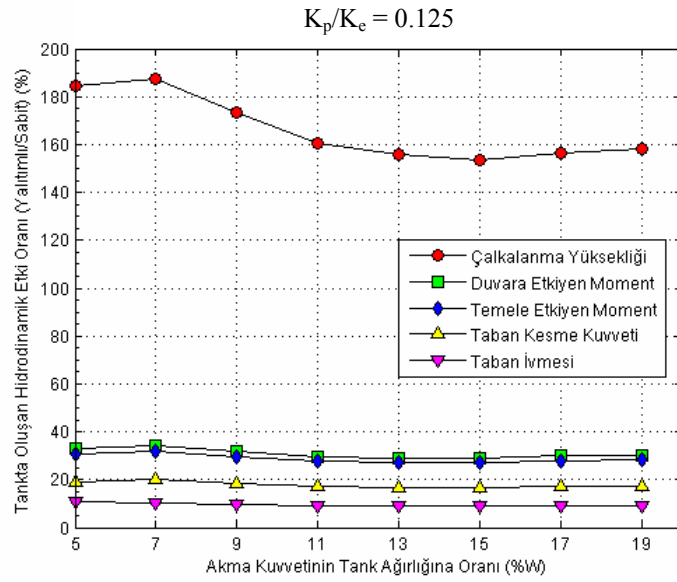
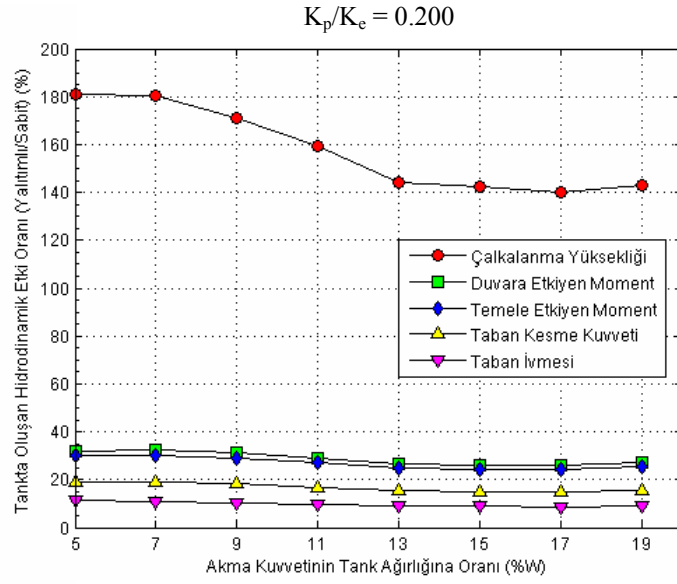
Şekil F.20 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – El Centro)



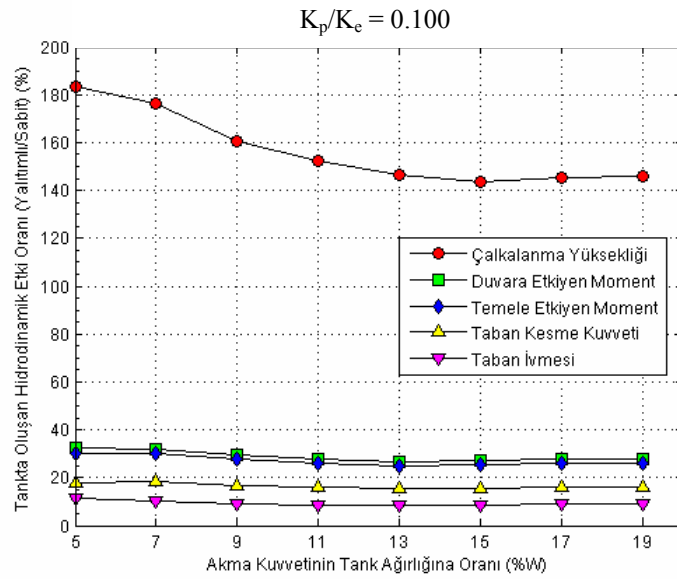
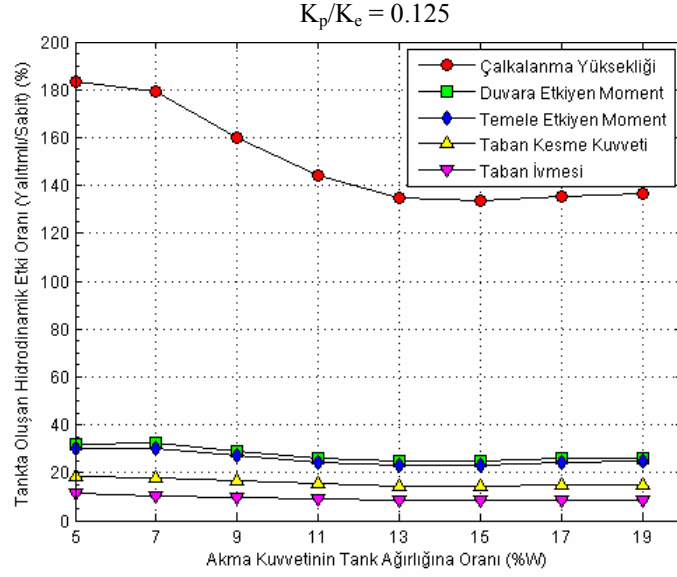
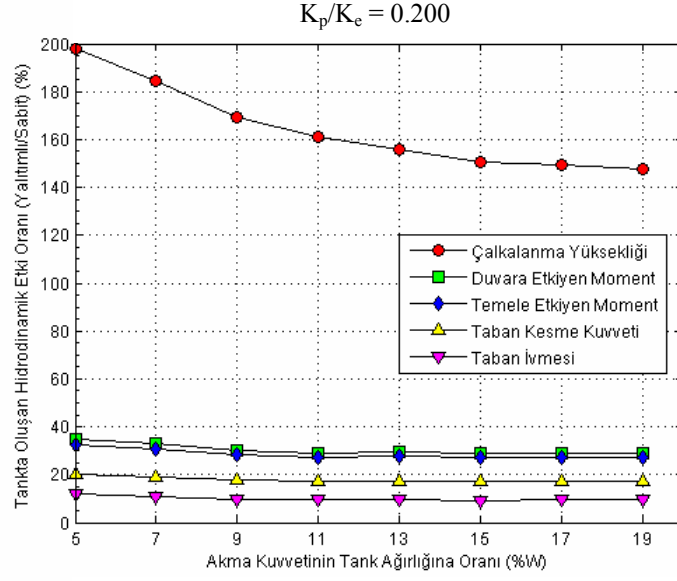
Şekil F.21 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - El Centro$)



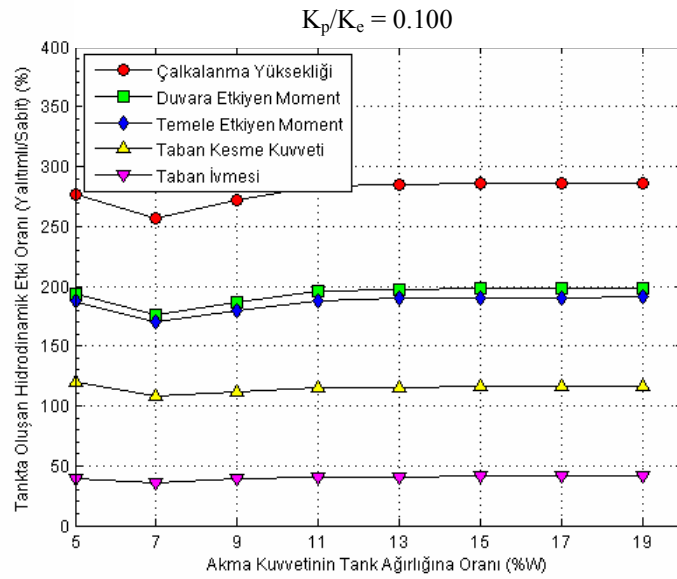
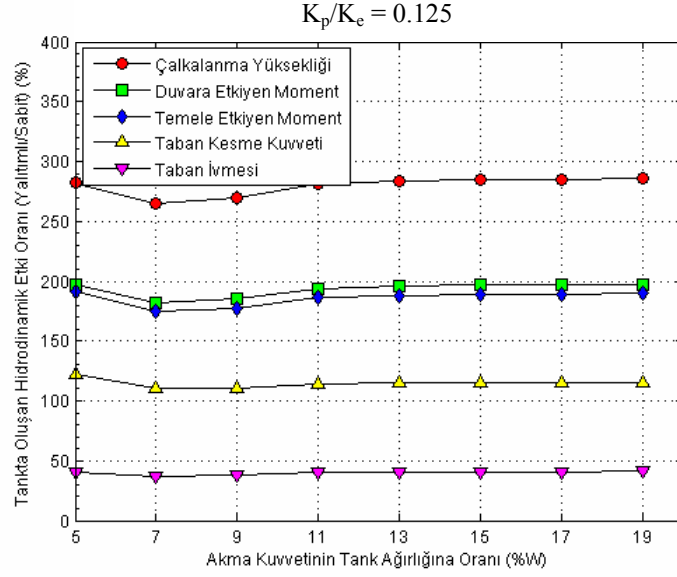
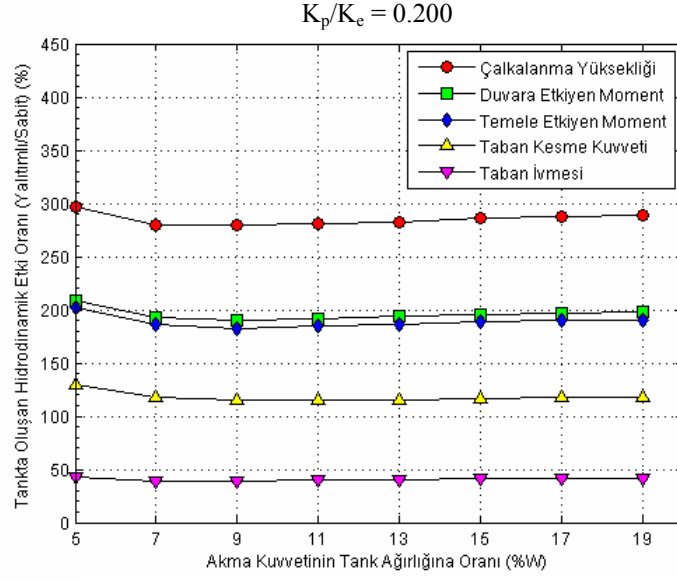
Şekil F.22 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Erzincan)



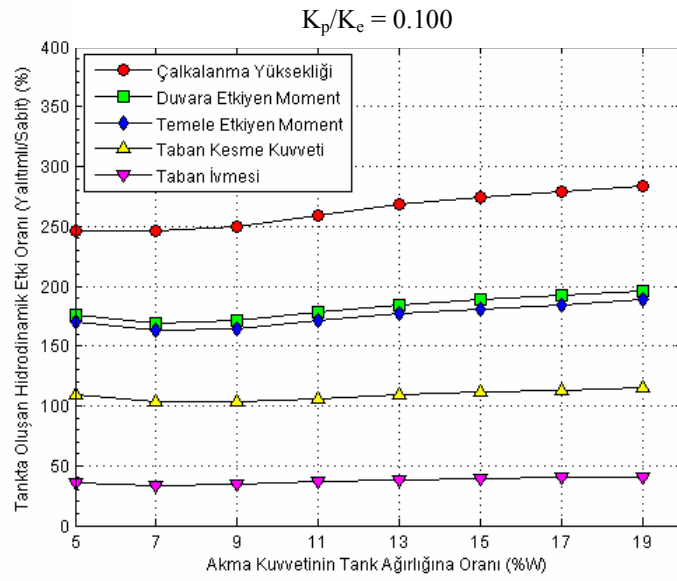
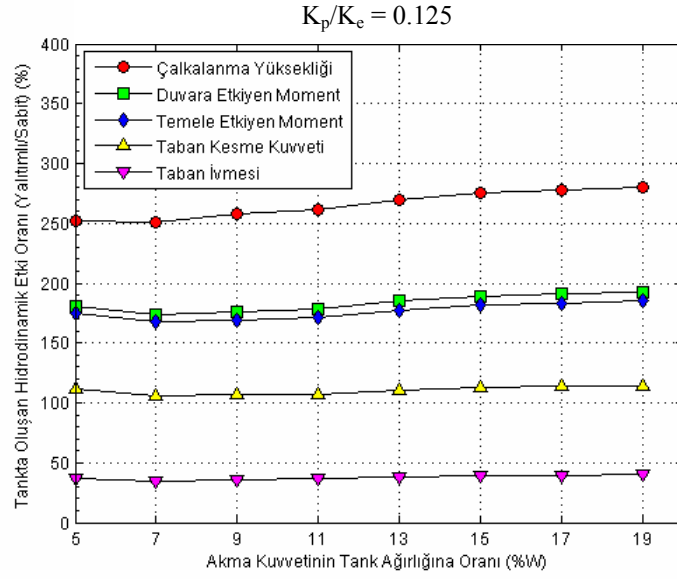
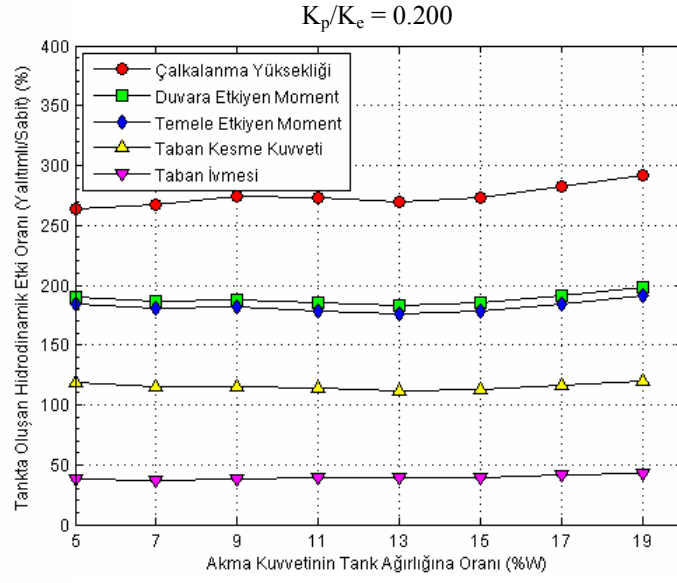
Şekil F.23 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Erzincan)



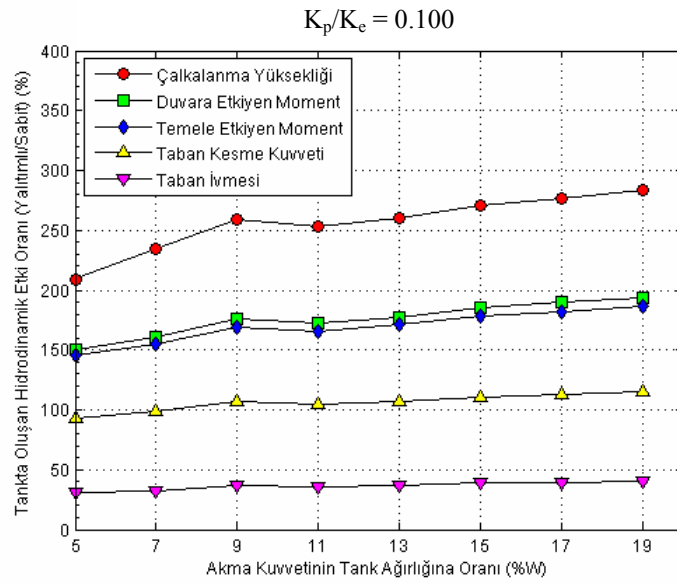
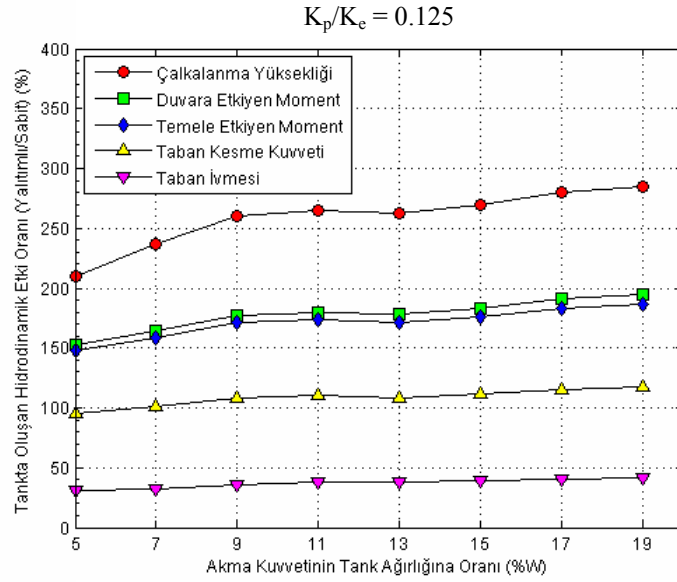
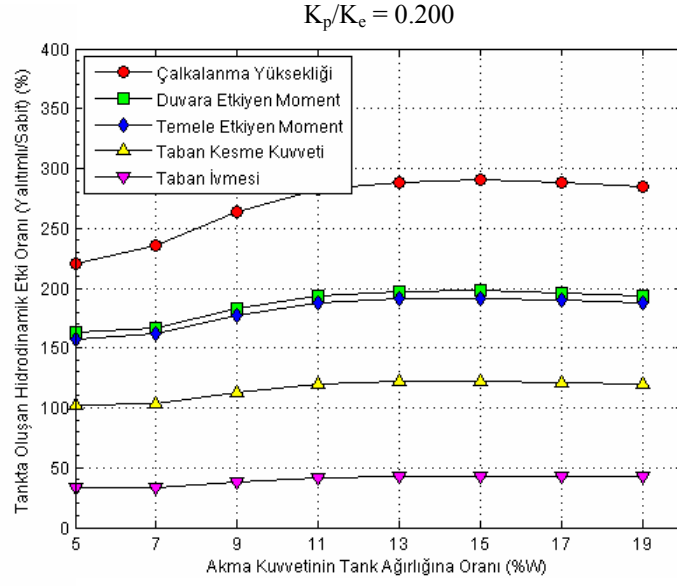
Şekil F.24 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - \text{Erzincan}$)



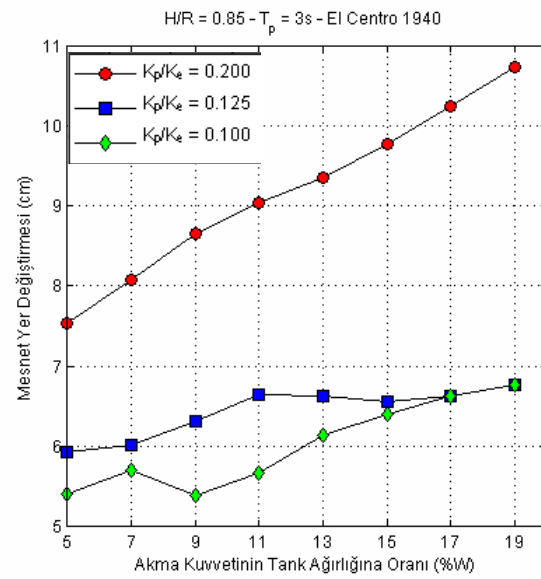
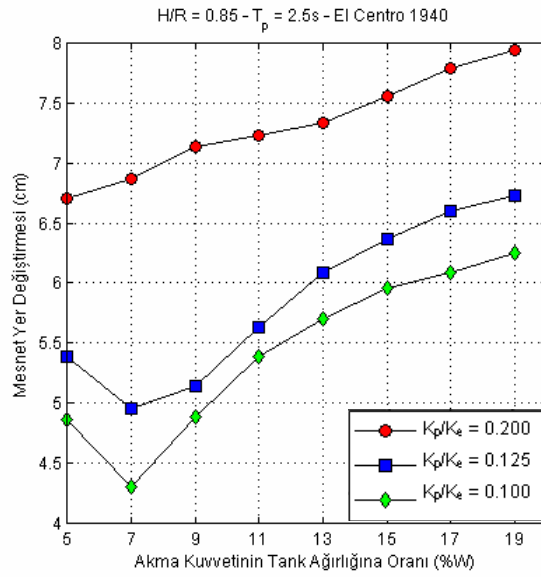
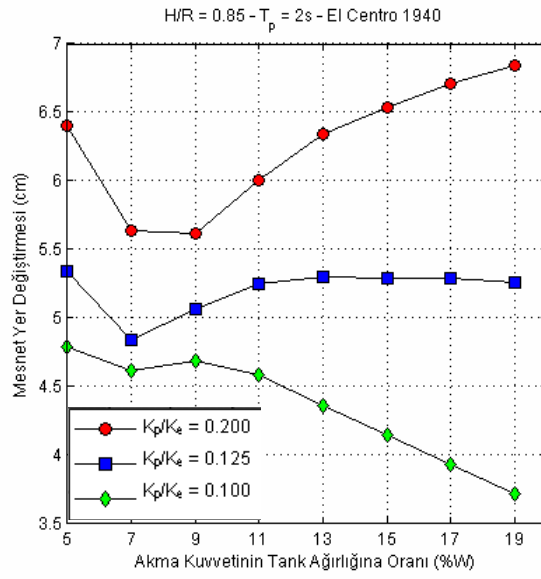
Şekil F.25 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2s$ – Yarımca)



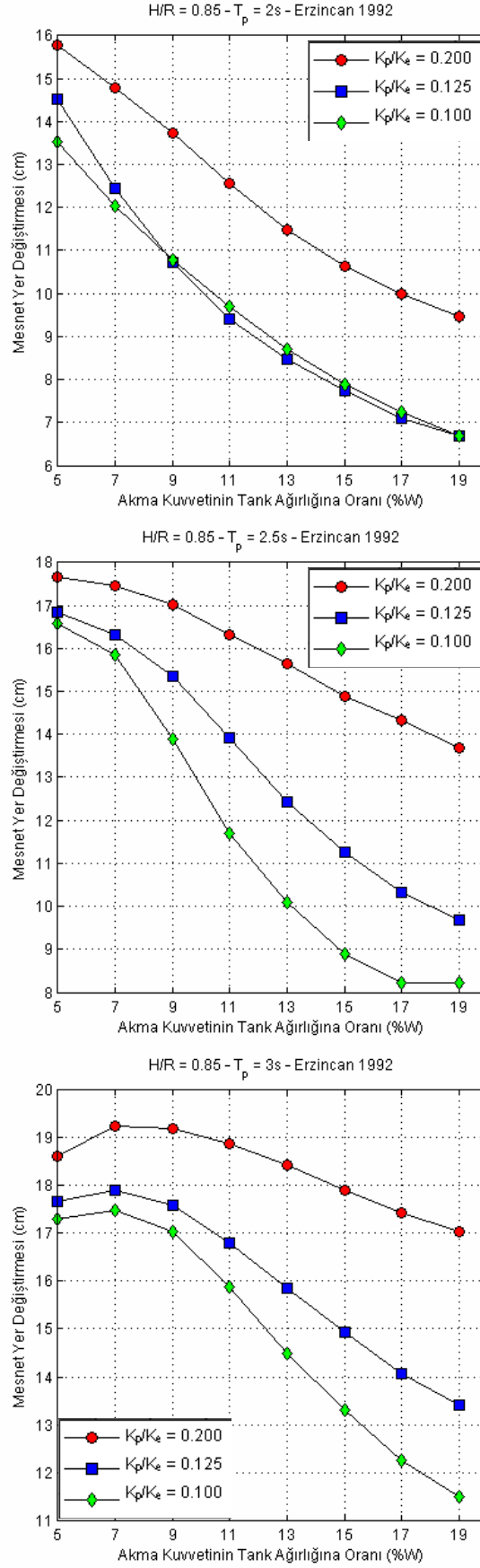
Şekil F.26 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 2.5s$ – Yarımca)



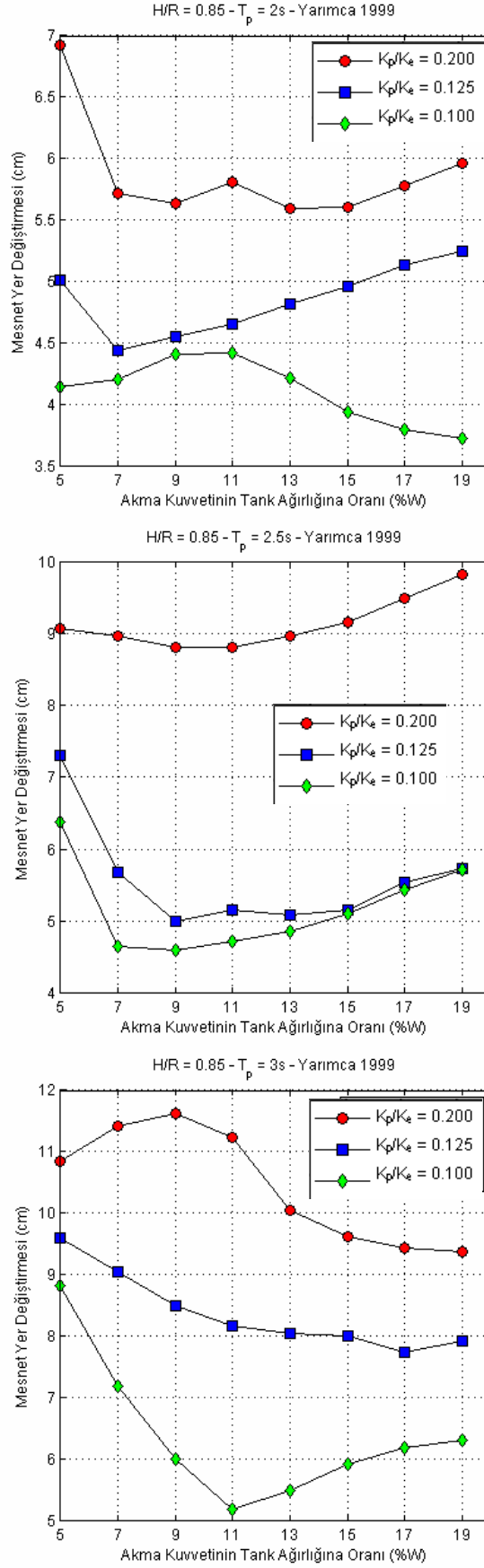
Şekil F.27 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($H/R = 3 - T_p = 3s - \text{Yarımca}$)



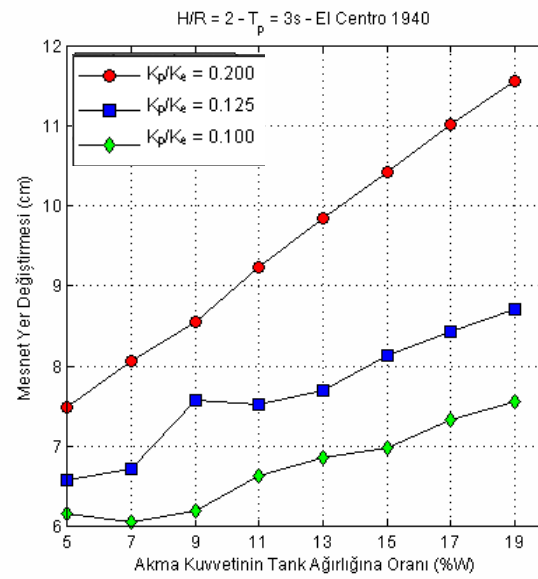
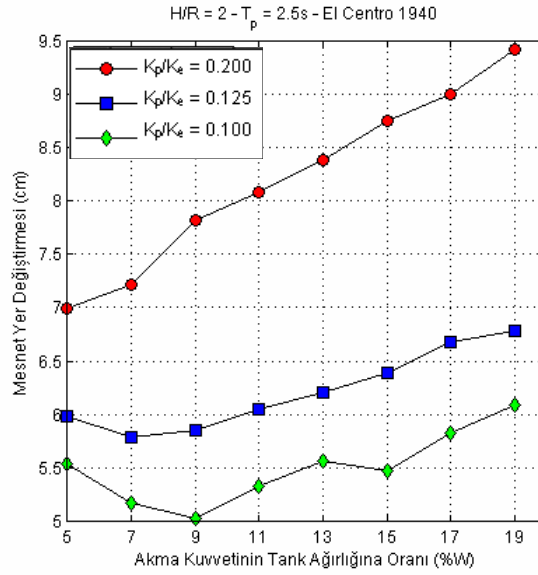
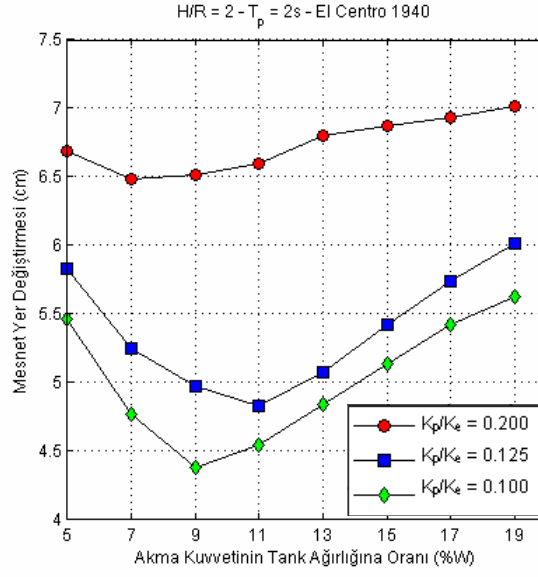
Şekil F.28 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi (H/R = 0.85 – El Centro)



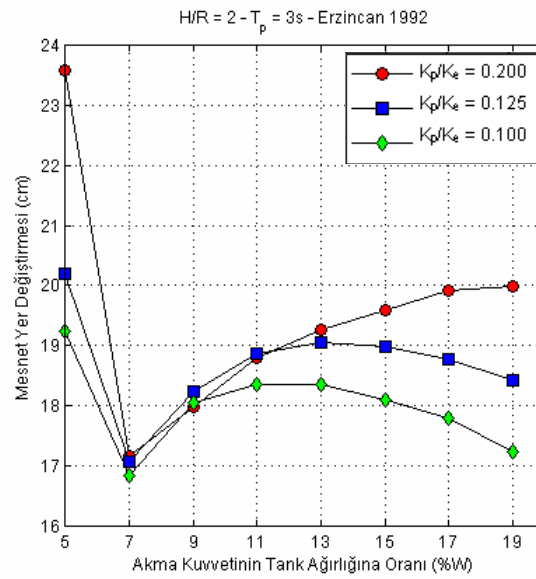
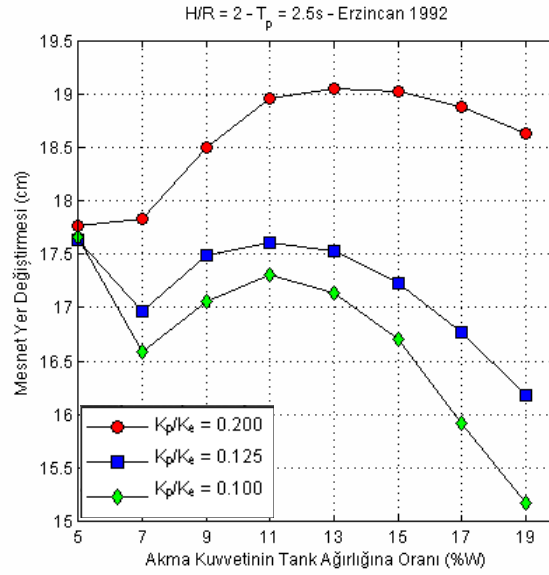
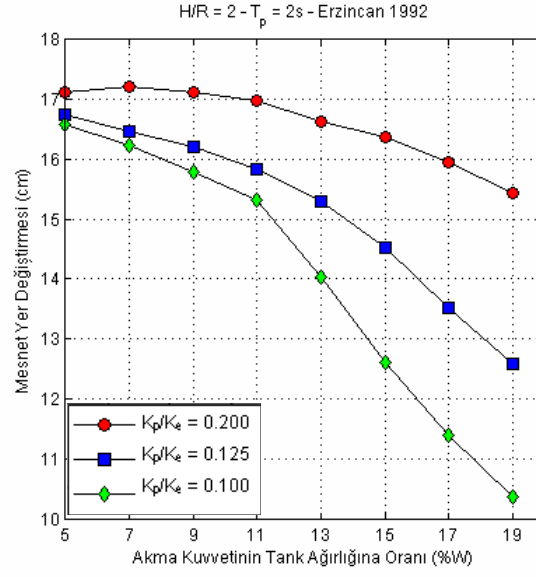
Şekil F.29 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değıştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85 - \text{Erzincan}$)



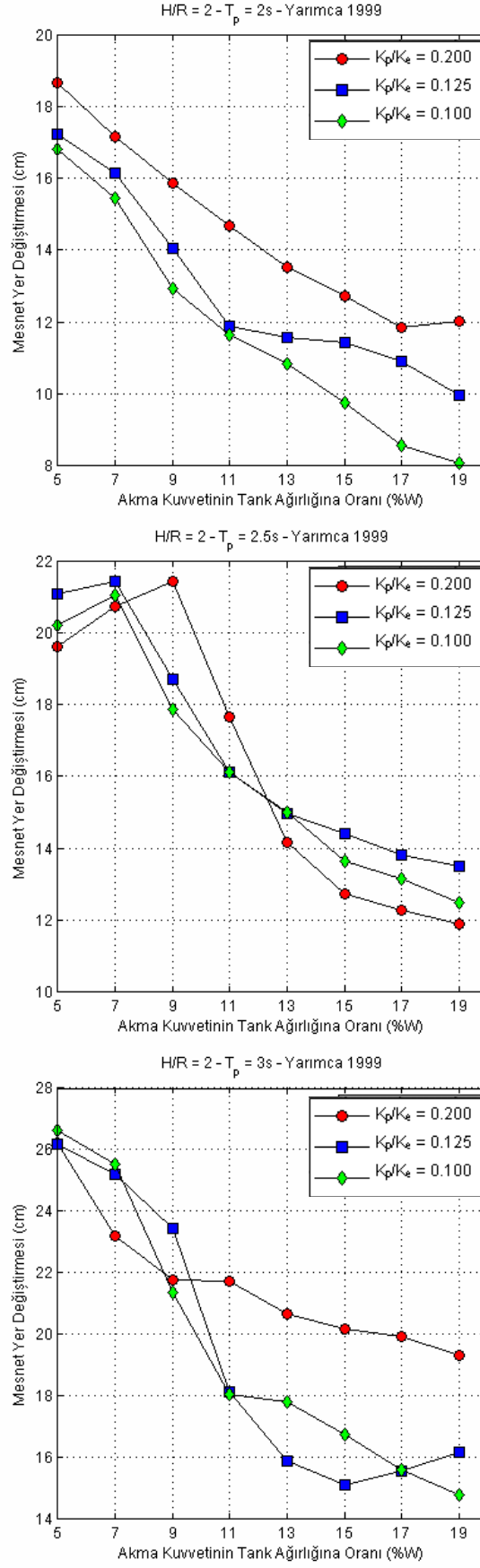
Şekil F.30 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 0.85$ – Yarımcı)



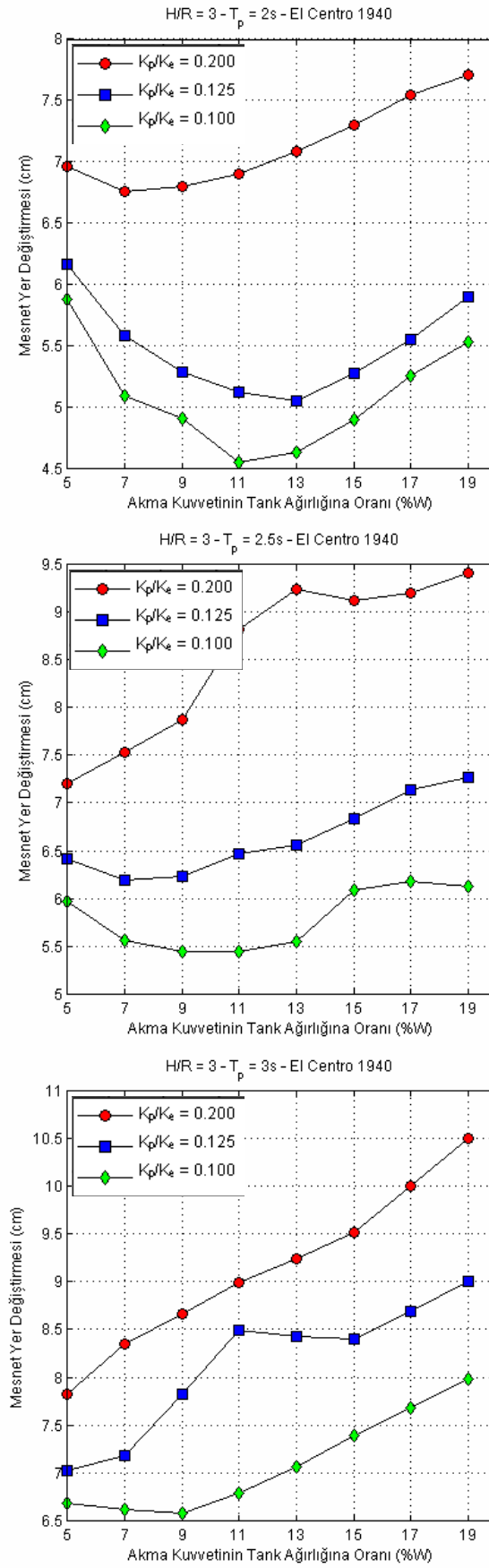
Şekil F.31 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – El Centro)



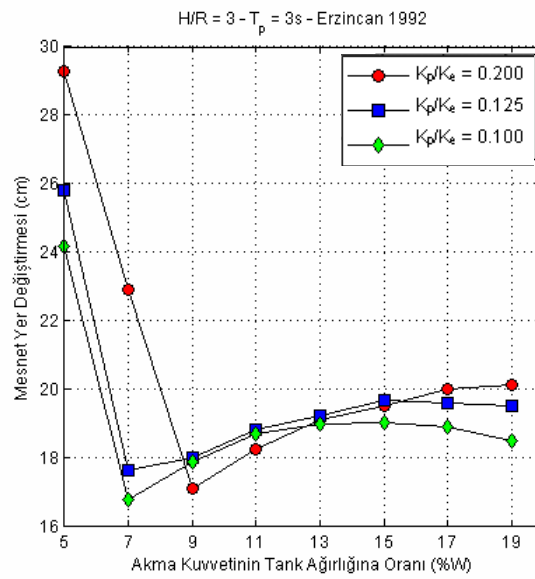
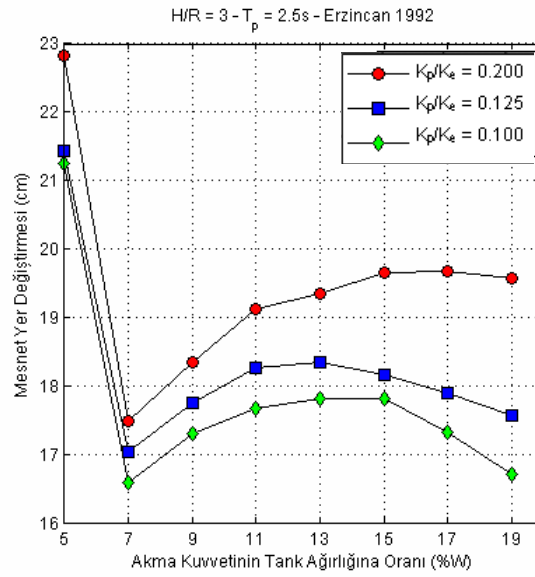
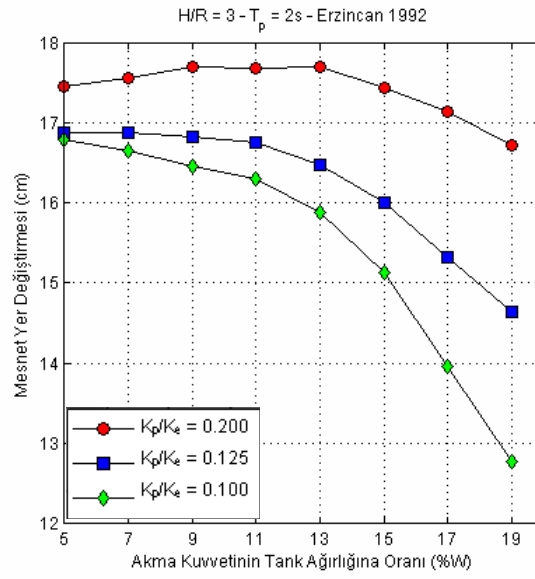
Şekil F.32 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Erzincan)



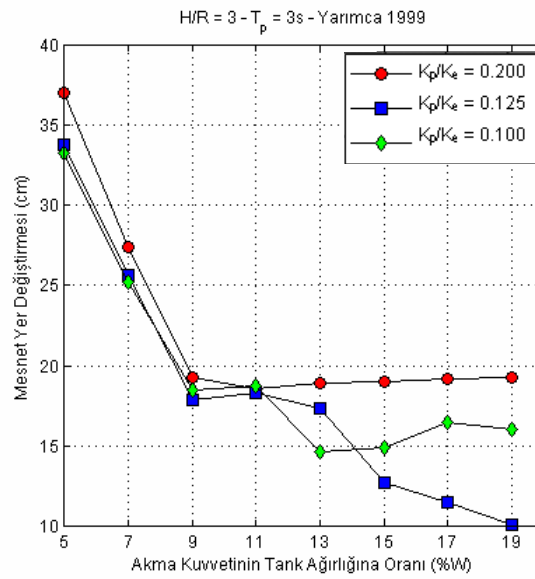
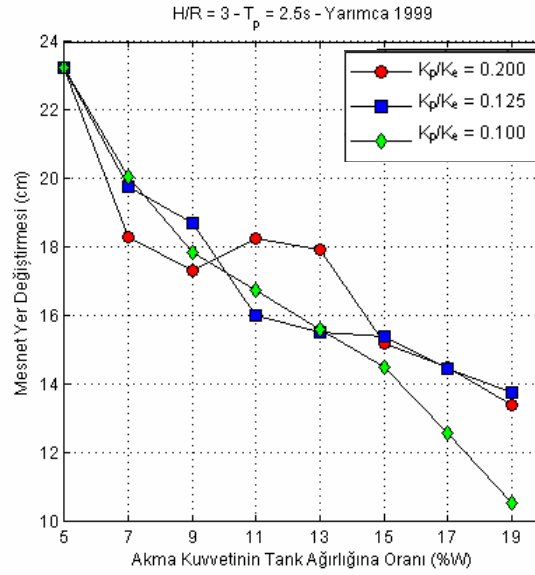
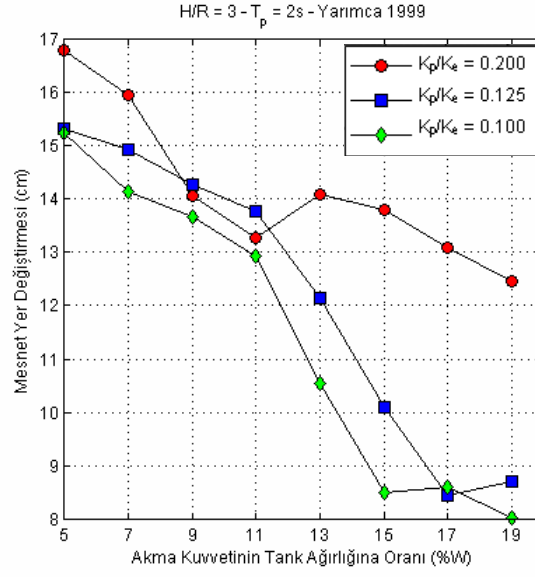
Şekil F.33 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 2$ – Yarımcı)



Şekil F.34 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – El Centro)



Şekil F.35 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Erzincan)



Şekil F.36 : Akma kuvvetinin ve akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranının mesnet yer değiştirmesi üzerindeki etkisi ($H/R = 3$ – Yarımcı)

ÖZGEÇMİŞ

İstanbul’da 1976 yılında doğan Gökhan YAZICI, ilköğrenimini Yenimahalle Güven İlkokulunda, orta öğrenimini bir müddet Hollanda AFCENT International School ve Ankara Atatürk Anadolu Lisesi’nde sürdürdükten sonra Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi’nde 1994 yılında tamamlamıştır. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazanmıştır. Bu bölümden 1998 yılında mezun olarak İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamış, mezun olduğu 2000 yılında aynı enstitüde Yapı Mühendisliği programında doktora eğitimine başlamıştır. 1999 yılının Eylül ayında katıldığı İstanbul Kültür Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evlidir ve bir çocuk babasıdır.