

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEPREMDE TABAKALI KUM ZEMİNDE OLUŞAN
SIVILAŞMA VE SIVILAŞMA SONRASI DAVRANIŞIN
MODEL DENEYLERLE ARAŞTIRILMASI**

İnşaat Yük. Müh. Pelin TOHUMCU ÖZENER

**FBE İnşaat Mühendiliği Anabilim Dalı Geoteknik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 16.04.2007
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM (YTÜ)
: Prof. Dr. Atilla ANSAL (BÜ)
: Doç. Dr. Ayfer ERKEN (İTÜ)
: Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (YTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xxxv
ÖNSÖZ	xxxvii
ÖZET	xxxviii
ABSTRACT	xxxix
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1 Giriş	7
2.2 Tabakalı ve Uniform Kumlarda Sıvılaşma	7
2.3 Sıvılaşma Sonrası Zemin Davranışı	27
3. SUYA DOYGUN KUMLU ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI VE SIVILAŞMA	37
3.1 Giriş	37
3.2 Dinamik Yüklemeler Altında Suyu Doygun Kum Zeminlerin Davranışı	37
3.3 Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri.....	41
3.4 Kumlarda Kritik Durum (Kararlı durum) ve Sıvılaşma.....	45
3.5 Kumlu Zeminlerin Sıkışabilirliği ve Sıvılaşmaya Bağlı Oturmalar	48
4. KUMLARIN SIVILAŞMA DAVRANIŞINI AÇIKLAYAN BÜNYE İLİŞKİLERİ VE DAHA ÖNCE YAPILAN NÜMERİK MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	56
4.1 Elastisite Teorisine Dayalı Modeller	60
4.2 Elasto-Plastik Teoriye Dayalı Modeller.....	60
4.3 Dinamik Yüklemeler Altında Kumların Davranışı ve Artımsal Elasto-Plastik Yaklaşım	65
4.4 Artımsal Elasto-Plastik Bünye Modelleri Tipleri.....	65
4.4.1 Kritik durum modelleri	66
4.4.2 Mohr-Coulomb Modelleri	67
4.4.3 Birden Fazla Göçme Yüzeyi Modeli	68

4.4.4	Diğer Modeller	69
4.4.4.1	Endokronik Teori.....	69
4.5	Kumların Sıvılaşma Davranışının Modellenmesinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Anahtar Faktörler.....	71
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR: TEK YÖNLÜ SARSMA TABLASI DENEYLERİ	72
5.1	Giriş	72
5.2	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Deney Sistemi ve Ekipmanlar	72
5.2.1	Boşluk suyu basıncı sensörleri ve ivme ölçerin özellikleri.....	74
5.2.2	Veri toplama sistemi	75
5.2.3	Görüntü işleme sistemi	76
5.2.4	Sarma tablası ve özellikleri	77
5.2.5	Kum yağmurlama düzeneği	79
5.2.6	Pleksiglas hücre ve model deneylerde sınır koşullarının etkisi.....	80
5.3	Model Deneyler ve Deney Programı	85
5.3.1	Kullanılan kum ve silt zeminlerin özellikleri.....	85
5.3.2	Kum kolonlarının hazırlanması	87
5.3.3	Birinci seri deneyler (Uniform kum kolonu deneyleri)	88
5.3.4	İkinci seri deneyler	90
5.3.5	Üçüncü seri deneyler	93
5.3.6	Dördüncü seri deneyler.....	95
5.3.7	Beşinci seri deneyler.....	97
5.4	Birinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	98
5.4.1	U1-A, U1-B ve U1C Model Deneyleri (%40 Rölatif Sıkılıkta Kum Kolonları) ..	98
5.4.2	U2-A, U2-B ve U2C Model Deneyleri (%50 Rölatif Sıkılıkta Kum Kolonları)	101
5.4.3	U3-A, U3-B ve U3C Model Deneyleri (%60 Rölatif Sıkılıkta Kum Kolonları)	102
5.4.4	U4-A, U4-B ve U4C Model Deneyleri (%72 Rölatif Sıkılıkta Kum Kolonları)	103
5.4.5	Birinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi	103
5.5	İkinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.....	108
5.5.1	L1-A, L1-B ve L1-C model deneyleri (Silt ara tabakalı %40 rölatif sıkılıkta kum kolonları).....	108
5.5.2	L2-A, L2-B ve L2-C model deneyleri (Silt ara tabakalı % 50 rölatif sıkılıkta kum kolonları).....	112
5.5.3	L3-A, L3-B ve L3-C model deneyleri (Silt ara tabakalı % 60 rölatif sıkılıkta kum kolonları).....	113
5.5.4	L4-A, L4-B ve L4-C model deneyleri(Silt ara tabakalı % 72 rölatif sıkılıkta kum kolonları).....	114
5.5.5	L5-A, L5-B ve L5-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%50 sıkılıkta tabakalı kum kolonları)	115
5.5.6	L6-A, L6-B ve L6-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%60 sıkılıkta tabakalı kum kolonları)	118
5.5.7	L7-A, L7-B ve L7-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%72 sıkılıkta tabakalı kum kolonları)	119
5.5.8	İkinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi.....	120
5.6	Üçüncü Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.....	124
5.6.1	L8-A, L8-B ve L8-C model deneyleri (%40/%50 rölatif sıkılıkta tabakalı kum kolonları).....	124
5.6.2	L9-A, L9-B ve L9-C model deneyleri (%40/%60 rölatif sıkılıkta tabakalı kum kolonları).....	127
5.6.3	L10-A, L10-B ve L10-C model deneyleri (%40/%72 rölatif sıkılıkta tabakalı kum kolonları).....	128

5.6.4	Üçüncü seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi.....	129
5.7	Dördüncü Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	131
5.7.1	L11-A, L11-B ve L11-C model deneyleri (%50/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları).....	131
5.7.2	L12-A, L12-B ve L12-C model deneyleri (%60/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları).....	134
5.7.3	L13-A, L13-B ve L13-C model deneyleri(%72/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları).....	135
5.7.4	Dördüncü seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi .	136
5.8	Beşinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	139
5.8.1	L14-A, L14-B ve L14-C model deneyleri (%50/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)	139
5.8.2	L15-A, L15-B ve L15-C model deneyleri (%60/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)	142
5.8.3	L16-A, L16-B ve L16-C model deneyleri (%72/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)	143
5.8.4	Beşinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi	144
5.9	Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	146
5.10	Silt Ara Tabakalı Kumların Dinamik Davranışı.....	147
5.11	Tabakalı Kumların Dinamik Davranışı.....	158
6.	UNİFORM VE TABAKALI KUMLARIN SIVILAŞMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE NÜMERİK ANALİZİ	167
6.1	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi.....	167
6.1.1	Towhata-Iai Bünye Modeli	167
6.1.1.1	Sıvılaşma yüzeyi.....	168
6.1.1.2	İzotropik bileşen	171
6.1.1.3	Deviatorik bileşen.....	173
6.1.1.4	Başlangıç yüklemesi	174
6.1.1.5	Boşaltma.....	175
6.2	Parametrik Çalışma.....	175
6.2.1	Zemin malzeme özellikleri.....	176
6.2.2	Zemin özelliklerinin belirlenmesi.....	177
6.2.3	Parametrik çalışma için gerçekleştirilen nümerik analizler	178
6.2.3.1	S_1 parametresinin etkisi	178
6.2.3.2	W_1 parametresinin etkisi	182
6.2.3.3	P_1 parametresinin etkisi	185
6.2.3.4	P_2 parametresinin etkisi	189
6.2.3.5	C_1 parametresinin etkisi	193
6.3	Parametrik Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	197
6.4	Arazide Suya Doygun Kum Tabakalarının Sıvılaşma Analizi.....	198
6.5	Wildlife Sıvılaşma Alanı Zemin Davranışı (Youd vd., 2005)	202
6.6	VELACS Projesi (Arulanandan ve Scott, 1993) Kapsamında Gerçekleştirilen Santrifüj Deneyi Modelinin Nümerik Analizi.....	207
7.	DENEYSEL SONUÇLARIN NÜMERİK ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	209
7.1	Giriş	209
7.2	Sonlu Elemanlar Modeli	209
7.3	Sonlu Elemanlar Analizi	210

7.3.1	Statik Analiz.....	211
7.3.2	Dinamik Davranış Analizi.....	211
7.4	Sıvılaşma Analizlerinin Sonuçları	211
7.4.1	Birinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması.	211
7.4.2	Birinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	216
7.4.3	İkinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması ..	219
7.4.4	İkinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	224
7.4.5	Üçüncü seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması	227
7.4.6	Üçüncü seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	231
7.4.7	Dördüncü seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması	233
7.4.8	Dördüncü seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	236
7.4.9	Beşinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması	238
7.4.10	Beşinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	241
7.5	Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	243
7.5.1	Silt Ara Tabakalı Kum Kolonu Deneylerinin Dinamik Davranış Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	243
7.5.2	Tabakalı Kum Kolonu Deneylerinin Dinamik Davranış Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	248
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	261
8.1	Giriş	261
8.2	Model Deney Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar	261
8.2.1	Üniform sıklıkta ve tabakalı kum kolonlarının davranışı	263
8.2.2	Kum kolonu içinde silt ara tabakası bulunmasının etkileri.....	266
8.3	Nümerik Analiz Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar	269
8.3.1	Kumun sıklık derecesinin ve sarsıntı şiddetinin etkisi	272
8.3.2	Kum kolonu içinde silt ara tabakası bulunmasının etkileri.....	274
8.3.3	Tabakalı kum kolonlarının dinamik davranışı	279
	KAYNAKLAR.....	289
	EKLER:.....	298
	Ek 1. Sarma Tablası Deney Sonuçları	299
	Ek 2. Artık boşluk suyu basıncı-zaman kontürleri	353
	Ek 3. Nümerik Analiz Sonuçları.....	380
	Ek 4. Maksimum Artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri	435
	ÖZGEÇMİŞ.....	443
	TEŞEKKÜR	444

SİMGE LİSTESİ

a_{maks}	Maksimum ivme genliği
C_{ijkl}	Elastik rijitlik tensörü
C_1	Sıvılaşma malzeme parametresi
D	Sönüm oranı
D_{10}	Efektif dane çapı
D_{50}	Ortalama dane çapı
D_r	Rölatif sıklık
$d\sigma_{ij}'$	Efektif gerilme değişimi
$d\epsilon_{kl}^P$	Plastik şekil değiştirme değişimi
$d\sigma$	Düşey gerilme değişimi
$d\epsilon$	Şekil değiştirme değişimi
$d\epsilon^e$	Elastik şekil değiştirme değişimi
$d\epsilon^P$	Plastik şekil değiştirme değişimi
$d\omega_s$	Kayma gerilmesi işi artımı
e	Boşluk oranı
e_{maks}	Maksimum boşluk oranı
e_{min}	Minimum boşluk oranı
E	Elastisite (Young) modülü
F_l	Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı
G_s	Özgül yoğunluk
G	Sekant kayma modülü
G_0	Başlangıç kayma modülü
G_{ref}	Referans efektif gerilme değerine karşılık gelen başlangıç kayma modülü
G_{maks}	Maksimum(Başlangıç) kayma modülü
g	Yerçekimi ivmesi
K	Pekleşme parametresi
K_{ref}	Referans efektif gerilme değerine karşılık gelen hacim kayma modülü
K_f	Suyun hacim modülü
m_v	Hacimsal sıkışma katsayısı
N	Yükleme çevrim sayısı
n	Porozite
P_1	Sıvılaşma malzeme parametresi
P_2	Sıvılaşma malzeme parametresi

p'	Ortalama efektif asal gerilme
P'_{ref}	Referans efektif gerilme değeri
q	Kayma gerilmesi
r	Deviatorik gerilme oranı
r_u	Artık boşluk suyu basıncı oranı
$(r_u)_{maks}$	Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı
S	Efektif ortalama normal gerilme oranı
S	Suya Doygunluk derecesi
S_1	Sıvılaşma malzeme parametresi
S_0	Kayma gerilmelerinin yaptığı iş tarafından tanımlanan fonksiyon
$\Delta\epsilon^{PS}$	Kayma veya Koni mekanizmasından oluşan plastik şekil değiştirme artım vektörü
$\Delta\epsilon^{PC}$	Başlık mekanizmasından oluşan plastik şekil değiştirme artım vektörü
$\Delta\epsilon^P$	Koni ve başlık mekanizmasından oluşan plastik şekil değiştirme artım vektörü
ϵ	Şekil değiştirme
ϵ_p	Hacimsal plastik şekil değiştirme
ϵ_1	Eksenel şekil değiştirme
ϵ_v	Hacimsal şekil değiştirme
γ'	Su altındaki birim hacim ağırlık
γ_w	Suyun birim hacim ağırlığı
γ_{maks}	Maksimum kayma şekil değiştirmesi
γ	Birim kayma şekil değiştirme genliği
γ_i	Kayma şekil değiştirmesi
ξ	Normalize kayma şekil değiştirmesi
η	Normalize kayma gerilmesi
σ'_m	Ortalama efektif normal gerilme
σ	Toplam gerilme
τ	Kayma gerilmesi
ϕ_f	İçsel sürtünme açısı
ϕ_p	Faz dönüşüm açısı
w	Normalize plastik kayma şekil değiştirmesi işi
W_1	Sıvılaşma malzeme parametresi
σ'_{vo}	Düşey jeolojik efektif gerilme
σ'_{ref}	Referans efektif gerilme

θ_i	Farklı kayma mekanizmasının göz önüne alındığı açı
Δu	Artık boşluk suyu basıncı
σ_1'	Efektif büyük asal gerilme
σ_3'	Efektif küçük asal gerilme
σ_{ij}'	Efektif gerilme tensörü
ν	Poisson oranı

KISALTMA LİSTESİ

AKO	Aşırı Konsolidasyon Oranı
CSR	Çevrimsel Kayma Gerilmesi Oranı
KDÇ	Kritik Durum Çizgisi
SPT-N	Standart Penetrasyon Darbe Sayısı
VELACS	Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybının sonuçlarına bir örnek (USGS).....	1
Şekil 1.2 Zemin danelerinin durumu (a) Statik koşullarda (b) Deprem yüklemesi durumunda	2
Şekil 1.3 Mino-Owari depremi sırasında ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı artışı (Ishihara, 1981).....	3
Şekil 2.1 Çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile SPT-N arasındaki ilişki (Seed vd., 1971)11	
Şekil 2.2 VELACS Projesi kapsamında gerçekleştirilen A sınıfı sentrifüj model deneyleri (Arulanandan ve Scott, 1993b)	13
Şekil 2.3 Model 4a ve Model 4b sentrifüj model deney düzenekleri ve sonlu elemanlar modeli (Popescu ve Prevost, 1993)	14
Şekil 2.4 Yüzeyde hesaplanan ve ölçülen ivme-zaman değişimlerinin karşılaştırılması (Popescu ve Prevost, 1993)	15
Şekil 2.5 Farklı derinliklerde ölçülen ve hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması (Popescu ve Prevost, 1993).....	16
Şekil 2.6. Deneysel modelin geometrisi ve enstrümantasyonu (Badia, 2003).....	17
Şekil 2.7 Santrifüj deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ile DIANA'dan elde edilen nümerik sonuçların karşılaştırılması (Badia, 2003) ..	18
Şekil 2.8 Santrifüj deneyinde ölçülen ivme-zaman değişimleri ile DIANA'dan elde edilen nümerik sonuçların karşılaştırılması (Badia, 2003)	18
Şekil 2.9 A model deneyi ve enstrümantasyonu (Fiegel ve Kutter, 1994)	19
Şekil 2.10 B, C ve D model deneyleri ve enstrümantasyonu (Fiegel ve Kutter, 1994).....	20
Şekil 2.11 A, B ve D deneylerinden elde edilen ivme-zaman değişimleri (Fiegel ve Kutter, 1994).....	21
Şekil 2.12 A model deneyinde farklı derinliklerde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri (Fiegel ve Kutter, 1994)	21
Şekil 2.13 Bir Boyutlu Sıvılaşma Deney Modeli (Kokusho, 1999)	22
Şekil 2.14 Artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi (Kokusho, 1999)	23
Şekil 2.15 Oturma ve su filmi kalınlığının zamanla değişimi a) Silt tabakalı b) Silt tabakasız (Kokusho, 1999)	23
Şekil 2.16 Model deneylerin görünümü (Brennan ve Madabhushi, 2005).....	25
Şekil 2.17 Silt ara tabakalı kum tabakasında 1 boyutlu analizlerden elde edilen artık bsb oranı değerlerinin derinlikle değişimi (a) $k_{kum}=10^{-4}$ m/s (b) $k_{kum}=10^{-6}$ m/s.....	27
Şekil 2.18 Darbe etkisi uygulanarak yapılan deney sırasında farklı zamanlarda alınan artık boşluk suyu basınçlarının değişimi (Florin ve Ivanov(1961)).....	29

Şekil 2.19 Titreşim sonucu oluşan sıvılaşma sırasında farklı zamanlarda ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı dağılımları(Florin ve Ivanov(1961))	29
Şekil 2.20 Uygulanan üç farklı düşey basınç altında kum kolonunda meydana gelen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi Yoshimi(1967).....	30
Şekil 2.21 Gevşek bir kum tabakasının sıvılaşmasının bu tabaka üzerinde yer alan sağlam bir zemin tabakası üzerindeki etkisi (Ambraseys ve Sarma, 1969)	31
Şekil 2.22 Geçirimliliği düşük olan kil tabakası altında meydana gelen su filmi (Elgamal vd.1989).....	33
Şekil 2.23 Geçirimliliği düşük olan kil tabakasında yüksek hidrolik eğimlerin oluşumu (Elgamal vd.1989).....	33
Şekil 2.24 Tabakalı zemin sistemlerindeki sıvılaşma ve sonrası davranışın belirlenmesi için kurulan deney düzeneği (Adalier, 1992)	34
Şekil 2.25 Farklı seviyelerdeki boşluk suyu basıncı sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi (Adalier, 1992)	35
Şekil 2.26 Sıvılaşma sonrası davranışın belirlenmesi için santrifüj deney düzeneği (Adalier, 1992).....	35
Şekil 2.27 Deneysel olarak ölçülmüş artık boşluk suyu basınçları sönümlenmesinin 1B konsolidasyon teorisi kullanarak hesaplanmış değerler ile karşılaştırılması (Adalier,1992).....	36
Şekil 3.1 Arazi koşullarında tekrarlı yükler altındaki zemin durumu(a) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumu (b) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumunu gösteren Mohr daireleri (Teymur, 2002).....	38
Şekil 3.2 Drenajsız kesme sırasında suya doymun kumların davranışı (a) Gevşek kumlar b)Sıkı kumlar	39
Şekil 3.3 Şekil değiştirme seviyesine bağlı zemin davranışı modellemesi (Ishihara, 1996)	41
Şekil 3.4 Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeritik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve maksimum dinamik kayma modülü ve sönüm oranı	42
Şekil 3.6 Monotonik ve tekrarlı gerilme izlerinin kararlı durum diyagramında gösterimi.....	46
Şekil 3.7 Farklı granüler zeminler (temiz kumlar) için elde edilmiş ($\log \sigma - \log \epsilon$) grafikleri (Hassib, 1951).....	49
Şekil 3.8 B, C ve G zeminleri için hacimsel sıkışma katsayısı m_v ile σ arasındaki ilişki(Hassib, 1951)	50
Şekil 3.9 Kumların bir boyutlu sıkışma davranışının şematik olarak gösterimi (Adalier, 1992)51	

Şekil 3.10 Sıvılaşma sonrası oluşan hacimsel şekil değiştirme ile maksimum kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişki (Ishiara, 1996).....	52
Şekil 3.11 Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ile maksimum kayma şekil değiştirme arasındaki ilişki (Ishiara, 1996)	54
Şekil 3.12 Sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme ile sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı arasındaki ilişki (Ishiara, 1996)	54
Şekil 4.1 Üç eksenli test koşulları için Drucker vd. (1955) tarafından önerilen akma yüzeyi.	62
Şekil 4.2 Cam-Clay modelinin genel özellikleri	66
Şekil 4.3 Başlık ve Koni sınır yüzeyleri	68
Şekil 4.4 Birden fazla akma yüzeyinin oluşturduğu bir ağ şeklindeki akma yüzeyleri(Mroz, 1967).....	68
Şekil 4.5 Analiz için seçilmiş zemin profili (Ansal, 1982).....	70
Şekil 4.6 Bir zemin tabakasında Endokronik sıvılaşma modeli sonuçları (Ansal, 1982).....	70
Şekil 5.1 Deney düzeneği.....	73
Şekil 5.2 Druck PDCR 81 Boşluk suyu basıncı sensörü (a) Sensörün görünümü(b) Sensörün detayı	74
Şekil 5.3 PCB 353B33 İvme ölçer.....	75
Şekil 5.4. Görüntü İşleme Programının İşleyiş Mekanizması.....	76
Şekil 5.5 Sarsma Tablasının Görünümü	77
Şekil 5.6 Uygulanan titreşimlerin 1 saniye sürede değişimleri (a) 0.23g (b) 0.30g (c)0.40g ..	78
Şekil 5.7. Kum Yağmurlama Sistemi	79
Şekil 5.8. Kumun Pleksiglas Silindir İçerisine Yağmurlanması	80
Şekil 5.9 Model deney tankı ve ivme ölçerler ve artık boşluk suyu basıncı ölçerlerin konumu (Coelho vd. 2003)	81
Şekil 5.10 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlarda ölçülmüş yatay ivme değişimleri (Coelho vd. 2003)	82
Şekil 5.11 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlardaki yatay ivmelerin FFT analizleri (Coelho vd. 2003)	83
Şekil 5.12 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlardaki artık boşluk suyu basıncı ölçümleri (Coelho vd. 2003).....	84
Şekil 5.13. Deneylerde kullanılan kum ve silt zeminin granülometri eğrileri	86
Şekil 5.14. Bir boyutlu konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen efektif gerilme-boşluk oranı değişimleri	86
Şekil 5.15. Sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite-boşluk oranı değişimleri	87

Şekil 5.16 Birinci seri model deneylerin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi	90
Şekil 5.17 İkinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L1, L2, L3, L4, L5, L6 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi.....	92
Şekil 5.18 İkinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L7 deneyinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi	93
Şekil 5.19a Üçüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L8 ve L9 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi.....	94
Şekil 5.19b Üçüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L10 deneyinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi	95
Şekil 5.20 Dördüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L11, L12 ve L13 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi.....	96
Şekil 5.21 Beşinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L14, L15 ve L16 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi.....	98
Şekil 5.22 U1-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	100
Şekil 5.23 U1-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	101
Şekil 5.24 Uniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) rölatif sıklıkla değişimi.....	104
Şekil 5.25 Uniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) sarsıntı şiddeti ile değişimi	105
Şekil 5.26. Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında hacimsel şekil değiştirmenin sarsıntı şiddeti ile değişimi	105
Şekil 5.27 Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonunda uygulanan farklı ivme genliklerinde maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının derinlikle değişimi	106
Şekil 5.28. %40 ve %50 Rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi.....	107
Şekil 5.29 %60 ve %72 Rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi.....	107
Şekil 5.30 L1-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma ve su filmi kalınlığı-zaman değişimi ..	109

Şekil 5.31 L1-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	111
Şekil 5.32 L5-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	116
Şekil 5.33 L5-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	117
Şekil 5.34a Silt ara tabakalı üniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının farklı sarsıntı şiddeti etkisinde derinlikle değişimi ($Dr=\%40$ ve $Dr=\%50$)	122
Şekil 5.34b. Silt ara tabakalı üniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi ($Dr=\%60$ ve $Dr=\%72$)	123
Şekil 5.35a. Silt ara tabakası içeren tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L5 ve L6 model deneyleri).....	123
Şekil 5.35b. Silt ara tabakası içeren tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L7 model deneyi) ...	124
Şekil 5.36 L8-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	126
Şekil 5.37 L8-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	127
Şekil 5.38a Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L8 ve L9 model deneyleri)	130
Şekil 5.38b Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L10 model deneyi)	131
Şekil 5.39 L11-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	132
Şekil 5.40 L11-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	134
Şekil 5.41a Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L11 ve L12 model deneyleri)	138
Şekil 5.41b Tabakalı kum kolonlarında artık boşluk suyu basıncı oranının farklı sarsıntı şiddeti etkisinde derinlikle değişimi (L13 model deneyi)	138
Şekil 5.42 L14-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı zaman değişimleri.....	140

Şekil 5.43 L14-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	141
Şekil 5.44a Silt ara tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi(L14 ve L15 model deneyleri)	145
Şekil 5.44b Silt ara tabakalı kum kolonunda maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	146
Şekil 5.45 Geçirimsizliği daha düşük silt tabakası altında oluşan su filmi	148
Şekil 5.46 Su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak zemin yüzeyine hareket etmesi	148
Şekil 5.47 Artık boşluk suyu basıncı oranları ile su filmi kalınlıkları arasındaki değişim....	149
Şekil 5.48 $D_r=40\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	151
Şekil 5.49 $D_r=50\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	152
Şekil 5.50 $D_r=60\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	153
Şekil 5.51 $D_r=72\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	154
Şekil 5.52 Farklı sıkılıkta ($D_r=50\%/D_r=40\%$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	155
Şekil 5.53 Farklı sıkılıkta ($D_r=60\%/D_r=40\%$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	156
Şekil 5.54 Farklı sıkılıkta ($D_r=72\%/D_r=40\%$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	157
Şekil 5.55 Tabakalı ($D_r=40\%/D_r=50\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	159
Şekil 5.56 Tabakalı ($D_r=40\%/D_r=60\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	160
Şekil 5.57 Tabakalı ($D_r=40\%/D_r=72\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	161
Şekil 5.58 Tabakalı ($D_r=50\%/D_r=40\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	162
Şekil 5.60 Tabakalı ($D_r=72\%/D_r=40\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	164
Şekil 5.61 Tabakalı ($D_r=72\%/D_r=40\%$) ve üniform sıkılıkta ($D_r=72\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	165

Şekil 6.1 Tekrarlı burulmalı kesme deneyinde kullanılan farklı yükleme şekilleri (Towhata ve Ishiara, 1985)	169
Şekil 6.2 Farklı yükleme şekillerinde dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen gerilme izleri (Towhata ve Ishiara, 1985)	169
Şekil 6.3 Gerilme-şekil değiştirme verilerinden kayma şekil değiştirmesi işinin trapezoid kuralı ile hesaplanması	170
Şekil 6.4 Farklı yükleme koşulları ve farklı deney sonuçları için artık boşluk suyu basıncı ile kümülatif kayma şekil değiştirmesi işi arasındaki ilişki (Towhata ve Ishiara, 1985).....	170
Şekil 6.5 Eşit kayma şekil değiştirmesi işi seviyelerinde gerilme izi kontürleri (Towhata ve Ishiara, 1985)	171
Şekil 6.6. Normalize gerilme uzayında Sıvılaşma yüzeyi, göçme çizgisi ve faz dönüşüm çizgisi (Iai vd., 1992).....	171
Şekil 6.7 Zemin iskelet eğrisi	174
Şekil 6.8. U1-A model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	179
Şekil 6.9. U1-B model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	180
Şekil 6.10 U1-C model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	181
Şekil 6.11. U1-A model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	183
Şekil 6.12. U1-B model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	184
Şekil 6.13. U1-C model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	185
Şekil 6.14 U1-A model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	186
Şekil 6.15. U1-B model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	187
Şekil 6.16. U1-C model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	188
Şekil 6.17 model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi	190
Şekil 6.18. U1-B model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı	

oluşumu üzerindeki etkisi.....	191
Şekil 6.19. model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi.....	192
Şekil 6.20. U1-A model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi.....	194
Şekil 6.21. U1-B model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi.....	195
Şekil 6.22. U1-C model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi.....	196
Şekil 6.23 W_1 parametresi ve P_1 parametresinin sıklık derecesi ile değişimi.....	197
Şekil 6.24 20m kalınlığında uniform bir kum tabakası için sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları.....	198
Şekil 6.25 0.11g ve 0.215g maksimum ivme genliğinde deprem hareketi etkisinde %30, %40 ve %80 rölatif sıklıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	201
Şekil 6.26 0.32g ve 0.42g maksimum ivme genliğinde deprem hareketi etkisinde %30, %40 ve %80 rölatif sıklıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	201
Şekil 6.27 Wildlife Sıvılaşma Araştırma Alanı a) arazi planı b) piezometre derinlikleri (Youd vd.2005).....	203
Şekil 6.28 Superstition Hills depremi ivme kaydı (Youd, 2005)	203
Şekil 6.29 Wildlife araştırma alanı'nda P_1 , P_2 , P_3 ve P_5 piezometrelerinde ölçülen ve nümerik analizden hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının karşılaştırılması.....	206
Şekil 6.31 P_1 , P_2 , P_3 ve P_4 sensörlerinde ölçülen ve nümerik analizden hesap edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması.....	208
Şekil 7.1 Model deneyler için oluşturulan sonlu elemanlar ağı (a) Uniform ve iki tabakalı kum kolonları için (b) silt ara tabakalı kum kolonları için.....	210
Şekil 7.2 U1-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	215
Şekil 7.3 $Dr=40\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması.....	215
Şekil 7.4 Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında farklı ivme genliklerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu	

basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	217
Şekil 7.5 %40 ve %50 rölatif sıklıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	218
Şekil 7.6 %60 ve %72 rölatif sıklıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	218
Şekil 7.7 %40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı üniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	223
Şekil 7.8 %40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı üniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	224
Şekil 7.9a %40 ve %50 rölatif sıklıklarda silt ara tabakalı üniform kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	225
Şekil 7.9b. %60 ve %72 rölatif sıklıklarda silt ara tabakalı üniform kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	225
Şekil 7.10a. L5 ve L6 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	226
Şekil 7.10b. Uniform sıklıkta ($Dr=72\%$) kum modellerinin nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi	226
Şekil 7.11 Tabakalı kum ($Dr=40\%-50\%$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	230
Şekil 7.12 Tabakalı kum model deneylerinin ($Dr=40\%-50\%$) nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	230
Şekil 7.13a. L8 ve L9 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	232
Şekil 7.13b. L10 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	232
Şekil 7.14 Tabakalı kum ($Dr=50\%-40\%$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan	

ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	235
Şekil 7.15 Tabakalı kum ($Dr=50-40$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	236
Şekil 7.16a. L11 ve L12 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	237
Şekil 7.16b. L13 model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	237
Şekil 7.17 L14-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	240
Şekil 7.18 Silt ara tabakalı kum ($Dr=50-40$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	241
Şekil 7.19a. L14 ($Dr=50-40$) ve L15 ($Dr=60-40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	242
Şekil 7.19b L16 ($Dr=72-40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	242
Şekil 7.20 $Dr=40$ rölatif sıklıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	244
Şekil 7.21 $Dr=50$ rölatif sıklıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	244
Şekil 7.22 $Dr=60$ rölatif sıklıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	245
Şekil 7.23 $Dr=72$ rölatif sıklıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	245
Şekil 7.24 $Dr=50/Dr=40$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	246
Şekil 7.25 $Dr=60/Dr=40$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan	

maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	246
Şekil 7.26 $Dr=72/Dr=40$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	247
Şekil 7.27 Tabakalı ($Dr=40/Dr=50$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	249
Şekil 7.28 Tabakalı ($Dr=40/Dr=60$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	250
Şekil 7.29 Tabakalı ($Dr=40/Dr=72$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	251
Şekil 7.30 Tabakalı ($Dr=50/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	252
Şekil 7.31 Tabakalı ($Dr=60/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	253
Şekil 7.32 Tabakalı ($Dr=72/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	254
Şekil 7.33 Tabakalı ($Dr=50/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=50$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	256
Şekil 7.34 Tabakalı ($Dr=60/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=60$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	257
Şekil 7.35 Tabakalı ($Dr=72/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=72$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	258
Şekil 8.1. Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış üniform kum kolonlarında hacimsal şekil değiştirmenin sarsıntı şiddeti ile değişimi	262
Şekil 8.2 Üniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) rölatif sıklıkla değişimi.....	262
Şekil 8.3 Üniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı	

oranının (r_u) sarsıntı şiddeti ile değişimi	263
Şekil 8.4 Tabakalı ($Dr=\%50/Dr=\%40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	264
Şekil 8.5 Tabakalı ($Dr=\%60/Dr=\%40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	264
Şekil 8.6 Tabakalı ($Dr=\%72/Dr=\%40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	265
Şekil 8.7 Tabakalı ($Dr=\%72/Dr=\%40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=\%72$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	266
Şekil 8.8 $Dr=\%40$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	267
Şekil 8.9 $Dr=\%50$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	267
Şekil 8.10 $Dr=\%60$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	268
Şekil 8.11 $Dr=\%72$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	268
Şekil 8.12 $\%40$ rölatif sıklıkta kum kolonu model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	271
Şekil 8.13 $Dr=\%40$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	271
Şekil 8.14 Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış üniform kum kolonları üzerinde uygulanan farklı ivme genliklerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi	273
Şekil 8.15a $\%40$ ve $\%50$ rölatif sıklıklarda üniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	274
Şekil 8.15b $\%60$ ve $\%72$ rölatif sıklıklarda üniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	274
Şekil 8.16a $\%40$ ve $\%50$ rölatif sıklıklarda silt ara tabakalı kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	275

Şekil 8.16b. %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda silt ara tabakalı kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi	275
Şekil 8.17 $Dr=40\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	276
Şekil 8.18 $Dr=72\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	276
Şekil 8.19 $Dr=50\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	277
Şekil 8.20 $Dr=60\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	277
Şekil 8.21 $Dr=72\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi	278
Şekil 8.22a ($Dr=50\%-40\%$) ve ($Dr=60\%-40\%$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	279
Şekil 8.22b ($Dr=72\%-40\%$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	279
Şekil 8.23a. Tabakalı kum kolonu ($Dr=40\%/50\%$ ve $Dr=40\%/60\%$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	280
Şekil 8.23b. Tabakalı kum kolonu ($Dr=40\%/72\%$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	280
Şekil 8.24 Tabakalı ($Dr=40\%/Dr=60\%$) ve üniform kum ($Dr=40\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	281
Şekil 8.25a. Tabakalı kum kolonu ($Dr=50\%/40\%$ ve $Dr=60\%/40\%$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi.....	282
Şekil 8.25b. Tabakalı kum kolonu ($Dr=72\%/40\%$) model deneyleri için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve	

derinlikle değişimi.....	282
Şekil 8.26 Tabakalı ($D_r=72/D_r=40$) ve üniform kum ($D_r=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	283
Şekil 8.27 Tabakalı ($D_r=72/D_r=40$) ve üniform kum ($D_r=72$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi.....	284
Şekil Ek 1.1 U1-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	299
Şekil Ek 1.2 U1-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	300
Şekil Ek 1.3 U2-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	301
Şekil Ek 1.4 U2-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	302
Şekil Ek 1.5 U2-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	303
Şekil Ek 1.6 U3-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	304
Şekil Ek 1.7 U3-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	305
Şekil Ek 1.8 U3-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	306
Şekil Ek 1.9 U4-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	307
Şekil Ek 1.10 U4-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	308
Şekil Ek 1.11 U4-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi	309
Şekil Ek 1.12 L1-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	310
Şekil Ek 1.13 L1-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma ve su filmi kalınlığı-zaman değişimi	311

Şekil Ek 1.14 L2-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	312
Şekil Ek 1.15 L2-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	313
Şekil Ek 1.16. L2-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	314
Şekil Ek 1.17. L3-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	315
Şekil Ek 1.18 L3-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	316
Şekil Ek 1.19 L3-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	317
Şekil Ek 1.20 L4-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve alt tabaka oturma-zaman değişimleri	318
Şekil Ek 1.21 L4-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	319
Şekil Ek 1.22 L4-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri	320
Şekil Ek 1.23 L5-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, Alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	321
Şekil Ek 1.24 L5-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	322
Şekil Ek 1.25 L6-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	323
Şekil Ek 1.26 L6-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman	

ve sufilmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	324
Şekil Ek 1.27 L6-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	325
Şekil Ek 1.28 L7-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve alt tabaka oturma- zaman değişimleri	326
Şekil Ek 1.29 L7-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	327
Şekil Ek 1.30 L7-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman ve su filmi kalınlığı- zaman değişimleri	328
Şekil Ek 1.31 L8-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	329
Şekil Ek 1.32 L8-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	330
Şekil Ek 1.33 L9-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	331
Şekil Ek 1.34 L9-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	332
Şekil Ek 1.35 L9-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	333
Şekil Ek 1.36 L10-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	334
Şekil Ek 1.37 L10-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	335
Şekil Ek 1.38 L10-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	336
Şekil Ek 1.39 L11-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	337
Şekil Ek 1.40 L11-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	338
Şekil Ek 1.41 L12-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	339
Şekil Ek 1.42 L12-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu	

basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	340
Şekil Ek 1.43 L12-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	341
Şekil Ek 1.44 L13-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	342
Şekil Ek 1.45 L13-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	343
Şekil Ek 1.46 L13-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	344
Şekil Ek 1.47 L14-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı zaman değişimleri	345
Şekil Ek 1.48 L14-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi	346
Şekil Ek 1.49 L15-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	347
Şekil Ek 1.50 L15-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	348
Şekil Ek 1.51 L15-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	349
Şekil Ek 1.52 L16-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	350
Şekil Ek 1.53 L16-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri.....	351
Şekil Ek 1.54 L16-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve su filmi kalınlığı- zaman değişimleri	352
Şekil Ek 2.1 U1-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında	353
Şekil Ek 2.2 U1-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik	

yükleme sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	353
Şekil Ek 2.3 U2-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	354
Şekil Ek 2.4 U2-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	354
Şekil Ek 2.5 U2-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	355
Şekil Ek 2.6 U3-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	355
Şekil Ek 2.7 U3-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	356
Şekil Ek 2.8 U3-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	356
Şekil Ek 2.9 U4-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	357
Şekil Ek 2.10 U4-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	357
Şekil Ek 2.11 U4-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	358
Şekil Ek 2.12 L1-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	358
Şekil Ek 2.13 L1-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	359
Şekil Ek 2.14 L2-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	359
Şekil Ek 2.15 L2-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	360
Şekil Ek 2.16 L2-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	360
Şekil Ek 2.17 L3-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	361
Şekil Ek 2.18 L3-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	361
Şekil Ek 2.19 L3-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	362

Şekil Ek 2.20 L4-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	362
Şekil Ek 2.21 L4-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	363
Şekil Ek 2.22 L4-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	363
Şekil Ek 2.23 L5-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	364
Şekil Ek 2.24 L5-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	364
Şekil Ek 2.25 L6-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	365
Şekil Ek 2.26 L6-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	365
Şekil Ek 2.27 L6-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	366
Şekil Ek 2.28 L7-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	366
Şekil Ek 2.29 L7-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	367
Şekil Ek 2.30 L7-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	367
Şekil Ek 2.31 L8-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	368
Şekil Ek 2.32 L8-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	368
Şekil Ek 2.33 L9-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	369
Şekil Ek 2.34 L9-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	369
Şekil Ek 2.35 L9-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	370
Şekil Ek 2.36 L10-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	370
Şekil Ek 2.37 L10-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik	

yükleme sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	371
Şekil Ek 2.38 L10-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	371
Şekil Ek 2.39 L11-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	372
Şekil Ek 2.40 L11-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	372
Şekil Ek 2.41 L12-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	373
Şekil Ek 2.42 L12-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	373
Şekil Ek 2.43 L12-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	374
Şekil Ek 2.44 L13-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	374
Şekil Ek 2.45 L13-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	375
Şekil Ek 2.46 L13-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	375
Şekil Ek 2.47 L14-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	376
Şekil Ek 2.48 L14-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	376
Şekil Ek 2.49 L15-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	377
Şekil Ek 2.50 L15-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	377
Şekil Ek 2.51 L15-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	378
Şekil Ek 2.52 L16-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	378
Şekil Ek 2.53 L16-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	379
Şekil Ek 2.54 L16-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yüklemeye sırasında (b) Dinamik yüklemeye sonrasında	379

Şekil Ek 3.1 U1-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	380
Şekil Ek 3.2 U1-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	381
Şekil Ek 3.3 U2-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	382
Şekil Ek 3.4 U2-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	383
Şekil Ek 3.5 U2-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	384
Şekil Ek 3.6 U3-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	385
Şekil Ek 3.7 U3-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	386
Şekil Ek 3.8 U3-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	387
Şekil Ek 3.9 U4-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	388
Şekil Ek 3.10 U4-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	389
Şekil Ek 3.11 U4-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	390
Şekil Ek 3.12 L1-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	391
Şekil Ek 3.13 L1-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	392
Şekil Ek 3.14 L2-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	393
Şekil Ek 3.15 L2-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	394
Şekil Ek 3.16 L2-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	395
Şekil Ek 3.17 L3-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	396
Şekil Ek 3.18 L3-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden	

elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	397
Şekil Ek 3.19 L3-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	398
Şekil Ek 3.20 L4-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	399
Şekil Ek 3.21 L4-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	400
Şekil Ek 3.22 L4-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	401
Şekil Ek 3.23 L5-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	402
Şekil Ek 3.24 L5-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	403
Şekil Ek 3.25 L5-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	404
Şekil Ek 3.26 L6-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	405
Şekil Ek 3.27 L6-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	406
Şekil Ek 3.28 L6-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	407
Şekil Ek 3.29 L7-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	408
Şekil Ek 3.30 L7-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	409
Şekil Ek 3.31 L7-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	410
Şekil Ek 3.32 L8-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	411
Şekil Ek 3.33 L8-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	412
Şekil Ek 3.34 L9-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	413
Şekil Ek 3.35 L9-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması	414

Şekil Ek 3.36 L9-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması.....	415
Şekil Ek 3.37 L10-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	416
Şekil Ek 3.38 L10-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	417
Şekil Ek 3.39 L10-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	418
Şekil Ek 3.40 L11-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	419
Şekil Ek 3.41 L11-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	420
Şekil Ek 3.42 L12-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	421
Şekil Ek 3.43 L12-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	422
Şekil Ek 3.44 L12-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	423
Şekil Ek 3.45 L13-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	424
Şekil Ek 3.46 L13-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	425
Şekil Ek 3.47 L13-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	426
Şekil Ek 3.48 L14-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	427
Şekil Ek 3.49 L14-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	428
Şekil Ek 3.50 L15-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	429
Şekil Ek 3.51 L15-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	430
Şekil Ek 3.52 L15-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	431
Şekil Ek 3.53 L16-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney	

ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	432
Şekil Ek 3.54 L16-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	433
Şekil Ek 3.55 L16-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması..	434
Şekil Ek 4.1 $D_r=50\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	435
Şekil Ek 4.2 $D_r=60\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	435
Şekil Ek 4.3 $D_r=72\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	436
Şekil Ek 4.4 $D_r=50\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	436
Şekil Ek 4.5 $D_r=60\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	437
Şekil Ek 4.6 $D_r=72\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	437
Şekil Ek 4.7 $D_r=40\%/50\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	438
Şekil Ek 4.8 $D_r=40\%/60\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	438
Şekil Ek 4.9 $D_r=40\%/72\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	439
Şekil Ek 4.10 $D_r=40\%/60\%$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	439

Şekil Ek 4.11 $D_r = 40/72$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	440
Şekil Ek 4.12 $D_r = 60/40$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	440
Şekil Ek 4.13 $D_r = 72/40$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	441
Şekil Ek 4.14 $D_r = 60/40$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	441
Şekil Ek 4.15 $D_r = 72/40$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması	442

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Hassib (1951) tarafından çalışılan zeminlerin özellikleri	49
Çizelge 5.1 DRUCK PDRCR 81 Boşluk suyu basıncı sensörüne ait teknik özellikler	75
Çizelge 5.2 PCB 353B33 ivme ölçere ait teknik özellikler	75
Çizelge 5.3 Uygulanan Titreşimlerin Özellikleri	78
Çizelge 5.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri	86
Çizelge 5.5 Birinci seri deneylerin özeti	89
Çizelge 5.6 İkinci seri deneylerin özeti.....	91
Çizelge 5.7 Üçüncü seri deneylerin özeti.....	94
Çizelge 5.8 Dördüncü seri deneylerin özeti	95
Çizelge 5.9 Beşinci seri deneylerin özeti	97
Çizelge 5.10 Birinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar ..	104
Çizelge 5.11 İkinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar....	121
Çizelge 5.12 Üçüncü seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar.	129
Çizelge 5.13 Dördüncü seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar	137
Çizelge 5.14 Beşinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar .	144
Çizelge 5.15 Silt ara tabakalı ve silt ara tabakası içermeyen kum kolonlarında artık boşluk suyu basınçlarının sönmelenme sürelerinin karşılaştırılması.....	150
Çizelge 6.1 %30 rölatif sıkılıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	199
Çizelge 6.2 %50 rölatif sıkılıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	199
Çizelge 6.3 %80 rölatif sıkılıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	200
Çizelge 6.4 Wildlife test alanı zemin tabakaları için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri	204
Çizelge 6.5 VELACS model deneyi için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri.....	208
Çizelge 7.1 U1 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	212
Çizelge 7.2 U2 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	213
Çizelge 7.3 U3 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	213
Çizelge 7.4 U4 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli	

malzeme parametreleri	214
Çizelge 7.5 L1 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	219
Çizelge 7.6 L2 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	220
Çizelge 7.7 L3 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	220
Çizelge 7.8 L4 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	221
Çizelge 7.9 L5 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	221
Çizelge 7.10 L6 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	222
Çizelge 7.11 L7 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	222
Çizelge 7.12 L8 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	228
Çizelge 7.13 L9 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	228
Çizelge 7.14 L10 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	229
Çizelge 7.15 L11 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	233
Çizelge 7.16 L12 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	234
Çizelge 7.17 L13 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	234
Çizelge 7.18 L14 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	238
Çizelge 7.19 L15 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	239
Çizelge 7.20 L16 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri	239

ÖNSÖZ

Deprem sarsıntılarının meydana getirdiği sıvılaşma geoteknik mühendisliği'nde son 50 yıldır üzerinde oldukça yoğun bir şekilde araştırmaların yürütüldüğü bir konu olma özelliğini taşımaktadır. Tüm bu çalışmaların amacı olayın oluşum mekanizmasının aydınlatılması ve sıvılaşmanın neden olduğu zararlı etkilerin azaltılmasıdır. Bu tez çalışmasında, dinamik yüklemeler altında suya doygun kum zeminlerde gözlenen sıvılaşma olayının oluşumunun ve tabakalı ortamlarda zemin özelliklerine bağlı olarak gelişiminin deneysel ve nümerik araştırmalar ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla laboratuvarda bir sarsma tablası deney düzeneği kurularak farklı sıklıklarda uniform kum kolonları, silt ara tabakalı kum kolonları ve iki tabakalı kum kolonları üzerinde model deneyler gerçekleştirilmiştir. Uniform ve tabakalı kum kolonlarının dinamik davranışını nümerik olarak modellemek için DIANA sonlu elemanlar programı'nda Towhata-Iai sıvılaşma bünye modeli kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiş, artık boşluk suyu basınçları hesaplanarak, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Doktora tez çalışmam boyunca desteği, ilgisi ve sabrı ile benden yardımlarını esirgemeyen, her zaman yol gösteren ve moral veren, kıymetli zamanını ayıran, her yönü ile kendisini örnek aldığım çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Kutay ÖZAYDIN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunmayı bir borç bilirim. Yine doktora tez çalışmam süresince değerli ilgilerini benden esirgemeyen ve her zaman moral aşılayan değerli hocalarım Prof. Dr. Sönmez YILDIRIM'a ve Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a, değerli zamanını, ilgisini ve bilgisini hiçbir zaman eksik etmeyen, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Atilla ANSAL'a, katkıları ve yardımları ile bana her zaman destek olan dolayı değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN'e, deneysel çalışmamın çok önemli bir kısmı için gerekli olan silt zemini sağlayarak bana destek veren değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ayfer ERKEN'e, sürekli desteklerini gördüğüm sevgili hocalarım Yrd. Doç. Dr. Havvanur KILIÇ'a, Yrd. Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGİN'e ve Yrd. Doç. Dr. Şükrü ÖZÇOBAN'a, çalışmalarım süresince göstermiş olduğu yakın ilgiyi ve desteği, sağlamış olduğu büyük moral katkılarını hiçbir zaman unutmayacağım değerli hocam Araş. Gör. Dr. Murat TONAROĞLU'na, deneysel çalışmalarım süresince karşılaştığım aksaklıkları ve sorunları gidermemde yardımına başvurduğum, bana her zaman moral veren değerli hocam Sayın Öğr. Gör. Dr. Ersun YALÇIN'a, sarsma tablasının tasarımını gerçekleştiren Sayın Yrd. Doç. Dr. Tamer KEPÇELER'e, çalışmalarım sırasında gerekli olan tezlere ulaşmamda yardımcı olan, ilgisini ve desteğini her zaman hissettiğim Sayın Doç. Dr. Özgen Ümit ÇOLAK'a, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımını hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman moral aşılayan değerli laboratuvar arkadaşım Araş. Gör. Niyazi Uğur TERZİ'ye, yardımları ve ilgileri ile her zaman yanımda olan değerli çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Murat Ergenekon SELÇUK'a, Araş. Gör. Tayfun ŞENGÜL'e, Araş. Gör. Çiğdem ÖZÇELİK'e ve İnş. Yük. Müh. Şenol ADATEPE'ye, yardımlarından dolayı Sayın Erhan EROL'a ve Ali YÜKSEL'e, nümerik ve deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım sorunları çözmemde yardımcı olan ve daima moral veren sevgili arkadaşlarım İnş. Yük. Müh. Müge İNANIR'a ve İnş. Yük. Müh. Orhan İNANIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bütün bu zorlukları aşarken hep yanımda olan, bana destek ve güç veren, haklarını asla ödeyemeceğim sevgili anneme ve sevgili babama, sabrı, sevgisi ve fedakarlığı ile her zaman yanımda olan sevgili eşime, en büyük moral kaynağım ve destekçilerim sevgili kardeşlerime, uzak mesafelerden bile olsa desteklerini ve sevgilerini her zaman hissettiren, daima moral veren KKTC'deki aileme, en derin ve en içten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

ÖZET

Depremlerin yol açtığı yapısal hasarların önemli nedenleri arasında yer alan sıvılaşma oluşumu ve yanal akımlar geoteknik mühendisliği'nin başlıca araştırma konular arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada, uniform ve tabakalı kumlarda sıvılaşma mekanizmasını araştırmak için laboratuvar ortamında geliştirilmiş bir deney düzeneğinde beş seri sarsma tablası model deneyi yapılmıştır. Deneyler farklı sarsıntı şiddetleri kullanılarak, farklı sıklıklarda uniform kum kolonları, silt ara tabakalı kum kolonları ve iki tabakalı kum kolonları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde dinamik yükleme sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçları, üç farklı derinliğe yerleştirilmiş boşluk suyu basıncı sensörleri ile, meydana gelen yüzeysel oturma ve su filmi kalınlığı ise dijital bir kamera tarafından alınan görüntülerden ölçülmüştür.

Gerçekleştirilen model deneyleri gözlemleri, uygulanan sarsıntı şiddeti ve kumun rölatif sıklığının oluşan artık boşluk suyu basınçları ve hacimsel şekil değiştirmeler üzerinde oldukça büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Silt ara tabakalı kum kolonu deneylerinde titreşimli yüklemeler etkisinde sonucunda ise kum kolonu içerisinde yer alan geçirimsizliği daha az ince silt ara tabakası altında bir su filmi oluştuğu gözlenmiş ve silt tabakası altında yer alan kum tabakasının sıklık derecesinin, sarsıntı şiddetinin ve artık boşluk suyu basıncı oranının su filmi oluşumunda etkili olduğu görülmüştür. Deneysel gözlemlerden arazide geçirimsizliği düşük tabakalar altında gevşek kum tabakaları yer alması durumunda, su filmi oluşumunun zararlı etkilerinin oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerindeki artırıcı etkisinden daha fazla olacağı ve silt tabakası altında oluşan su filminin uzun süre sönmülmeyen kalmasının özellikle şevlerde çok ciddi problemlerin çıkmasına sebep olabileceği sonucuna varılmıştır.

Uniform ve tabakalı kum kolonlarının dinamik davranışını modellemek için DIANA sonlu elemanlar programı'nda Towhata-Iai sıvılaşma bünye modeli kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizler sonucunda, artık boşluk suyu basınçları hesaplanarak, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve model deneylerde ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile nümerik analizden hesaplanan sonuçların genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen analizlerde artık boşluk suyu basınçlarının sarsıntı şiddeti ve sıklık derecesinden önemli oranda etkilendiği görülmüştür. Nümerik analizler sonucunda ayrıca, kum tabakası içerisinde daha az geçirgen silt tabakası bulunması durumunda, silt tabakası altında bir miktar ani boşluk suyu basıncı artışı olduğu ve silt tabakasının üst tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarının azalmasına yol açtığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, nümerik modelleme, su filmi, model deneyler, silt ara tabakası

ABSTRACT

Liquefaction and consequent lateral spreading is one of the major topics of investigation in geotechnical engineering following their sometimes drastic effects on structural damages caused by earthquakes.

In this study, in order to be able to investigate the liquefaction phenomenon in uniform and layered sands, five series of shaking table model tests were conducted by means of an experimental set-up developed in the laboratory. The experiments were carried out on uniform sand columns, silt inter layered sand columns and two layered sand columns deposited at various relative densities and subjected to different input accelerations. During the experiments, excess pore water pressures generated during dynamic loading were measured by pore pressure transducers installed at three different depths and, the surface settlements and water film thicknesses were measured from the images recorded by a digital camera.

The results of the model tests have shown that the excess pore water pressures and volumetric strains are largely influenced by the shaking intensity and relative density. The results from the silt interlayered sands demonstrated that a water film is developed underneath the less permeable silt layer. The formation of the water film is seen to be influenced by the relative density of the sand layer underneath the silt seam, shaking intensity and the developed excess pore water pressure ratios. The observations regarding water film formation point out that the adverse effects of water film is expected to be more significant in loose sands rather than the presence of water film increasing the level of excess pore water pressures. In the field, the water film may not dissipate for days after an earthquake shaking and may lead to significant engineering problems such as flow failures in slopes.

The model tests are also numerically modelled to analyse the dynamic response of uniform and layered sand columns with finite element analysis using the program called DIANA, using the Towhata-Iai liquefaction model. As a result of the numerical analysis, excess pore water pressures were computed and compared with the experimental results. Generally a good agreement between the results of computed and measured excess pore water pressures is observed. The results of the numerical analyses have demonstrated that the build-up of excess pore water pressures is highly influenced by the shaking intensity and relative density of the sand deposit. The numerical analysis results also revealed that the presence of less permeable silt interlayer within the sand deposit can cause an abrupt increase in pore water pressures underneath the silt layer and reduce the excess pore water pressures developed in the upper sand layer.

Key Words: Liquefaction, numerical modelling, water film, model tests, silt interlayer

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

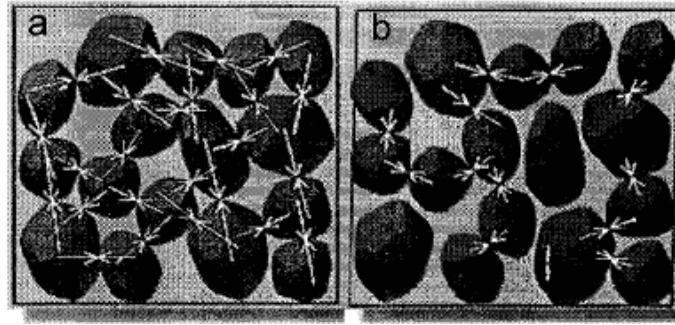
Modern Zemin Mekaniği'nin kurucusu olarak bilinen K. Terzaghi'nin 20.yüzyılın başlarında yaptığı deneysel araştırmalar ve geliştirdiği teoriler ile inşaat mühendisliği yepyeni bir bilim dalı ile tanışmış ve o dönemden bu güne kadar uzanan 80-90 yılda ise zemin mekaniği biliminde ve geoteknik mühendisliği'nde hızlı bir gelişme meydana gelmiştir. 20. yüzyılın başlarında Zemin Mekaniği biliminin kurulması ile inşaat Mühendisliği'nde meydana gelen bu ilerleme ve gelişmenin bir benzeri de 1906 yılında San Francisco depremi ile meydana gelmiştir. 1906 San Francisco depremi ile inşaat mühendisliği ve Geoteknik mühendisliği konuları arasına bu kez Zemin Dinamiği girmiş ve sıvılaşma olarak isimlendirilen zemin problemi literatürdeki yerini almıştır. Daha sonra meydana gelen 1964 Niigata ve Alaska depremleri, 1971 yılında San Fernando depremlerinde de görülen sıvılaşma olayı, deprem sarsıntıları veya diğer hızlı yükleme koşulları altında suya doymun kumlu ve siltli zeminlerdeki boşluk suyu basıncının artarak zeminin çevre basıncına eşitlenmesi sonucu zeminin mukavemet ve rijitliğinin azaldığı bir olay olarak tarif edilmiştir.

Sıvılaşma geoteknik mühendisliğinde en önemli ve oluşum mekanizması olarak açıklanması en karmaşık problemlerden birisidir. Niigata (1964), Alaska (1964), Loma Prieta (1989), Hyogoken-Manbu (1995) gibi geçmişte meydana gelen depremler ve yakın bir zamanda meydana gelen 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sıvılaşmanın zararlı etkilerini ortaya koymuştur. Bu depremler sonucunda oluşan sıvılaşma olayı neticesinde binalarda taşıma gücü kaybından dolayı oluşan temel göçmeleri (Şekil 1.1) kalıcı yanal yer hareketleri ve gömülü yapılarda göçmeler meydana gelmiştir. Depremler sırasında oluşan sıvılaşmanın meydana getirdiği zararlar ve hasarlar inşaat mühendislerinin bu konuya odaklanmalarına neden olmuştur.



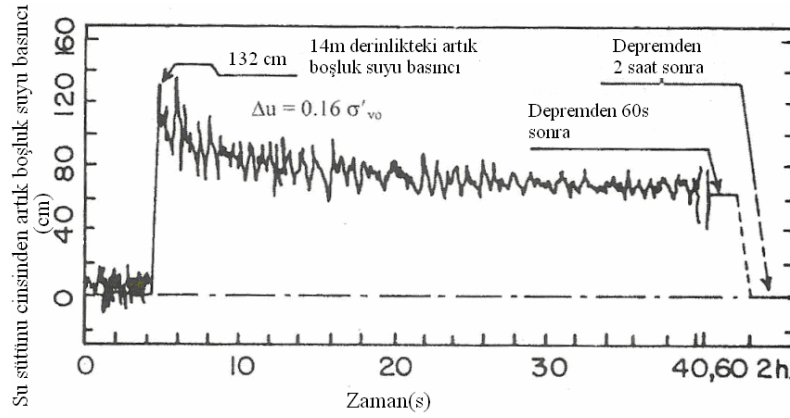
Şekil 1.1 Sıvılaşma nedeniyle oluşan taşıma gücü kaybının sonuçlarına bir örnek (USGS)

Statik zemin koşullarında suya doygun bir zeminin, zemin daneleri arasındaki temas nedeni ile belirli bir mukavemeti ya da direnci vardır. Zemin daneleri arasındaki bu temas kuvveti ise daneler arasında bir gerilme oluşturur ve bu gerilme Zemin Mekaniği'nde "efektif gerilme" olarak isimlendirilir. Şekil 1.2a'da statik koşullarda zemin danelerinin durumu ve beyaz oklar da zemin daneleri arasındaki temas kuvvetlerini göstermektedir. Zemin daneleri arasındaki boşluklarda yer alan ve zemin daneleri üzerinde bir gerilme oluşturan basınç boşluk suyu basıncı olarak bilinmektedir ve efektif gerilmeleri etkilemektedir. Deprem esnasında suya doygun zemin elemanı o kadar hızlı bir şekilde yüklenir ki , boşluklarda yer alan su drene olamaz ve boşluk suyu basıncı artar. Boşluk suyu basıncında oluşan bu artış efektif gerilmeleri ve dolayısı ile zeminin mukavemetini azaltır. Şekil 1.2b'de temas kuvvetlerini gösteren okların sayısı ve büyüklüğündeki azalma efektif gerilmelerdeki azalmaları göstermektedir. Zeminin mukavemetinde meydana gelen bu azalma zemin kütleğinde büyük oturmalara neden olan artımsal deformasyonların oluşmasına sebep olur.



Şekil 1.2 Zemin danelerinin durumu (a) Statik koşullarda (b) Deprem yüklemesi durumunda

Depremler sırasında suya doygun kum tabakalarında meydana gelen artık boşluk suyu basıncı artışı 25 Eylül 1980 Mino-Owari depreminde siltli bir kum tabakasında 14 m derinlikte yerleştirilmiş bir piezometrede de gözlenmiştir (Ishihara, 1981). Şekil 1.3'te görüldüğü gibi depremin başlaması ile birlikte artık boşluk suyu basıncında ani bir artış meydana gelmiştir. Deprem sırasında ölçülen maksimum ivme 0.10g ve oluşan maximum artık boşluk suyu basıncı ise 132 cm su sütunu olup bu değer ölçülen derinlikteki düşey jeolojik efektif gerilmenin %16'na karşılık gelmektedir ($\Delta u = 0.16 \sigma'_{v0}$). Boşluk suyu basıncındaki bu artışın ancak depremden 2 saat sonra sönümlendiği görülmektedir.



Şekil 1.3 Mino-Owari depremi sırasında ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı artışı (Ishihara, 1981)

Sıvılaşmış bir zemin tabakasının mukavemetini kaybetmesi ve artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi ile meydana gelen eşit olmayan oturmalar otoyollarda, demiryollarında ve üzerinde taşıtılan yapılarda büyük hasarlara neden olmaktadır. Sıvılaşmanın meydana geldiğini gösteren en belirgin işaret San Francisco 1906, Alasaka ve Nigaata 1964, Loma Prieta 1989, ve Adapazarı 1999 depremlerinde de ortaya çıkan zemin yüzeyinde oluşan kum konileridir. Ortaya çıkan bu kum konileri, depremin oluşturduğu sarsıntılar nedeni ile zemin içerisinde meydana gelen yüksek artık boşluk suyu basınçlarının yukarı yönlü hareketi ile sönümlenmesi esnasında kum danelerini de birlikte taşıması sırasında oluşmaktadır.

Deprem sarsıntılarının diğer bir deyişle sismik etkilerin meydana getirdiği sıvılaşma son 50 yıldır üzerinde oldukça yoğun bir şekilde araştırmalarının yürütüldüğü bir konu olma özelliğini taşımaktadır. Tüm bu çalışmaların amacı olayın oluşum mekanizmasını aydınlatılması ve sıvılaşmanın neden olduğu zararlı etkilerin azaltılmasıdır. Sıvılaşmanın neden olduğu etkilerin azaltılması için önce sıvılaşma mekanizmasını iyi bir şekilde anlamak ve analiz etmek gerekmektedir. Araştırmalar sıvılaşma mekanizmasının en önemli özelliğinin depremler sırasında boşluk suyu basıncı artışları ve sönümlenmesi sürecinde yattığını göstermektedir. Sıvılaşma konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar öncelikle, deprem sarsıntıları sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının açıklanabilmesi, kontrol altında tutulabilmesi ile ilgili olarak yapılmış olup, sıvılaşma sonrası boşluk suyu basıncı davranışı ve kum danelerinin davranışı ise son yıllarda incelenme konusu olmaya başlamıştır.

Depremlerin yer ve zaman olarak rastgele oluşan doğal bir olay olması ve depremler sırasındaki zeminin davranışı ile ilgili arazi kayıtlarının ender bulunuşu, araştırmacıları depremler sırasındaki zemin davranışını analiz etmek için farklı yollara başvurmaya itmiştir (Adalier, 1992). Bu nedenle, laboratuarda gerçekleştirilen dinamik üç eksenli ve burulmalı,

dinamik basit kesme, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri gibi deneysel çalışmalar yanında, dinamik zemin davranışının anlaşılması üzerinde yapılan analitik çalışmalar oldukça büyük önem kazanmıştır. Dinamik yükler nedeni ile suya doymun kumların sıvılaşma davranışının araştırılmasında sarsma tablası deneyleri geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Liu ve Qiao 1984, Finn vd., 1971, Yoshimi, 1967 ve Elgamal vd., 1989). Yapılan bu deneyler laboratuvar ve nümerik yöntemlerden elde edilen sonuçların birbirleri ile karşılaştırılması yönünden faydalı olmaktadır. Bununla birlikte prototip gerilme davranışını daha iyi modelleyebilmek için santrifüj model deneylerinden de faydalanılmaktadır (Lambe 1981, Akiyama 1982, Arulandan vd., 1988, Hushmand vd., 1988).

Sıvılaşma davranışının araştırılması için yapılan çalışmalar genel olarak homojen temiz kum tabakalarının sıvılaşması üzerine yapılan çalışmaları içermekte olup, doğada oluşumları itibarı ile tabakalı olarak çökelen ve sıkça rastlanan tabakalı kumların sıvılaşma ve sıvılaşma sonrasındaki davranışları daha çok yeni olarak incelenmeye başlanmıştır. Tabakalı kumların sıvılaşma sırasındaki davranışlarını incelemek için yapılan deneysel çalışmalar sırasında, doğada tabakalanma süreci sonucunda kum tabakaları arasında yer alan ve permeabilitesi kuma göre daha küçük olan silt tabakaları altında bir su filmi olduğu gözlenmiştir. Bu su filminin ise depremler sırasında yanal yer hareketlerini tetiklediği yönünde sonuçlara ulaşılmıştır (Scott ve Zuckerman, 1972; Huishan ve Taiping, 1984; Arulanandan vd., 1988; Elgamal vd., 1989; Adalier, 1992; Kokusho ve Watanabe, 1997; Kokusho 1999). Oluşan bu su filminin yanal yer hareketleri üzerindeki belirgin etkisine örnek olarak ise çeşitli alt tabakalardan oluşan ve 1964 Niigata ve 1995 Kobe depreminde yanal yer hareketlerinin meydana geldiği bölge gösterilmektedir (Kokusho, 2000).

Sıvılaşma olayı ve etkilerinin anlaşılması üzerinde bir çok araştırmacı tarafından yapılmış olan deneysel ve teorik araştırmalar oldukça önemli katkılar sağlamış olsa da sıvılaşma ve etkilerini tahmin etmek için, laboratuvarda yapılacak yeni model deneylere ve gözlenen davranışları açıklayacak matematiksel modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında deprem veya benzer dinamik yüklemelerin etkisi altında suya doymun kum zeminlerde gözlenen sıvılaşma olayının oluşumunun ve tabakalı ortamlarda zemin özelliklerine bağlı olarak gelişiminin deneysel ve nümerik araştırmalar ile açıklanması amaçlanmıştır. Suya doymun kumların sıvılaşma sırasındaki davranışlarının araştırılması için yapılan daha önceki çalışmaların uniform ve homojen kum tabakaları üzerinde yoğunlaşmış olması nedeni ile, bu çalışmada tabakalı kumların sıvılaşma ve sonrası davranışını

araştırmak için laboratuarda bir seri model deneyi gerçekleştirilmiştir. Model deneylerde farklı sıklıklarda uniform kum kolonları, farklı sıklıklarda tabakalı kum kolonları, ve farklı sıklıklarda silt ara tabakalı kum kolonları oluşturulmuştur. Oluşturulan tabakalı ve uniform kum kolonları üzerinde, dinamik yüklemeler sırasında zemin davranışını inceleyebilmek için sarsma tablasında farklı maksimum ivme değerlerine sahip titreşimler uygulanarak model deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca silt ara tabakalı kum kolonları üzerinde yapılan deneylerde daha önce yapılan çalışmaların ortaya koyduğu, geçirimsizliği daha düşük silt tabakası altında su filmi oluşum mekanizması üzerindeki olası etkiler ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Tabakalı ve uniform kumların sıvılaşma sırasındaki davranışını nümerik olarak modellemek için DIANA isimli sonlu elemanlar programından faydalanılmıştır. DIANA sonlu elemanlar programının liquefaction (sıvılaşma) modülü yardımı ile deney sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçları belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen boşluk suyu basıncı ölçümleri nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılarak tabakalı kumların sıvılaşma sırasındaki davranışı deneysel ve nümerik olarak modellenmeye çalışılmıştır.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında tabakalı kumların sıvılaşma ve sıvılaşma sonrasındaki davranışının araştırıldığı bu tez çalışması 8 bölümden oluşmaktadır. Tez çalışmasının birinci bölümünde tabakalı kumların sıvılaşma sırasındaki davranışını araştırmanın gerekçeleri ve tezin amacı verildikten sonra, ikinci bölümde konuyla ilgili olarak daha önce yapılmış olan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise kum zeminlerin sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışının açıklanabilmesi için geliştirilmiş çeşitli analitik ve teorik yöntemlere yer verilmiştir. 4. Bölüm’de kumların sıvılaşma davranışını açıklamak için geliştirilmiş olan çeşitli bünye modelleri anlatılmıştır. Tezin 5. Bölümü’nde bu tez çalışması için geliştirilen tek yönlü sarsma tablası deney sistemi, model deneyler sırasında kullanılan aletler, transdüserler, izlenilen deneysel yöntem, kullanılan zemin özellikleri ve kum kolonunun belirli sıklıklarda hazırlanma yöntemi hakkında bilgi verilerek laboratuarda yapılan model deneylerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. 6. Bölüm’de, tabakalı ve uniform kum tabakalarının sıvılaşma davranışını nümerik olarak modellemek için kullanılan DIANA isimli sonlu elemanlar programının özellikleri ve bu programda sıvılaşma modellemesinde kullanılan bünye modeli anlatılmıştır. Bu bölümde ayrıca, kullanılan bünye modelinde geçen malzeme parametrelerinin aldığı değer aralıklarını belirlemek ve farklı sıklıkta kum çökelleri için geçerli değerlerin seçilebilmesi için yapılan parametrik analizlere yer verilmiştir. 7. Bölüm’de model deneylerin DIANA ile

nümerik olarak modellenmesi sonucunda elde edilen sonuçlara yer verilerek model deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar ile DIANA sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sekizinci ve son bölüm’de ise model deneylerden ve DIANA sonlu elemanlar analizinden elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Geçmişte meydana gelen depremler sonucu kum tabakalarında oluşan sıvılaşma ve yanıl akmlar oldukça büyük zararlara neden olmuştur. Özellikle 1964 yılında meydana gelen Nigaata ve Alaska depremlerinde ve yakın zamanda Kocaeli'nde meydana gelen depremde kıyı ve nehir kenarlarındaki alanlarda sıvılaşma ve yanıl yer hareketi sonucu yüzlerce yapıda yıkımlar olmuş, dolayısıyla can ve mal kayıpları meydana gelmiştir. İncelemeler sonucunda, meydana gelen sıvılaşmanın ve yanıl akmanın sadece deprem süresince değil, deprem sona erdikten sonra da devam ettiği ve sıvılaşma sonrasında da deformasyonların ve oturmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Gözlenen bu davranışın oluşum mekanizmasını incelemek için birçok araştırmacı tarafından gerek arazi gerekse laboratuar araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Dinamik yükler altında kumların sıvılaşması ile ilgili olarak yapılan çok sayıda çalışmanın, tekrarlı yükler altında sıvılaşmaya yol açan boşluk suyu basıncı artışı ve sıvılaşma başlangıcı üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu çalışmaların ise genel olarak homojen kum tabakalarının deprem sırasındaki davranışını belirlemek üzerine yapılan çalışmalar olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, doğada kum, silt ve siltli kumların ardaşık çökmesi ile oluşan tabakalı kum sistemlerinde, dinamik yüklemeler sırasında boşluk suyu basıncı oluşumu ve sıvılaşma sonrası zemin davranışı üzerine yapılan araştırmaların ise daha az olduğu göze çarpmaktadır.

Bu bölümde, zeminlerde sıvılaşma konusunda gerçekleştirilen bazı öncü çalışmalara değinildikten sonra, sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası zemin davranışı hakkında yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Suya doymun kumların tekrarlı yükler altında davranışı ve sıvılaşma olayının kuramsal ve deneysel olarak ayrıntılı incelenmesine ve nümerik modellenmesine ilişkin çalışmalara ise Bölüm 3'de yer verilmektedir.

2.2 Tabakalı ve Uniform Kumlarda Sıvılaşma

Seed (1966) çevrimsel yüklemeler altında kumun davranışını açıklayabilmek için kum numuneleri üzerinde bir seri dinamik deney gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlar kumların sıvılaşma davranışını modellemek için geliştirilmiş bir çok nümerik modelde referans olarak kullanılmıştır. Depremde arazi zemin elemanını etkiyebilecek benzer gerilme koşulları dinamik üç eksenli deneyde eksenel deviatorik basınç ve çekme uygulanarak modellenmeye çalışılmıştır. Bu durum, asal gerilme düzleminde, yani yatay düzlemde kayma gerilmelerinin

olmadığı düz arazi koşullarını temsil etmektedir. Deneysel olarak, rölatif sıklığın, çevre basıncının, çevrimsel yükleme genliğinin ve çevrim sayısının kumun sıvılaşma direncine olan etkisi araştırılmıştır. Deneylerde ilk çevrimlerde gevşek kumlarda önemli mertebede boşluk suyu basıncı artışlarının ve şekil değiştirmelerin oluşmadığı görülmüştür. Yük çevrim sayısı arttıkça, deformasyonlarda ani bir artış ve boşluk suyu basınçlarında da uygulanan çevre gerilmesine ulaşabilecek büyüklükte artışlar meydana geldiği gözlenmiştir. Bu noktada kumda başlangıç sıvılaşması olarak isimlendirilen olayın meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Aynı koşullarda sıkı olarak hazırlanmış kum numuneler üzerinde benzer deneyler yapıldığında ise, deformasyonların ve boşluk suyu basıncı artışlarının yavaş bir şekilde olduğu ve gevşek kumlardaki gibi ani meydana gelmediği gözlenmiştir. Bazı durumlarda çevre gerilmesine eşit boşluk suyu basınçları gözlemlenmesine rağmen deformasyonlarda önemli bir artış olmadan numune daha fazla yükleme çevrimlerine karşı koyabilmiştir. Bu deneyler sonucunda, gevşek kumlarda sıkı kumlara göre daha hızlı bir şekilde deformasyonların meydana geldiği ve ilk çevrimlerde benzer bir davranış gözlemlenirken, yükleme devam ettiğinde gevşek kumda birkaç çevrim sonrasında sıkı kuma göre daha büyük deformasyonlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gevşek kum numunesi büyük deformasyonlarda belli bir mukavemeti olmasına rağmen, bazı durumlarda deformasyonlara karşı direnç gösterememiştir. Sıkı kum numunesi ise büyük deformasyonlara maruz kalmaksızın ve mukavemetinde azalma olmaksızın daha fazla çevrim sayısına karşı koyabilmiştir. Sıvılaşmış kum numunesinin üzerindeki statik gerilmelerin etkisi altında davranışı, kumların mukavemetlerini yeniden kazandıkları bir şekil değiştirme mertebesine kadar deforme olabileceklerini göstermiştir. Gevşek kumlarda bu deformasyon seviyesi sıkı kumlara göre daha büyük değerlerdedir. Gevşek kum numuneleri üzerinde çevrimsel gerilme yerine çevrimsel şekil değiştirmeler etkisi altında da deneyler yapılmıştır. Beklenildiği gibi gevşek kumlarda artan çevrimsel şekil değiştirme sayısı ile birlikte kumun mukavemetinde azalma ve boşluk suyu basınçlarında artış görülmüştür. Sonuç olarak sıkı kumların sıvılaşmaya karşı direncinin gevşek kumlara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çevre gerilmesinin etkisini araştırmak için de aynı boşluk oranına sahip üç kum numunesi üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde numuneler farklı çevre basınçları altında konsolide edilmiş fakat aynı çevrimsel yükleme genliği ile yüklenmiştir. Deneyler çevre gerilmesindeki artışın kumun sıvılaşmaya karşı direncini arttırdığı göstermiş ve yüksek çevre gerilmelerinde sıvılaşmaya ulaşmak için daha fazla çevrim sayısına gerek olduğu görülmüştür. Çevrimsel gerilme genliğinin ve çevrim sayısının sıvılaşmaya karşı direnç (mukavemet) üzerindeki etkisi üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ise, uygulanan çevrimsel gerilmenin büyüklüğünün

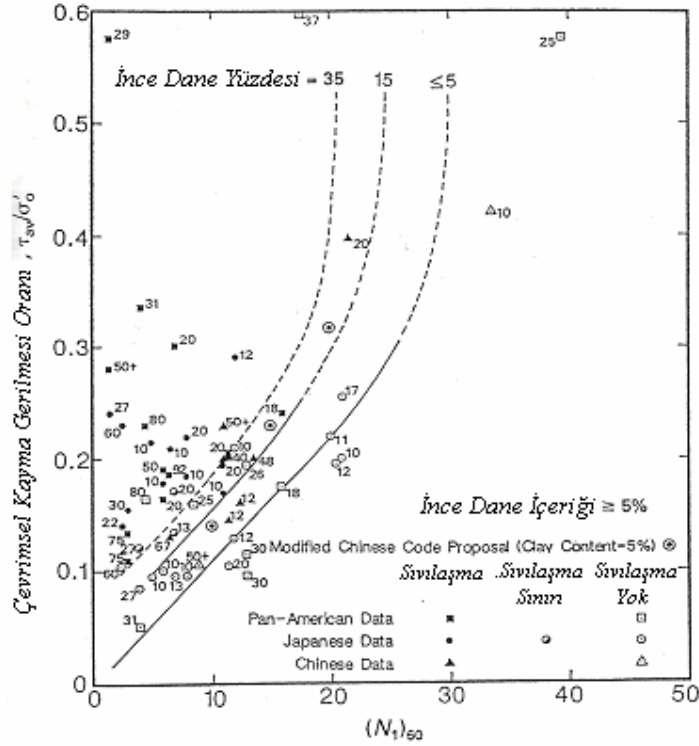
artması ile sıvılaşmanın meydana geldiği çevrim sayısı değerinde azalma olduğunu göstermiştir.

Arazide kum tabakalarının sıvılaşması üzerinde etki eden diğer faktörler arasında ise yer altı su seviyesinin derinliği, kumun uniformluğu ve kum tabakasının yer aldığı zemin tabakalaşması durumu sayılabilir. Örneğin; gevşek bir kum tabakası üzerinde sıkı bir kum tabakası yer alıyorsa, herhangi bir dinamik yükleme sonucunda ilk önce gevşek kum tabakası sıvılaşacaktır. Ayrıca yeraltı su seviyesi altındaki kum tabakasında bir sıvılaşma meydana geldiğinde, yeraltı su seviyesi üzerindeki kum tabakasında sıvılaşma ancak yukarı doğru bir su akışı olursa meydana gelecektir. Bu nedenle bir sahadaki kum tabakasının sıvılaşma durumu ve davranışı incelendiğinde yukarıdaki faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Seed ve Idriss (1967) tarafında yapılan diğer bir çalışmada ise 1964'de Niigata'da 7.3 büyüklüğünde bir depremin yol açtığı sıvılaşma olayları incelenmiştir. Niigata'daki binaların ve zeminin davranışına dayalı olarak, sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için araştırmacılar deprem sırasında gözlenen davranışı hesaplamalar yolu ile belirlenen davranış ile karşılaştırarak, Basitleştirilmiş Yöntem olarak isimlendirilen sıvılaşma analiz yönteminin uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Bunun için önce ana kayada etkiyen ivme zaman değişimleri belirlenmiştir. İkinci adımda zeminin deprem sırasındaki davranışı ve zemin tabakasının farklı derinliklerinde meydana gelen kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Elde edilen kayma gerilmesi zaman tarihçesi kullanılarak eşdeğer uniform çevrimsel kayma gerilmeleri ve eşdeğer çevrim sayısı belirlenmiştir. Daha sonra ise aynı eşdeğer çevrim sayısında sıvılaşmaya neden olacak çevrimsel kayma gerilmeleri laboratuvar deneyleri ile belirlenmiş ve Deprem sırasında meydana gelmiş olan kayma gerilmeleri ile sıvılaşmaya yol açacak olan kayma gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, her bir tabakadaki ivme zaman değişimlerinin, deplasmanların, gerilmelerin, şekil değiştirmelerin de bu yöntemle hesaplanabildiği belirtilmekle beraber, sadece hesaplanan kayma gerilmeleri sunulmuş ve değerlendirilmiştir. Niigata'daki zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyeli 3 farklı bölgede bu yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu bölgeler, aşırı oturmaların ve bina devrilmelerinin yoğun olduğu ağır hasarlı bölge, oturmaların ve bina hasarlarının az olduğu orta hasarlı bölge ve ağır hasarlı bölge gözlenmekle birlikte bir dolgunun yer aldığı ve sıvılaşmanın olmadığı bölge olmak üzere değerlendirilmiştir. Basitleştirilmiş yöntemle elde edilen sonuçların bu üç bölgede gözlemlenen davranışla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Analizlerde çeşitli varsayımların ve basitleştirmelerin bulunmasına rağmen, suya doygun kum zemin

tabakalarının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için oldukça iyi bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca yer altı su seviyesinin ve bir dolgunun sıvılaşma direncine olan etkisi de incelenmiştir. Buna göre, YASS'nin derinde yer aldığı bölgelerde sıvılaşmanın yüzeye yakın bölgelerdekine göre daha küçük ölçekli olarak meydana geldiği, bir dolgunun yer aldığı bölgede ise çevre basıncını arttırması nedeni ile dolgunun mevcudiyetinin alttaki zemin tabakalarının sıvılaşma direncini önemli miktarda arttırdığı gözlemlenmiştir.

Anchorage(Alaska) ve Niigata'da depremler sırasında meydana gelen sıvılaşma olaylarından sonra, drenajsız çevrimsel yükleme koşullarında kum zeminlerin davranışını deneysel ve nümerik olarak modellemeye yönelik bir çok çalışma yapılmış olup, bu konudaki çalışmalar halen de devam etmektedir. Kum zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyelini değerlendirmeye yönelik çalışmalardan en yaygın kullanım alanı bulanlar, kum zeminlerin sıvılaşma direncini değerlendirmek için arazide elde edilmiş verilerin, örneğin SPT-N darbe sayısının kullanıldığı yöntemlerdir. Bu yaklaşım kapsamında, SPT-N darbe sayısı ile kumun sıvılaşmaya karşı direnci arasında Seed vd. (1971) tarafından bir ilişki kurulmuştur. Kumun sıvılaşması için gerekli olan kayma gerilmesinin düşey efektif gerilmeye oranı olan çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile SPT-N arasındaki ilişkiyi göstermek için, depremler sırasında sıvılaşma olduğu ve oluşmadığı bilinen arazilerin verilerinden faydalanılarak Şekil 2.1' deki gibi sıvılaşmaya yol açacak sınır gerilme oranlarını veren bir grafik elde edilmiştir. Şekil 2.1'den görüldüğü gibi ince dane oranının sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisi de dikkate alınabilmektedir.



Şekil 2.1 Çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ile SPT-N arasındaki ilişki (Seed vd., 1971)

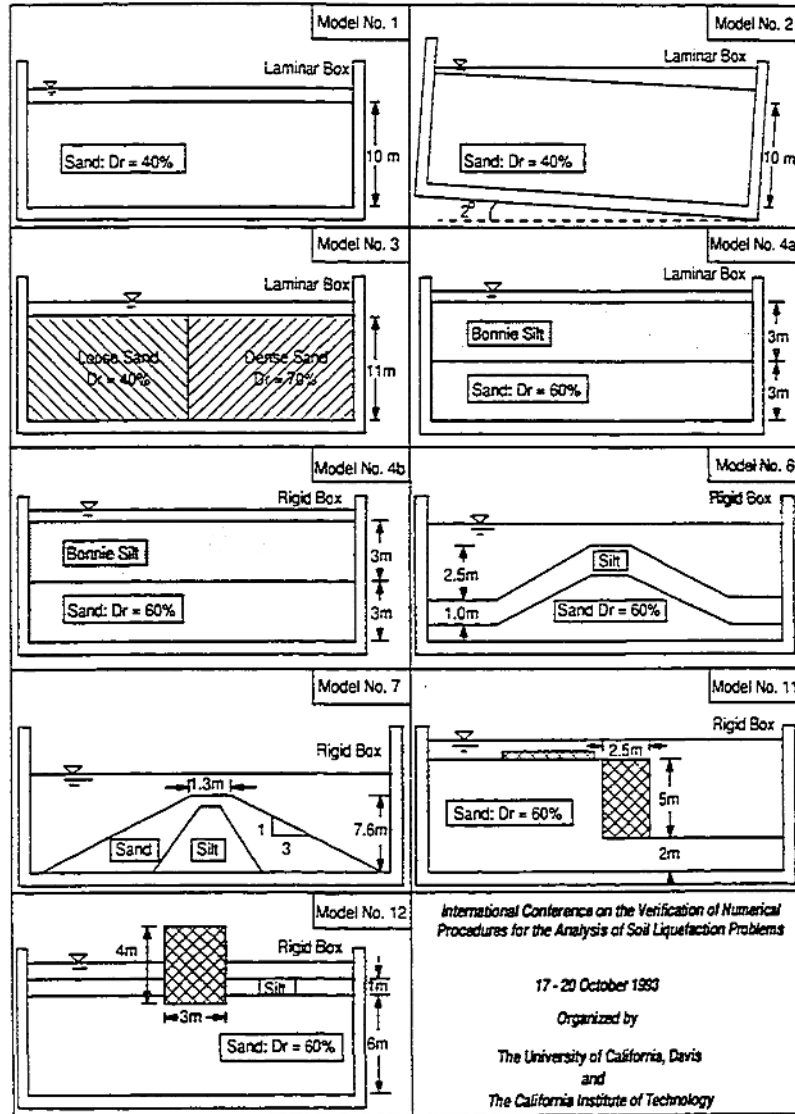
Seed vd.(1975) 1971 yılında meydana gelen deprem sonucunda San Fernando toprak barajında oluşan hareketleri incelemiştir. Richter ölçeğine göre 6.6 büyüklüğünde olan deprem sonucunda San Fernando toprak barajında iki büyük kayma olayı meydana gelmiştir. Bunlardan birincisi, alt San Fernando barajının kretindeki oturma ve mansap tarafında meydana gelen kaymadır. Fakat, baraj dolgusu büyük oranda mukavemetini koruduğu için büyük bir zemin hareketi ve barajda göçme meydana gelmemiştir. İkinci olayda ise; memba tarafındaki şev ve mansap tarafındaki şevin üst kısmı rezervuara doğru kaymıştır. Daha sonra yapılan arazi çalışmaları sonucunda, memba dolgusu tabanına ve kil çekirdeğin memba tarafına yakın kısmının tabanında sıvılaşma meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Bu sonuca dolguda boşluk suyu basınçlarının artması ve kayan kütlede görülen kum kaynamalarının gözlenmesi nedeni ile ulaşılmıştır. Göçme mekanizması ve saha koşulları göz önüne alınarak, barajın duraylılığının pseudo-statik analizlerle incelenemeyeceği ve dinamik analizlerle yeniden değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Popescu vd. (1993) laboratuvar ortamında çeşitli zemin modelleri oluşturarak sentrifüj deneyleri yapmıştır. Bu çalışma sıvılaşmadan dolayı meydana gelen göçme mekanizmalarının anlaşılabilmesi ve sıvılaşma ile ilgili problemleri inceleyebilmek için üretilen çeşitli nümerik

analizlerin doğrulanabilmesi için veri tabanı oluşturmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle projenin ismi VELACS (Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies) projesi olarak bilinmektedir. Çalışmada dokuz sentrifüj modeli önerilmiş ve bu modeller üzerinde ABD ve İngiltere'deki çeşitli üniversitelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın en temel amaçlarından birini sıvılaşmayı nümerik olarak modellemeye yönelik analitik yöntemlerin doğruluğunun sınanması oluşturmaktadır. Bu amaç için yapılan çalışmalar A sınıfı olarak isimlendirilmiştir. Şekil 2.2'de VELACS Projesi kapsamında gerçekleştirilen sentrifüj model deneyleri verilmiştir. Şekil 2.2'den görüleceği üzere

- i. Model No. 1 Laminar kutuda yatay tabakalı gevşek kum modeli
- ii. Model No.2 Laminar kutuda eğimli gevşek kum modeli
- iii. Model No.3 Bir tarafı gevşek, bir tarafı sıkı kumdan oluşan model
- iv. Model No. 4a Laminar kutuda tabakalı zemin modeli
- v. Model No.4b Rijit duvarlı kutuda tabakalı zemin modeli
- vi. Model No. 6 Rijit duvarlı kutuda su altında dolgu modeli
- vii. Model No 7 Su altında kil çekirdekli kum modeli
- viii. Model No. 11 Kum geri dolgulu ağırlık tipi bir istinat duvarı modeli
- ix. Model No. 12 Kum tabakası üzerine oturtulmuş bir yapı modeli

modelleri üzerinde deneyler uygulanması planlanmıştır.



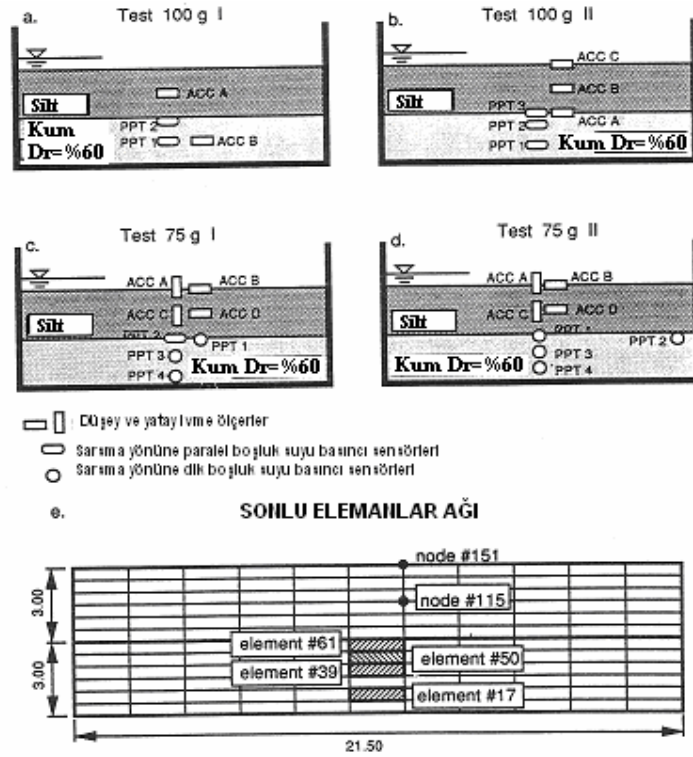
Şekil 2.2 VELACS Projesi kapsamında gerçekleştirilen A sınıfı sentrifüj model deneyleri (Arulanandan ve Scott, 1993b)

VELACS projesi (Arulanandan ve Scott, 1993b) kapsamında yukarıda verilen dokuz adet sentrifüj deney modeli DYNAFLOW V.93 isimli bir bilgisayar programı kullanılarak nümerik olarak analiz edilmiştir. Bu program doğrusal olmayan saha davranışı analizi yapabilen bir sonlu elemanlar programıdır. Program kuru veya suya doygun zemin tabakalarının doğrusal olmayan zemin davranışını basit plastisite teorisine dayanan bir kinematik pekleşme modeli kullanarak analiz etmektedir. Plastik deformasyonun dilatasyon bileşeni için ise bileşik olmayan akma kuralı dikkate alınmaktadır. Nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Nevada kumu üzerinde yapılan çeşitli statik ve dinamik üç eksenli basınç deneyleri ile dinamik kesme deneylerinden ve mevcut olmayanlar ise

literatürde verilen çeşitli bağıntılardan korele edilerek belirlenmiştir. Analizlerde suya doymun zemin iki fazlı geçirimli(poroz) malzeme olarak modellenmiş ve aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir:

- Hiperbolik gerilme-şekil değiştirme modeli
- Sıkışabilir su
- Küçük deformasyon varsayımı

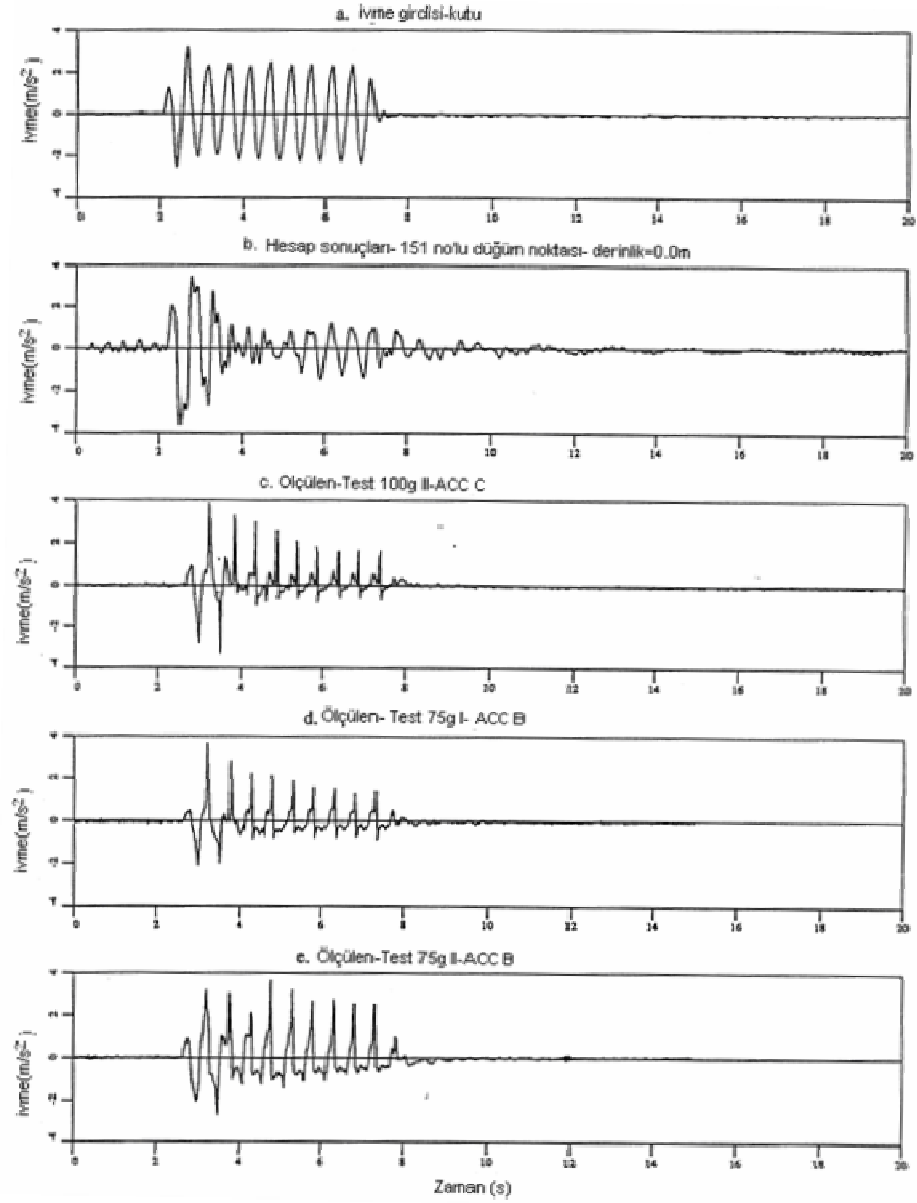
Model 4a ve Model 4b sentrifüj modellerinin nümerik analizinde sentrifüj düzeneğinin ölçümlere olan etkisini araştırmak için de iki tip karşılaştırma deneyi yapılmıştır. Model geometrileri gösterilen Şekil 2.3 (a)-(d)'de en üstte silt tabakası altında ise %60 rölatif sıklıkta Nevada kumunun yer aldığı tabakalı bir zemin modeli görülmektedir.



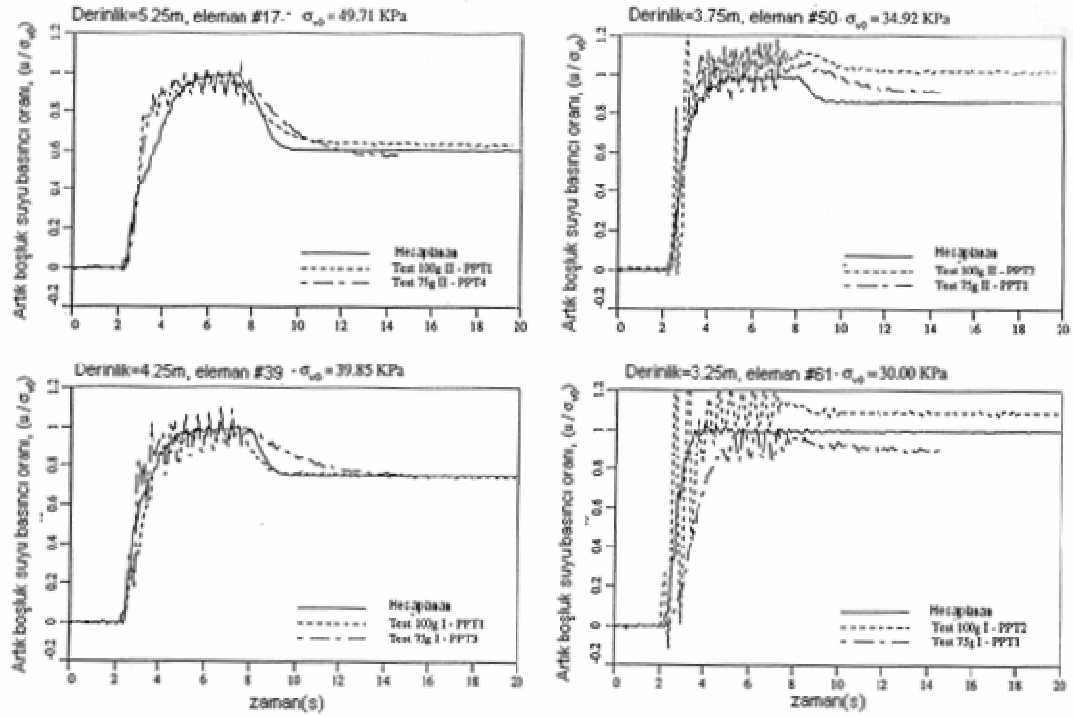
Şekil 2.3 Model 4a ve Model 4b sentrifüj model deney düzenekleri ve sonlu elemanlar modeli (Popescu ve Prevost, 1993)

Deneylerin ikisi 75g'lık sentrifüj ivmesi altında, diğer ikisi ise 100g'lık sentrifüj ivmesi altında gerçekleştirilmiştir. Modelin sonlu elemanlar ağı Şekil 2.3e'de gösterilmiştir. Nümerik analizler sonucunda elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Yüzeyde nümerik analizlerden elde edilen yatay ivmelerin zamanla değişimi, ölçülen değerle birlikte Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Farklı derinliklerde hesaplanan

artık boşluk suyu basınçlarının değişimi ile ölçülen değerlerin karşılaştırması ise Şekil 2.5’de verilmiştir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’den analiz sonuçları ile deneysel ölçümlerin oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.4 Yüzeyde hesaplanan ve ölçülen ivme-zaman değişimlerinin karşılaştırılması (Popescu ve Prevost, 1993)

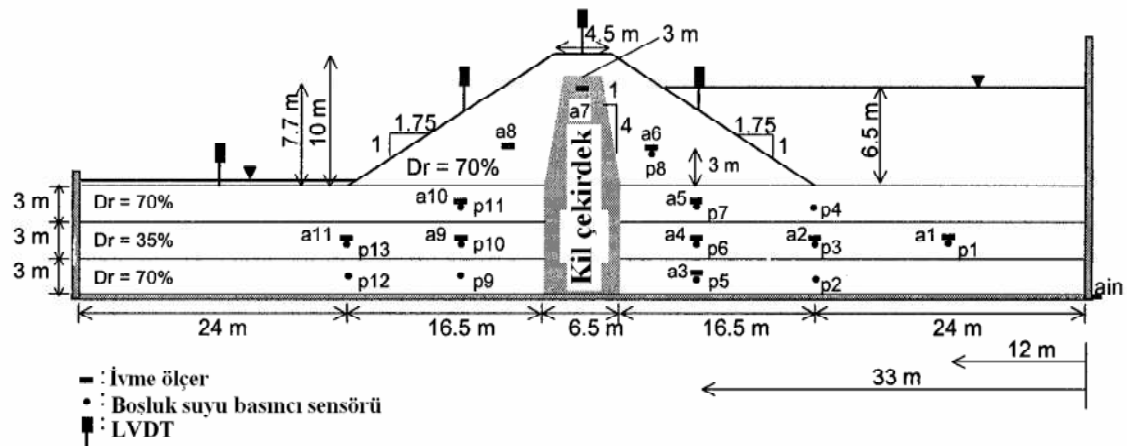


Şekil 2.5 Farklı derinliklerde ölçülen ve hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması (Popescu ve Prevost, 1993)

Popescu (2002) bir sonlu elemanlar programı yardımı ile dinamik yüklemenin frekansının zemin dinamik davranışına olan etkisini incelemiştir. Çalışmada farklı zemin koşullarında farklı frekans aralıklarında maksimum spektral değerlere sahip 4 farklı tepki spektrumuna ait ivme-zaman tarihçesi kullanılmıştır. Bu ivme zaman değişimleri deprem girdisi olarak kullanılmış, önce gevşek ve orta sıkı kum tabakalarında 1.8 -6.7 Hz ve 0.7-2.0 Hz frekans aralıklarındaki iki farklı ivme zaman tarihçesi kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, düşük frekans aralığındaki ivme-zaman tarihçesinin en yüksek artık boşluk suyu basınçlarını ve yatay deplasmanları oluşturduğu gözlenmiştir. Boşluk suyu basınçlarının zamanla artışı, zeminin mukavemetinde dolayısı ile kayma modülünde bir azalmaya neden olmuştur. Daha sonra, frekans aralıkları 2.6-6.7 Hz, 1.2-1.5 Hz ve 0.7-1.6 Hz olan üç farklı ivme-zaman tarihçesi kullanılarak bir baraj dolgusu analiz edilmiştir. Deprem sonrası etkileri araştırmak için ise uygulanan ivme-zaman değişiminin süresi uzatılarak analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları, farklı ivme zaman değişimlerinin güçlü sarsıntı sırasında ve hemen sonrasında önemli bir zarara yol açmadığını göstermiştir. Sarsıntıdan sonra ise düşük frekans

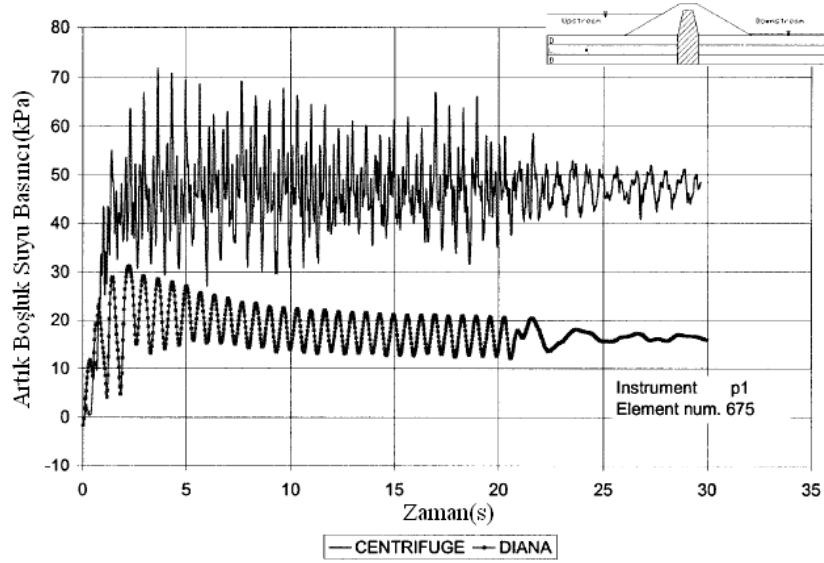
aralığına sahip iki ivme tarihçesi ile yapılan analizlerde önemli kalıcı hasarlar ve şev göçmelerinin meydana geldiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, düşük frekans aralıklarındaki sismik ivmelerin etkidiği zemin tabakalarında boşluk suyu basınçlarında ve deformasyonlarda artış meydana geleceği sonucuna varılmıştır.

Badia (2003) santrifüj deneyleri uygulanan farklı sıklıklarda hazırlanmış kum zemin üzerinde oluşturulmuş bir baraj modelini DIANA sonlu elemanlar programı ile nümerik olarak modellemiş ve deneyden elde edilen boşluk suyu basınçları, deformasyonlar ve ivmeleri nümerik analizden elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Deneysel modelin geometrisi ve enstrümantasyonu Şekil 2.6'da verilmiştir. Nümerik analizlerde kullanılacak malzeme parametrelerini belirleyebilmek için parametrik bir çalışma yapmıştır. Bunun için bünye modelinde yer alan oluşturan S1, W1, P1, P2 ve C1 malzeme parametrelerinin literatürde kullanılan aralık değerleri tespit edilerek ve daha sonra her biri değiştirilerek DIANA'da analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara en uygun sonuçları veren parametreler malzeme parametreleri olarak seçilmiştir.

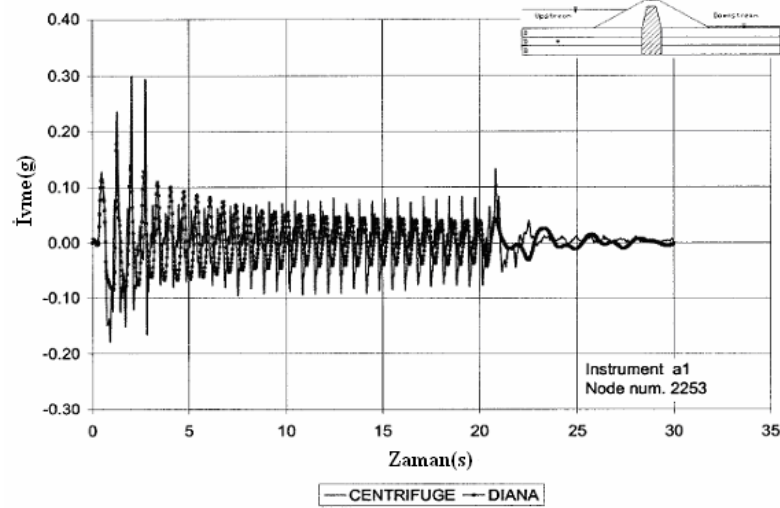


Şekil 2.6. Deneysel modelin geometrisi ve enstrümantasyonu (Badia, 2003)

Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de sırası ile model barajın altındaki kum tabakasında ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı ve ivme-zaman değişimlerinin DIANA analizinde aynı nokta için belirlenmiş olan sonuçlar ile karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Santrifüj deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ile DIANA'dan elde edilen nümerik sonuçların karşılaştırılması (Badia, 2003)

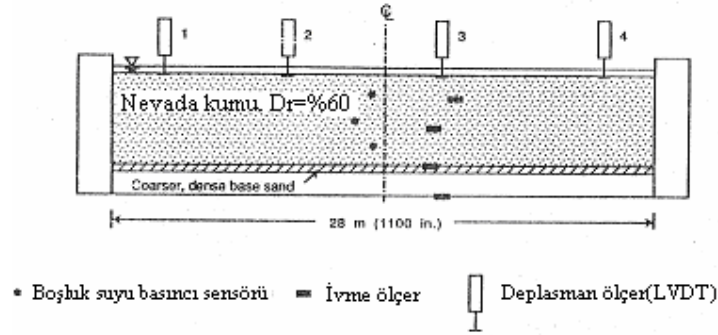


Şekil 2.8 Santrifüj deneyinde ölçülen ivme-zaman değişimleri ile DIANA'dan elde edilen nümerik sonuçların karşılaştırılması (Badia, 2003)

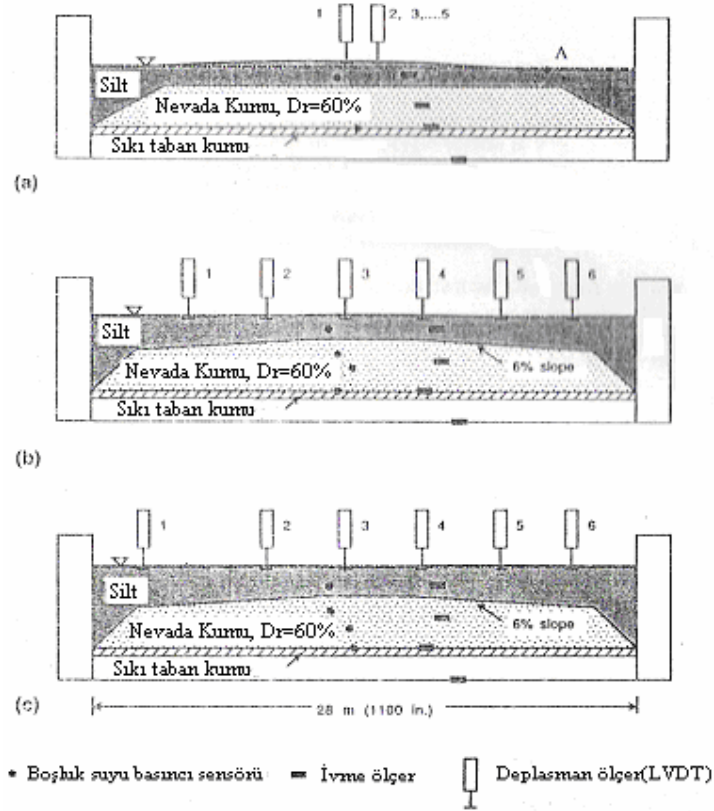
Badia(2003) tarafından diğer ölçüm noktaları için de verilen karşılaştırmalardan, nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumlu olmadığı görülmektedir. Badia (2003) sonuçlar arasındaki bu uyumsuzluğu birkaç nedene bağlamıştır. Bunlardan birincisi, modelde kullanılan malzeme parametrelerinin belirlenmesinde dinamik kesme kutusu deney sonuçlarının kullanılmasıdır. Santrifüjde veya sarsma tablasında yapılan büyük ölçekli deneylerdeki karmaşık davranışın, başlangıç gerilmelerinin uniform olduğu ve gerilmelerde ve şekil değiştirmelerde uniform değişimlerin olduğu eleman deneylerinden (rezonant kolon testi, dinamik üç eksenli deney, dinamik kesme kutusu ve dinamik burulmalı

kesme deneyi) belirlenen malzeme parametreleri ile tam olarak modellenemeyeceği öne sürülmektedir.

Fiegel ve Kutter (1994) gerçekleştirmiş oldukları santrifüjlü sarsma tablası deneylerinde sıvılaşma olayını ve tabakalı kumlarda su filminin oluşma mekanizmasını araştırmaya çalışmıştır. Bu amaçla, Şekil 2.9'da ve Şekil 2.10'da verilen deney modelleri oluşturularak sentrifüj deney aletinde 50g'lık bir sentrifüj ivmesi altında deneyler yapmışlardır. İvme kaydı olarak iki farklı ivme tarihçesine sahip taban hareketi, 10 çevrim sayısından oluşan bir harmonik hareket ile pik ivmesi 0.6g değerine büyütülmüş olan El Centro depremi kaydını kullanmışlardır. Deneyler, 56cmx28cmx18cm ebatlarındaki rijit duvarlı bir alüminyum kutuda gerçekleştirilmiştir. Model tabanında iri daneli temiz kum, ortada uniform derecelenmiş ince kum (Nevada kumu) ve en üste de plastisitesi olmayan silt olmak üzere üç farklı zemin tipi kullanılmıştır.

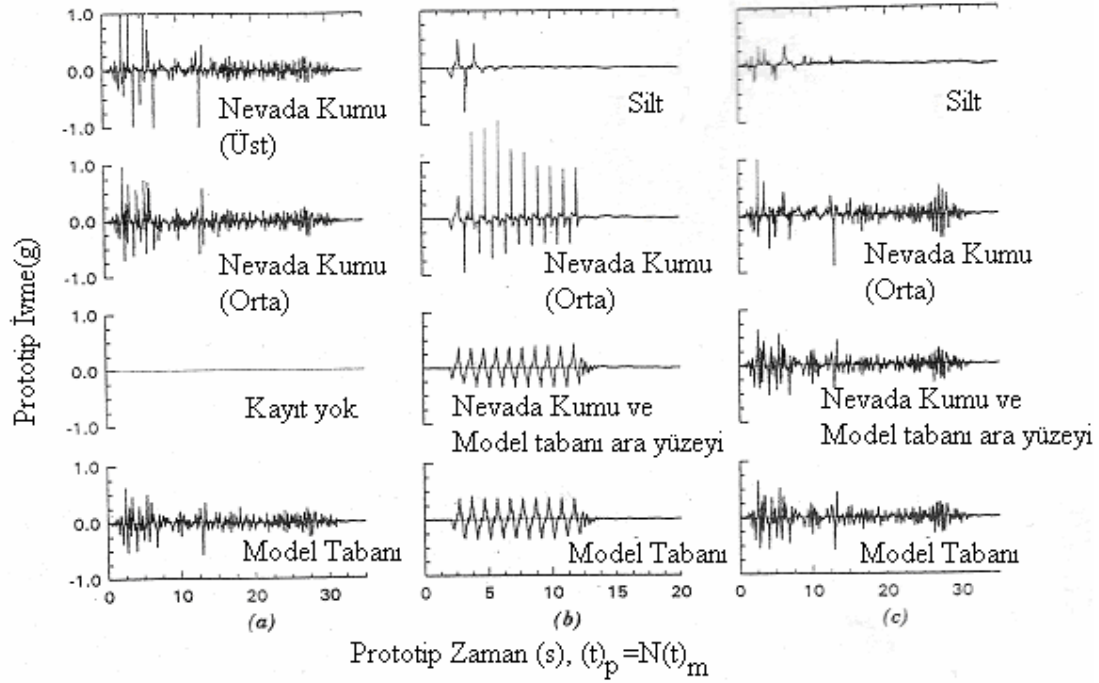


Şekil 2.9 A model deneyi ve enstrüman sayonu (Fiegel ve Kutter, 1994)

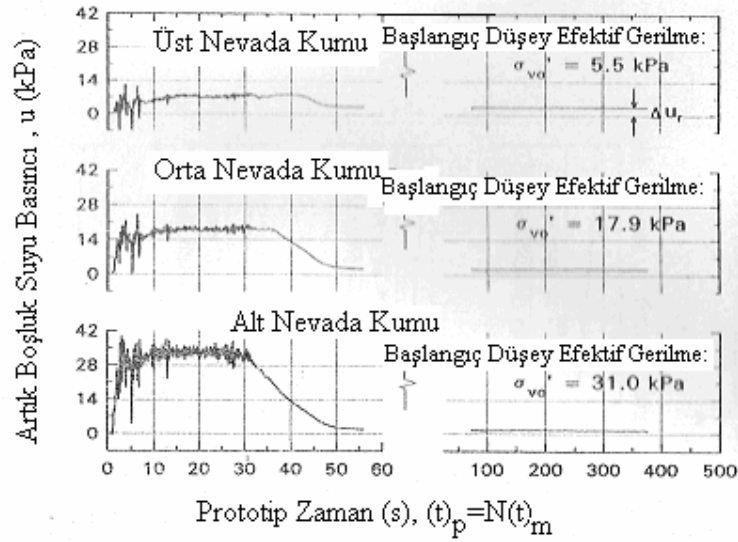


Şekil 2.10 B, C ve D model deneyleri ve enstrümentsayonu (Fiegel ve Kutter, 1994)

Konfigürasyonları Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da verilen A, B ve D deneylerinden elde edilen ivme-zaman değişimleri Şekil 2.11'de, A deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ise sırası ile Şekil 2.12' de verilmiştir. Yazarlar tarafından Şekil 2.11'de verilen ivme-zaman değişimlerinde görülen büyük sıçramaların, dinamik yükleme sırasında kumun sıvılaşması ile gerilme izinin faz dönüşüm çizgisini aşarak dilate olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir. Kumun bu şekilde dilate olması ivme-zaman değişimlerinde büyük sıçramalara, diğer taraftan boşluk suyu basınçlarında ise negatif değerlerin oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 2.11 A, B ve D deneylerinden elde edilen ivme-zaman değişimleri (Fiegel ve Kutter, 1994)

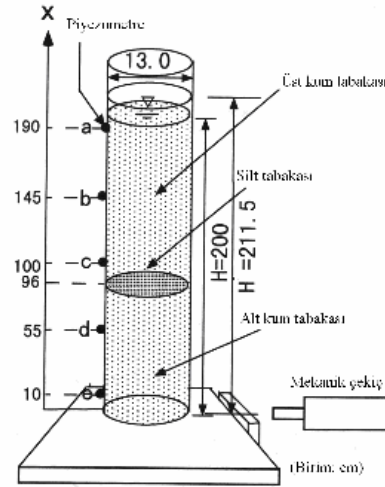


Şekil 2.12 A model deneyinde farklı derinliklerde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri (Fiegel ve Kutter, 1994)

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı- zaman değişimleri toplu olarak incelendiğinde, tabakalı kum modellerinde boşluk suyu basıncı oluşumunun, uniform kum modelinden farklı olduğu gözlenmiştir. Uniform kum modeli olan A modelinde, boşluk suyu basıncında hızlı bir artış

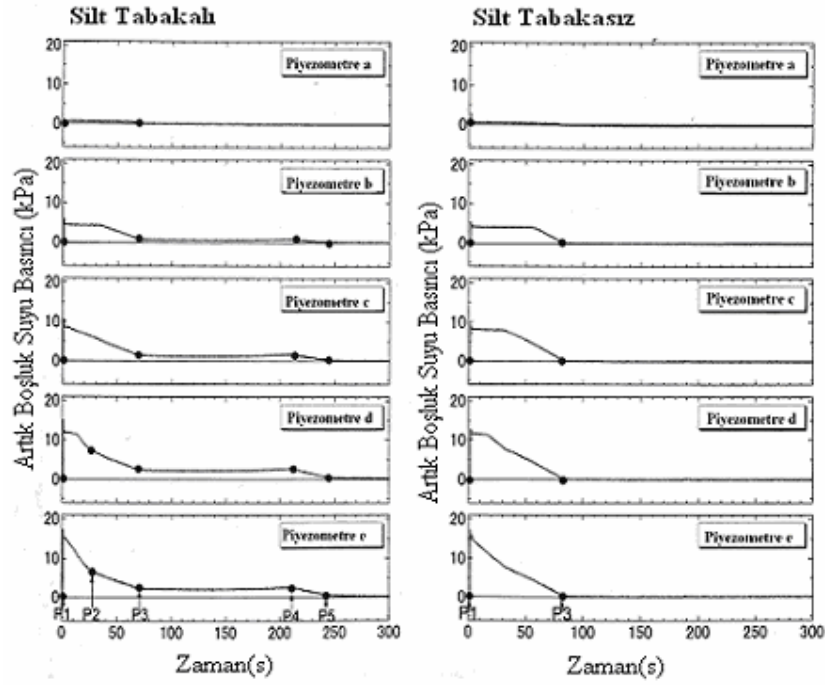
ve hızlı bir sönümlenme görülmektedir. Diğer taraftan, silt tabakalı B ve C modellerinde ise kumda boşluk suyu basınçlarının hızlı bir şekilde arttığı, silt tabakasında ise artışın daha yavaş olduğu gözlenmektedir. Silt tabakasındaki boşluk suyu basıncının bir kısmı siltten, bir kısmı ise kum tabakasından iletilen basınçlardan oluştuğu belirtilmektedir. Ayrıca, üstte silt tabakasının yer aldığı B ve C modellerinde düşük geçirimsiliğe sahip silt tabakasının altında su filmi ya da oldukça gevşek bir zemin tabakasının oluştuğu belirtilmiştir. Deneyler sırasında elde edilen video kamera görüntülerinden kum kaynaması olduğu ve silt tabakasının kırılarak kum danelerinin model yüzüne doğru hareket ettiği ve silt tabakasının üzerinde biriktiği gözlenmiştir. Bu sırada boşluk suyu da hızlı bir şekilde yüzeye doğru hareket ederek, basınçların sönümlenmesini hızlandırmıştır.

Tabakalı kumların depremler sırasındaki davranışını inceleyebilmek amacı ile Kokusho vd.(1998), Kokusho (1999) tarafından bir boyutlu sarsma tablası deneyleri yapılmıştır. Bir boyutlu deneyler sırasında pleksiglas bir hücre içerisine farklı sıklıkta hazırlanmış kum tabakaları ve iki kum tabakası arasında geçirimsiliği kum tabakalarına göre daha az olan ince bir silt tabakası yerleştirilmiştir (Şekil 2.13). Oluşturulan tabakalı kum zeminde, uygulanan darbe yük sonucunda meydana gelen artık boşluk suyu basıncı artışları ölçülmüş ve geçirimsiliği az olan siltli tabaka altında oluşan su filminin sıvılaşmaya yol açtığı ve artık boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ile birlikte oturmaların ve ilave deformasyonların meydana geldiği gözlenmiştir.

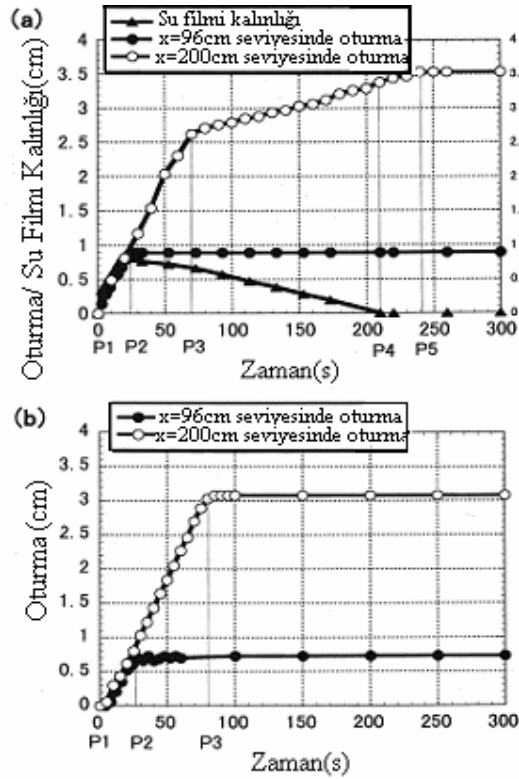


Şekil 2.13 Bir Boyutlu Sıvılaşma Deney Modeli (Kokusho, 1999)

Silt ara tabakalı ve silt ara tabakasız örnekler üzerinde yapılan deneylerde ölçülmüş artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi Şekil 2.14’de, meydana gelen oturmaların ve su filmi kalınlığının zamanla değişimi ise Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



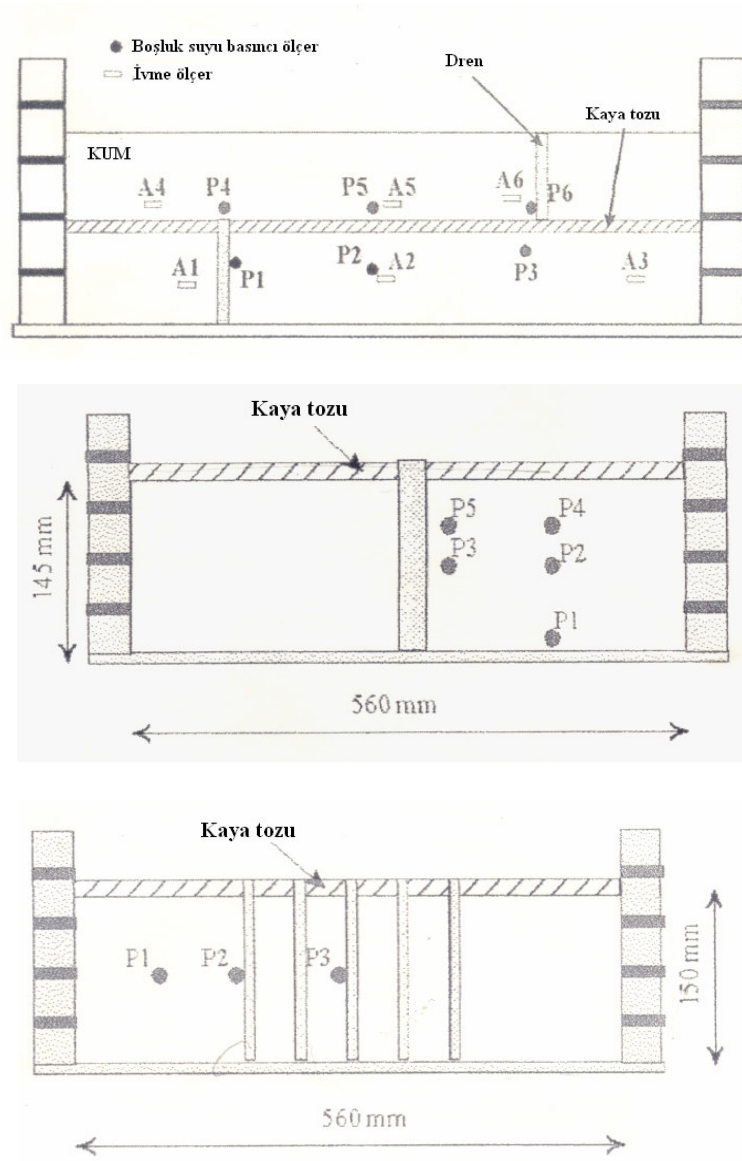
Şekil 2.14 Artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi (Kokusho, 1999)



Şekil 2.15 Oturma ve su filmi kalınlığının zamanla değişimi a) Silt tabakalı b) Silt tabakasız (Kokusho, 1999)

Kokusho(1999) ayrıca, bir boyutlu model deneylerde oluştuğunu gözlemlediği su filminin depremler sırasında eğimli bölgelerde meydana gelen yanal akımlar üzerinde etkisini araştırmak için iki boyutlu model deneyler yapmıştır. Bu deneylerde şeffaf dikdörtgen kesitli, 40cm x 80cm x 50cm boyutlarında bir kutu içerisinde eğimli ve arasında ince bir silt tabakası bulunan suya doygun kumlu bir zemin oluşturmuştur. Uygulanan titreşimler sonucunda, daha önce bir boyutlu model deneylerde olduğu gibi, geçirimsizliği düşük olan silt tabakası altında bir su filmi oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan bu su filminin ise eğimli kum tabakası altında kayma yüzeyi oluşmasına katkıda bulunduğu ve dolayısı ile sıvılaşma sonucunda oluşan yanal akmanın önemli bir tetikleyicisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tabakalı zeminlerde sıvılaşma ve drenaj durumunu incelemek amacı ile Brennan ve Madabhushi (2005) laboratuvarında bir seri sentrifüj deneyi gerçekleştirmiştir. Model deneylerde uniform ve silt ara katmanlı kum tabakalarına yerleştirilmiş düşey drenlerin sıvılaşma sırasındaki davranışı incelenmiştir. İnce daneli silt tabakası bulunmasının etkisini incelemek için gevşek bir kum tabakası üzerinde ve iki kum tabakası arasında silt tabakası olması durumları iki farklı model kullanılarak test edilmiştir. Düşey drenler ise büyük çaplı tek bir dren ve küçük çaplı dren grubu olmak üzere iki farklı şekilde oluşturulmuştur. Oluşturulan deney modelleri Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

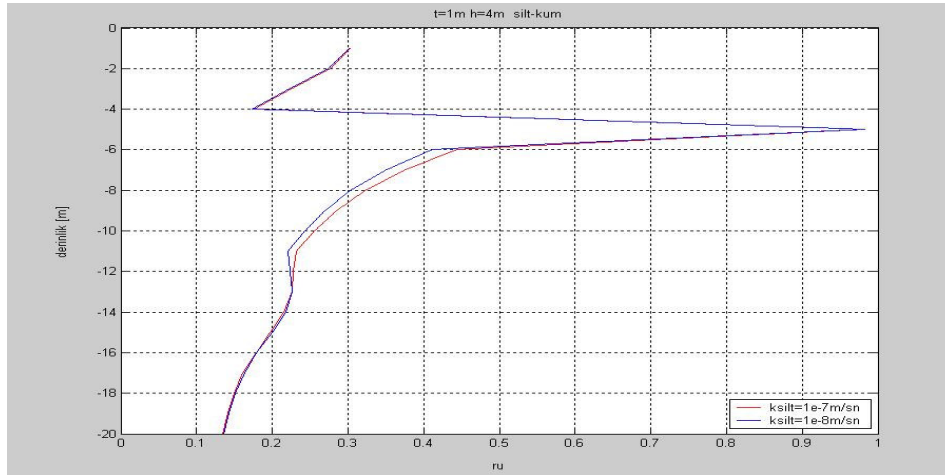


Şekil 2.16 Model deneylerin görünümü (Brennan ve Madabhushi, 2005)

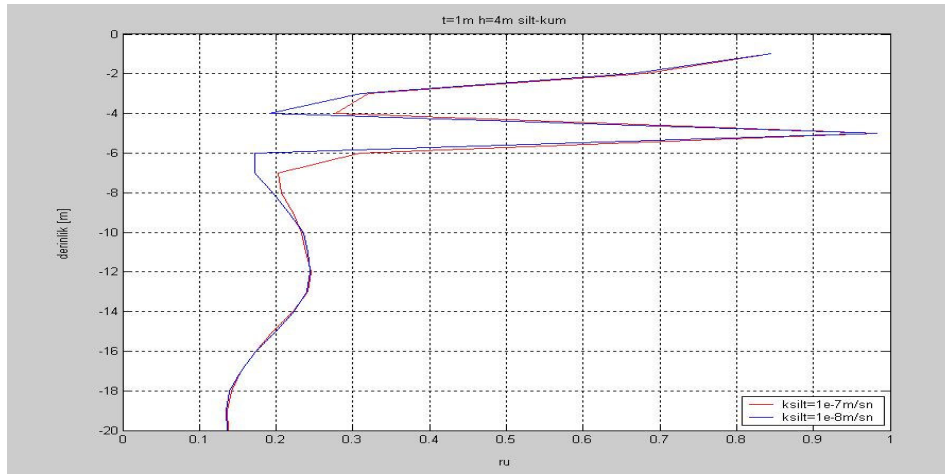
Her iki modelde maksimum ivmesi 11g yani prototip ölçekte 0.22g'e karşılık gelen bir sarsıntı uygulanmıştır. İnce daneli olan silt tabakasının kullanıldığı tabakalı kum deneylerinde suya doymuş kum tabakası ile ince daneli zemin arasında su filmi olduğu gözlenmiştir. Düşey drenlerin yüzeyde ince daneli bir zemin tabakası bulunması ya da bulunmaması durumlarında benzer boşluk suyu basıncı davranışı sergilediği görülmüştür. Bunun nedeni ise üstteki silt tabakasının oldukça düşük bir gerilme aktarması olarak açıklanmıştır. Deneyler sırasında kum kaynamalarının zemin yüzeyindeki dağılımı da özellikle incelenmiştir. Drenlerden uzaklaştıkça kum kaynamalarının göreceli olarak daha yoğun olduğu

gözlemlenmiş ve düşey drenlerin kum kaynamalarını önlemede etkin bir yöntem olduğu görülmüştür. Ayrıca, düşey drenler civarında su filmi oluşumunun önemli derecede engellendiği de gözlemlenmiştir. Fakat bu olumlu katkının drenlerin üst kısmının yeterli drenajı olmaması durumunda azaldığı ve geçirimsizliği düşük olan tabakanın altına ulaşmayan bir düşey drenin su filmi oluşumunu engellemediği görülmüştür. Gerçekleştirilen model deneylerden elde edilen sonuçlardan yola çıkarak araştırmacılar su filmi oluşumundan kaynaklanabilecek büyük şev kaymalarının düşey drenler yolu ile azaltılabileceği yönünde bir öneride bulunmuşlardır.

Tonaroğlu (2006) tarafından yapılan çalışmada, deprem yükleri etkisinde sıvılaşma durumunun oluşmasına yol açan etkenlere ve mekanizmalara açıklık getirmek amacı ile bir seri nümerik analizler gerçekleştirilmiş ve arazide zemin profili içinde kum tabakası arasında ince daha az geçirimli bir tabaka (örneğin silt tabakası) bulunması durumundaki zemin davranışı incelenmiştir. Bu durumu incelemek için 20m kalınlığında örnek bir zemin profilinde zemin yüzünden 10 m derinlik içinde, 1 ve 2m kalınlıkta ve farklı derinliklerde bir silt tabakası olması durumu analiz edilmiştir. Nümerik analizlerde LASS III (Ghaboussi ve Dikmen,1979) isimli bir bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Genel olarak silt tabakasının mevcudiyetinin oluşan boşluk suyu basıncı dağılımlarını ve sıvılaşma durumu oluşumunu önemli ölçüde etkilemekte olduğu belirlenmiştir. Şekil 2.17a ve şekil 2.17b’de sırası ile permeabilitesi 10^{-4} m/s ve 10^{-6} m/s olan gevşek kum tabakası içinde, zemin yüzünden 4m derinlikte kalınlığı 1m ve permeabilitesi 10^{-7} m/s ve 10^{-8} m/s olan bir silt tabakası olması durumunda oluşan artık boşluk suyu basıncı oranının derinlikle değişimi gösterilmiştir. Analiz sonuçları boşluk suyu basıncı artışlarının silt tabakası altında yüksek değerlere ulaştığı ve silt tabakasının mevcut olmadığı durumlara göre sıvılaşma derinliğinin arttığına işaret etmektedir.



(a)



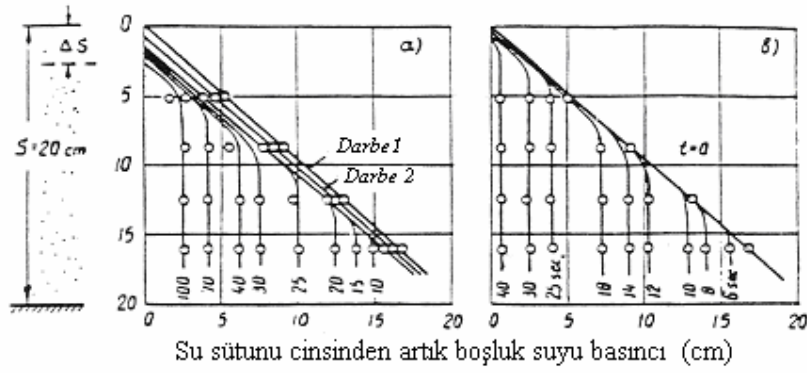
(b)

Şekil 2.17 Silt ara tabakalı kum tabakasında 1 boyutlu analizlerden elde edilen artık bsb oranı değerlerinin derinlikle değişimi (a) $k_{kum} = 10^{-4}$ m/s (b) $k_{kum} = 10^{-6}$ m/s (Tonaroglu, 2006)

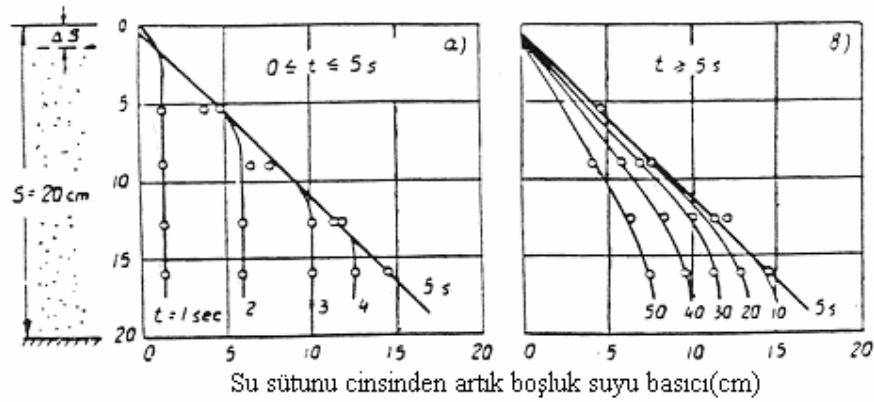
2.3 Sıvılaşma Sonrası Zemin Davranışı

Housner (1958), depremler sırasında meydana gelen boşluk suyu basıncı artışı nedeni ile kum konileri oluşumunu zeminin permeabilite, porozite ve elastisite gibi özellikleri ile konsolidasyon davranışına bağlı olarak açıklamıştır. Deprem sırasında sıvılaşan kumun, tıpkı uygulanan bir yük altında zeminin konsolide olmasına benzer şekilde konsolide olduğunu öne sürerek, problemi uniform bir kum tabakası için lineer konsolidasyon teorisini kullanarak çözmüş, zemin yüzeyine çıkan suyun miktarını ve hızını hesaplamıştır. Deprem sırasında kum kaynamasının meydana gelmesi için gerekli minimum hidrolik eğim değerinin ise zeminin su altındaki birim hacim ağırlığına eşit olduğu gösterilmiştir. Housner (1958) araştırmasında konsolidasyon teorisini esas aldığı için, önerdiği sonuç belli koşullar altında geçerli olmaktadır.

Florin ve Ivanov (1961), laboratuarda ve büyük ölçekli olarak da arazide deneyler gerçekleştirmişler ve sıvılaşma sonrası zemin davranışını konsolidasyon etkisini göz önünde bulundurarak değerlendirmişlerdir. Laboratuarda 20 cm yüksekliğinde bir uniform kum kolonu üzerinde özel bir darbe etkisi ile ve sarsma tablası kullanılarak deneyler gerçekleştirilmişlerdir. Darbe etkisi uygulanarak yapılan deneylerde sırasında farklı zamanlarda ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi Şekil 2.18’de verilmektedir. Artık boşluk suyu basıncı değerlerinden, sıvılaşma sonrasında zemin kolonunda konsolidasyon süreci olmaksızın sadece sedimentasyon sürecinin etkisi olduğu gözlenmektedir. Şekil 2.18’de 20 cm’lik kum kolonunda meydana gelen 1 cm oturmanın %5 ‘lik bir hacimsal şekil değiştirmeye karşılık geldiği gözlenmektedir. Meydana gelen oturmanın tahmini için 1- Boyutlu Terzaghi konsolidasyon teorisinden yararlanılması düşünülmüştür. Bunun için kum numunesinde etkiyen ortalama çevre basıncı yaklaşık olarak 0.13 psi, bu çevre basıncı ve 0.8 boşluk oranı için sıkışabilirlik katsayısı (a_v) 0.025 in²/lb olarak varsayıldığında, bu model yüksekliği için sıvılaşma sonrası ($r_u=1.0$) konsolidasyona bağlı hacimsal şekil değiştirmeler yaklaşık %0.018 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu konsolidasyon oturması gözlenen toplam deformasyona ($\epsilon_v=\%5$) göre oldukça ihmal edilebilir mertebede kalmaktadır. Bu da bazı araştırmacılar tarafından çeşitli doğrusal olmayan (nonlinear) konsolidasyon teorileri kullanımının nedeni olmaktadır. Şekil 2.19a’ da aynı zemin kolonunda titreşim etkisi ile farklı zamanlarda ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı dağılımlarının derinlikle değişimi, Şekil 2.19b’de ise oluşan sıvılaşma sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı sönümlenmesi görülmektedir. Titreşim deney boyunca, hem boşluk suyu basıncı oluşumu esnasında, hem de sönümlenmesi sırasında devam ettirilmiştir. Gözlemlenen hacimsal şekil değiştirmeler %5 mertebesinde iken, yukarıda da belirtildiği gibi bir boyutlu konsolidasyon teorisi kullanılarak hacimsal şekil değiştirmeler sadece %0.018 olarak tahmin edilmiştir. Her iki modelde de zemin kolonunda tümü ile sıvılaşma meydana geldiği halde, Şekil 2.19’da verilen eğriler darbe etkisi ile yapılan sıvılaşma deneylerinden elde edilen eğrilerden (Şekil 2.18) oldukça farklılık göstermektedir. Fakat, titreşim uygulanarak yapılan sıvılaşma deney sonuçlarının konsolidasyon safhasının varlığını iyi bir şekilde yansıtmayacağı sonucuna varılmıştır. Florin ve Ivanov(1961) uniform bir kum kolonundaki sıvılaşmanın düşey efektif gerilmenin düşük olduğu zemin yüzeyinden başlayarak aşağıya doğru ilerlediğini belirtmektedirler.

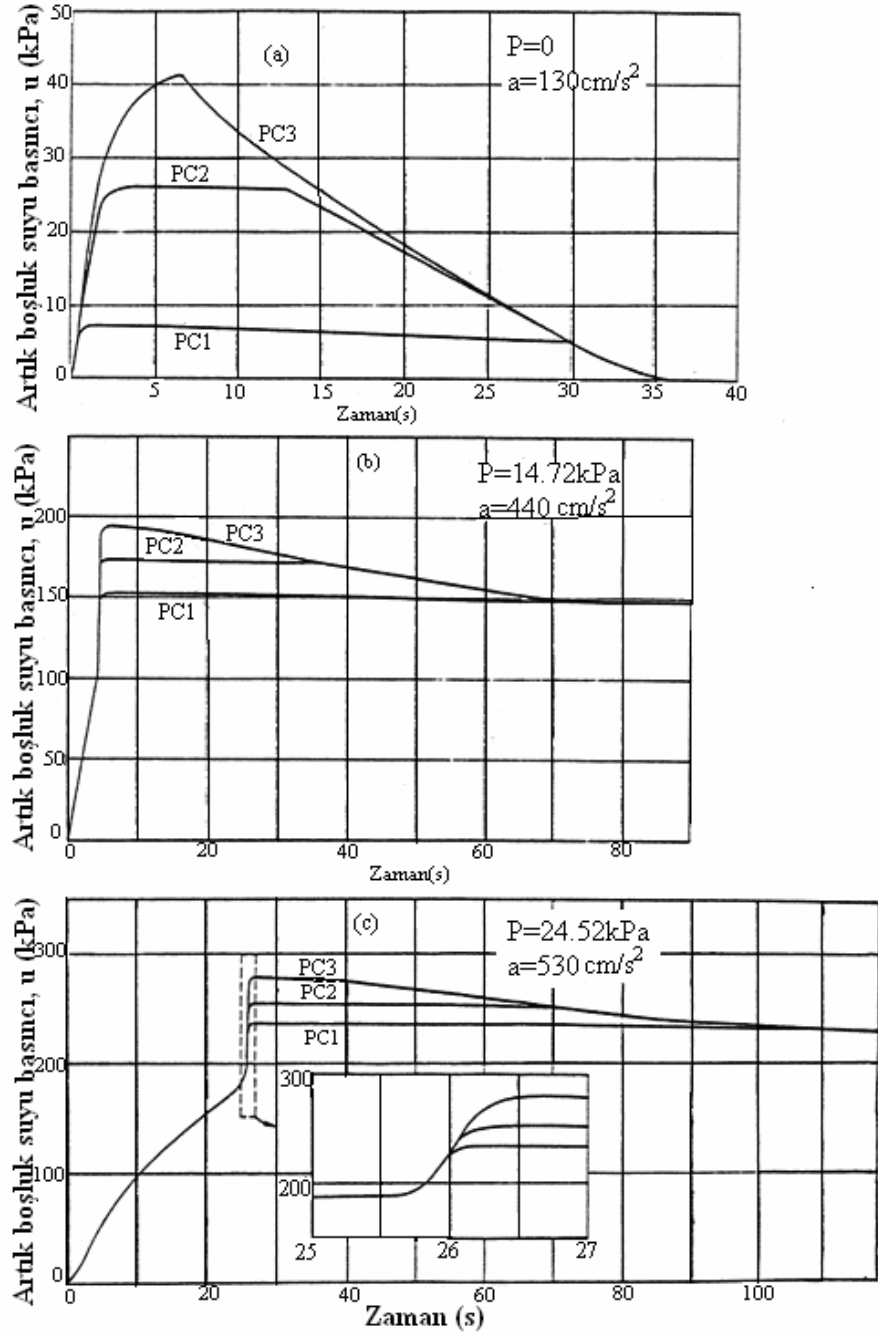


Şekil 2.18 Darbe etkisi uygulanarak yapılan deney sırasında farklı zamanlarda alınan artık boşluk suyu basınçlarının değişimi (Florin ve Ivanov(1961))



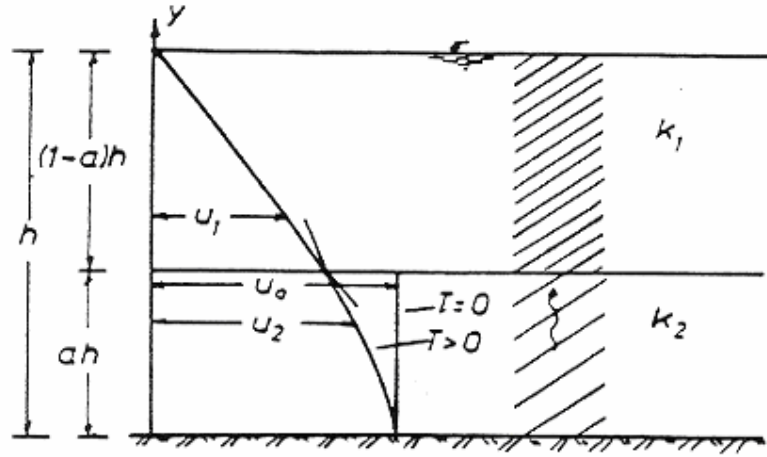
Şekil 2.19 Titreşim sonucu oluşan sıvılaşma sırasında farklı zamanlarda ölçülmüş artık boşluk suyu basıncı dağılımları(Florin ve Ivanov(1961))

Yoshimi(1967) tarafından yapılan çalışma 30.5 cm yüksekliğindeki kum tabakasının sıvılaşması üzerinde yapılan gözlemleri içermektedir. Bu çalışmada 30.5 cm yüksekliğindeki kum tabakasının üzerine lastik bir membran vasıtası ile düşey basınç uygulanmıştır. Uygulanan titreşim sırasında, kum tabakasında boşluk suyu basıncında önce yavaş bir artış ve hemen ardından ise ani bir artış ve sıvılaşma gözlemlenmiştir. Sıvılaşmadan sonra ise lastik membran altında kum tabakası yüksekliğinin %6' sına eşit bir kalınlıkta bir su kütlesi olduğu gözlenmiştir. Şekil 2.20'de uygulanan üç farklı düşey basınç altındaki kum kolonunda meydana gelen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Yoshimi(1967) bu çalışma sonucunda suya doymun bir kumun tamamı ile sıvılaşmasından sonra, kum tanelerinin aşağı doğru oturarak daha sıkı ve daha stabil bir hale geldiğini, bu sürecin artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme aşamasını içerdiğini ve Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisi ile ilişkilendirilebileceğini açıklamaktadır.



Şekil 2.20 Uygulanan üç farklı düşey basınç altında kum kolonunda meydana gelen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi (Yoshimi, 1967)

Ambraseys ve Sarma (1969) tarafından yapılan araştırmada basit bir model göz önüne alınarak tabakalı bir zemin ortamının sıvılaşma sırasındaki davranışı analiz edilmiştir. Çalışmada gevşek bir kum tabakasının sıvılaşmasının bu tabaka üzerinde yer alan sağlam bir zemin tabakası üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Göz önüne alınan zemin profili Şekil 2.21’de gösterildiği gibi ah ve $(1-a)h$ kalınlıklarında, suya doymun kohezyonsuz iki yatay tabakadan oluşmaktadır.



Şekil 2.21 Gevşek bir kum tabakasının sıvılaşmasının bu tabaka üzerinde yer alan sağlam bir zemin tabakası üzerindeki etkisi (Ambraseys ve Sarma, 1969)

Çalışmada aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

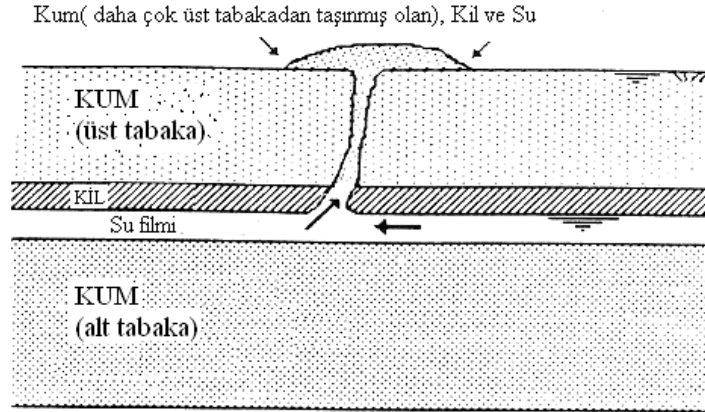
- i. Sıvılaşma altta yer alan tabakadaki efektif gerilmenin ani olarak düşmesinden kaynaklanacaktır.
- ii. Tabakalar değişmeyen ortak bir sınıra sahip olacaktır.
- iii. Akım ve gerilme sürekliliği olduğu varsayılacaktır.

Araştırmacılar, iki tabakadan oluşan bu sistemi klasik konsolidasyon teorisi kullanarak çözmüş ve düşük hidrolik eğimlerin tahmin edilmesinden dolayı kum kaynamasının ortaya çıkmayacağı sonucuna varmışlardır. Kum kaynamasının meydana gelişi ise, mekanizma hakkında tam bir açıklama verilmeyerek, üstteki tabakanın homojen olmayışı ile ilişkilendirilmiştir. Ambaraseys ve Sarma (1969) tarafından analiz edilen basit iki tabakalı sistemlerin sıvılaşma öncesinde ve sonrasındaki davranışları, Terzaghi ve Frohlich (1936), Gray (1944), Schiffman ve Gibson (1964), ve Yoshimi ve Kuwobana (1973) tarafından da benzer şekilde konsolidasyon teorisi göz önüne alınarak analiz edilmiştir.

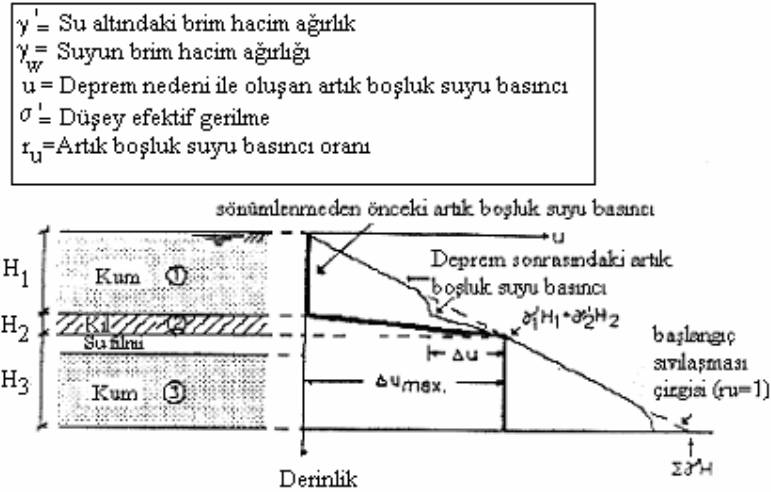
Scott ve Zuckerman (1972) tarafından yapılan deneysel ve analitik çalışmalarda kum kaynaması ve kumlu zeminlerin sıvılaşma sonrası davranışı üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu araştırmada analiz edilen zemin tabakalarının kalınlığı 10 cm'dir. Zemin iskeletinin rijit olduğu kabul edilerek, sıvılaşma sonrası sürecin sedimentasyondan oluştuğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, birden fazla tabakalı kum zemin sistemini de içine alan ve basit doğrusal

sedimentasyon teorisini esas alan farklı sıvılaşma sonrası modlar tarif etmişlerdir. İri daneli zeminler arasında yer alabilecek düşük geçirimliliğe sahip ince tabakaların sıvılaşma sırasında su ara tabakalarını oluşturma olasılığı gösterilmiştir. Kum kaynaması oluşum mekanizması da geniş bir şekilde tartışılmıştır. İnce bir kum tabakası (7.5 cm kalınlığında) üzerinde, silt ara tabakası varken ve yokken deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak ara silt tabakasının ya da ince daneli bir zeminin varlığının kum kaynamalarının oluşumunda etkili olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar ayrıca altta yer alan sıvılaşmış bir zemin nedeni ile daha önce sıvılaşmamış bir kum tabakasının sıvılaşabileceğini ve daha önce sıvılaşmaya yatkın olmayan bir kumun hemen altında yer alan sıvılaşmış bir tabakanın bulunması nedeni ile sıvılaşabileceğini gösteren sonuçlar sunmakta, bu sonuçların yol gösterici mahiyette ve niteliksel olduğunu belirtmektedirler.

Elgamal vd. (1989) tarafından yapılan çalışmada kil ara tabakalı kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışı, pleksiglas dikdörtgen kesitli bir kutu üzerinde uygulanan, küçük ölçekli sarsma tablası deneyleri ile incelenmiştir. Bu çalışmada düşük geçirgenliği olan ara tabakaların, sarsıntı sırasında üstte yer alan zemin tabakalarında oluşan boşluk suyu basınçları oluşumunu yavaşlattığı ve alttaki tabakalarda ise boşluk suyu basınçları oluşumunu hızlandırarak büyük yanal deformasyonlara neden olduğu görülmüştür. Ayrıca; düşük geçirgenliği olan ara tabakaların kum kaynaması olayını geciktirdiği de gözlemlenmiştir. Üniform kum tabakalarında yapılan deneylerde ise kum kaynaması olayına rastlanmadığı belirtilmiştir. Geçirimliliği düşük olan siltli kil tabakalarının altında ise kalınlığı alttaki kum tabakası kalınlığının %5'i kadar olan su filmi tabakalarının olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemlerde geçirimliliği düşük olan tabaka altında kum kaynamalarının ve oyulmaların meydana geldiği ve suyun hidrolik yükün düşük olduğu noktalara doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Düşük geçirimliliğe sahip silt veya kil ara tabakası altında meydana gelen su filminin ise uzun bir süre sönmelenemeceği (örneğin 2.20 cm'lik bir su filminin arazide sönmelenmesinin yaklaşık 30 gün alabileceği belirtilmektedir), ancak Şekil 2.22'de de gösterildiği gibi kil/silt tabakasının kırılması veya oyulması sonucu suyun yukarıya doğru kaçabileceği belirtilmiştir. Geçirimliliği düşük olan ara tabakada ise hidrolik eğimlerin (sıvılaşma sırasında) yüksek olduğu ve yüksek olan bu hidrolik eğimlerin büyük kum kaynamalarına yol açabileceği belirtilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.22 Geçirimliliği düşük olan kil tabakası altında meydana gelen su filmi (Elgamel vd.1989)



Kil tabakasındaki ortalama hidrolik eğim $= \Delta u / (\gamma_w H_2)$

Kil tabakasındaki maksimum hidrolik eğim $= \Delta u_{max} / (\gamma_w H_2)$

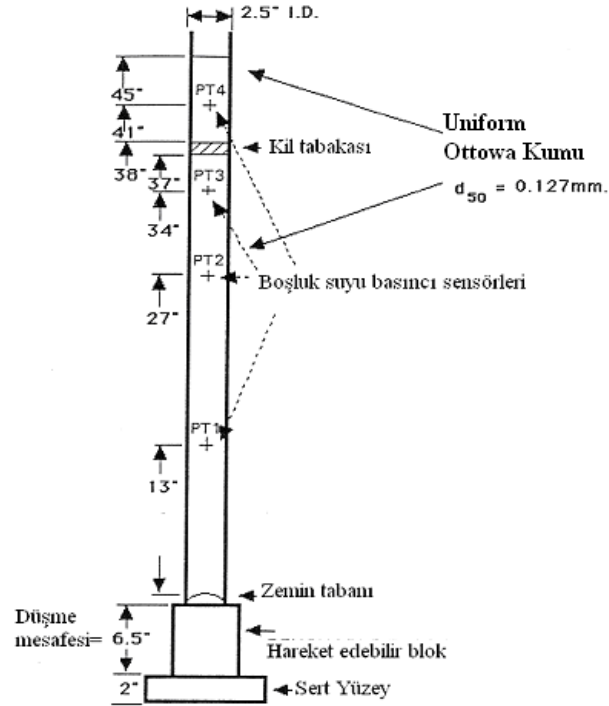
Örnek: ($\gamma'_1 = \gamma'_2 = \gamma_w$)

$$\Delta u_{max} = \gamma'_1 H_1 + \gamma'_2 H_2$$

H_1 (ft)	H_2 (ft)	Kil tabakasındaki maksimum hidrolik eğim
5	5	2
5	1	6
10	5	3
10	1	11

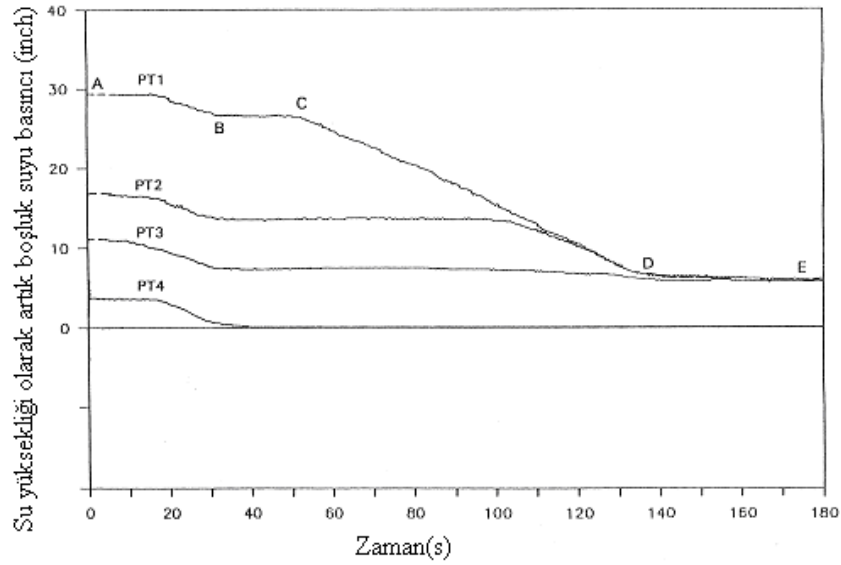
Şekil 2.23 Geçirimliliği düşük olan kil tabakasında yüksek hidrolik eğimlerin oluşumu (Elgamel vd.1989)

Adalier(1992) tarafından tabakalı zemin sistemlerindeki sıvılaşma ve sonrası davranışın belirlenmesi için, laboratuarda 1g ivme altında sarsma tablası deneyi ve 50g ivme altında santrifüj deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1g'de gerçekleştirilen deney düzeneği Şekil 2.24'de gösterilmiştir.



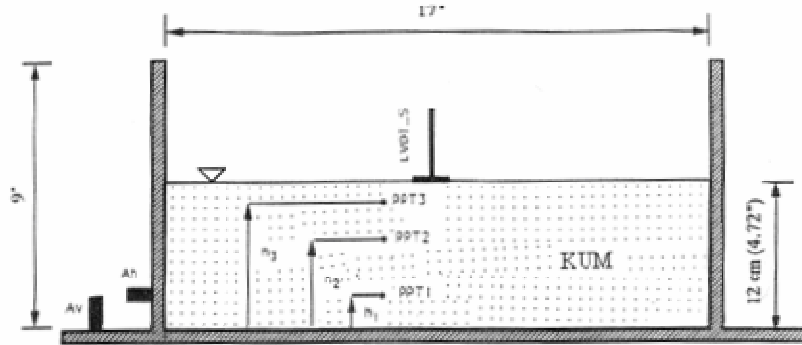
Şekil 2.24 Tabakalı zemin sistemlerindeki sıvılaşma ve sonrası davranışın belirlenmesi için kurulan deney düzeneği (Adaher, 1992)

Şekil 2.24’de gösterildiği gibi pleksiglas bir boru içerisinde, ince bir kil ara tabakası içeren uniform Ottawa kumunun yer aldığı bir tabakalı zemin sistemi oluşturulmuştur. Pleksiglas boru yaklaşık 16.5 cm mesafeden sert bir blok üzerine düşürülerek darbe etkisi ile kum tabakasının sıvılaşması sağlanmıştır. Sıvılaşmadan sonra alttaki kum tabakasının oturması ile birlikte kil tabakasının altında su ara tabakasının oluştuğu gözlemlenmiş ve alttaki tabakanın oturması bitene kadar su ara tabakasının kalınlığının arttığı görülmüştür. Kil tabakasının altındaki ve üstündeki kum tabakalarında yaklaşık %2.4 değerinde bir hacimsel şekil değiştirme oluştuğu belirlenmiştir. Altta yer alan kum tabakasının oturması sona erdiğinde, kil tabakası altında bu tabakanın oturma miktarına eşit miktarda bir maksimum su filmi kalınlığı ölçülmüştür. Şekil 2.25’de farklı seviyelerde yer alan boşluk suyu basıncı sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi gösterilmiştir. Ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimlerinden konsolidasyon etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni ise su filminin üst tabakadaki efektif gerilmelerin iletilmesini etkilemesi olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.25 Farklı seviyelerdeki boşluk suyu basıncı sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi (Adalier, 1992)

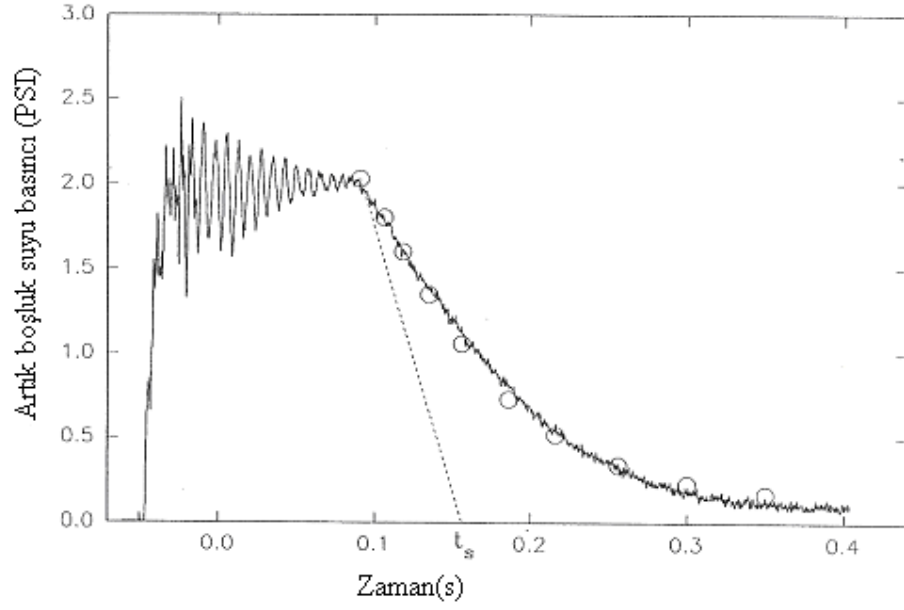
Adalier (1992) tarafından ayrıca ise sıvılaşma sonrası davranışın belirlenmesi için Şekil 2.26'da gösterilen deney düzeneği hazırlanarak santrifüj deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.26 Sıvılaşma sonrası davranışın belirlenmesi için santrifüj deney düzeneği (Adalier, 1992)

Araştırmacı sıvılaşma sonrasında boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi aşamasını Terzaghi'nin bir boyutlu konsolidasyon teorisini kullanarak modellemiştir. Bu modellemelerde permeabilite ve hacimsal sıkışma katsayısının efektif gerilme ile olan değişimi dikkate alınmayıp sabit olarak kabul edilmiştir. Şekil 2.27'de sıvılaşma sonrası artık boşluk suyu basınçları sönümlenmesinin bu yöntemle modellenmesinin ölçüm sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, sıvılaşma sonrası davranışın belirlenmesinde, hacimsal sıkışma katsayısı ve permeabilite katsayısının boşluk oranı ile laboratuvar deneyleri

ile belirlenmiş doğrusal olmayan değişimi dikkate alınarak yapılacak sınıvlaşma sonrası analizlerinin daha doğru sonuçlar vereceği belirtilmiştir.



Şekil 2.27 Deneysel olarak ölçülmüş artık boşluk suyu basınçları sönümlenmesinin 1B konsolidasyon teorisi kullanarak hesaplanmış değerler ile karşılaştırılması (Adalier,1992)

3. SUYA DOYGUN KUMLU ZEMİNLERİN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞI VE SIVILAŞMA

3.1 Giriş

Bir deprem sırasında, kayma dalgalarının zemin içerisinden yukarı yönlü hareket etmesi sonucunda değişen genlik ve frekanslarda tekrarlı kayma gerilmeleri ve kayma şekil değiştirmeleri oluşur. Bu durumda, eğer kohezyonsuz zemin suya doygun ise zemin boşluklarındaki suyun yer değiştirebilmesi için yeterli zaman olmadığından sismik kayma gerilmeleri altında zemin tabakalarında boşluk suyu basıncı artışı ve şekil değiştirmeler meydana gelir.

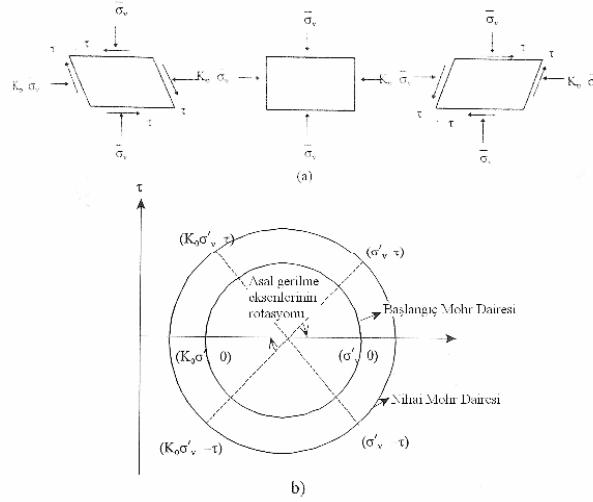
Zeminlerin dinamik davranış özellikleri zeminde oluşan deformasyonların mertebesi ile ilişkilidir. Elastik ve elasto-plastik davranış koşullarındaki şekil değiştirme seviyelerinde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özellikleri ön plana çıkmaktadır. Daha büyük şekil değiştirme seviyelerinde ise uygulanan yük altında zemindeki mukavemet kayıpları ve plastik şekil değiştirme özellikleri önem kazanmaktadır. Özellikle kumların ve siltlerin dinamik yükler altındaki davranışını belirleyebilmek için yapılacak teorik ve deneysel çalışmalarda gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin yanı sıra artan şekil değiştirme seviyesi ile birlikte mukavemet özelliklerindeki değişimin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tekrarlı yükler altında zemin tabakalarında meydana gelen gerilme durumunu ve davranış biçimini laboratuarda inceleyebilmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir (Ansal ve Erken, 1985). Laboratuarda yapılan drenajsız tekrarlı kesme deneyleri deprem yükleri altında suya doygun kohezyonsuz zeminlerin davranışının anlaşılması bakımından oldukça faydalı olmaktadır. Drenajsız tekrarlı kesme deneyleri ile sivilaşabilir zeminlerin davranışının açıklanması üzerine yapılmış olan oldukça önemli birçok araştırma bulunmaktadır. (Castro (1975), Poulos vd. (1985), Alarcon-Guzman vd. (1988), Ishiara (1993), Erken ve Ansal (1994)). Bu bölümde suya doygun kum zeminlerde meydana gelen sivilaşma olayının anlaşılmasında yardımcı olacak temel kavramlar açıklanmıştır.

3.2 Dinamik Yüklemeler Altında Suyu Doygun Kum Zeminlerin Davranışı

Dinamik yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin davranışının anlaşılması, gerçekleştirilecek deneysel ve nümerik çalışmalar için oldukça önemlidir. Şekil 3.1a' da arazi koşullarında tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumu ve Şekil 3.1b'de ise bu

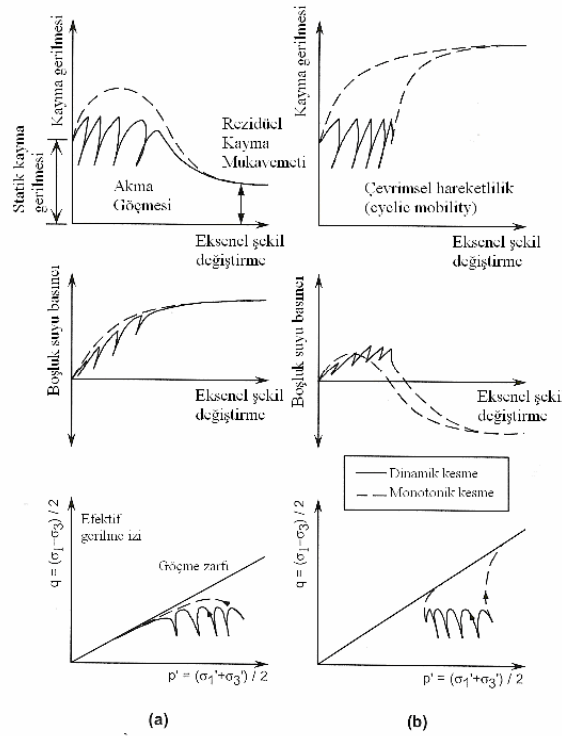
gerilme durumunu temsil eden Mohr daireleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Arazi koşullarında tekrarlı yükler altındaki zemin durumu(a) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumu (b) Tekrarlı yüklemeler etkisi altındaki bir zeminin gerilme durumunu gösteren Mohr daireleri (Teymur, 2002)

Deprem yüklemeleri nedeni ile oluşan kayma gerilmeleri altta bulunan daha sert tabakadan (kaya tabakasından) yukarıya doğru hareket ederek Şekil 3.1' de görüleceği gibi her bir zemin elemanındaki asal gerilme düzleminin yönünü değiştirmekte ve dalga yayılma yönüne dik ve paralel yönde kayma gerilmeleri etkimesine neden olmaktadır.

Suya doymun kum bir zeminin monotonik ve tekrarlı yükler altındaki davranışı Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Gevşek ve sıkı durumlardaki aynı zeminin drenajsız kesme deneyi sırasındaki davranış biçimleri sırası ile Şekil 3.2(a) ve (b)'de gösterilmektedir. Deneyler bir yamaçtaki anizotropik gerilme koşullarını temsil etmesi açısından başlangıç statik kayma gerilmesi ile başlamaktadır. Gevşek bir kum zemin kesme sırasında sıkışma eğilimi göstermek isteyecek ve drenajsız durumda boşluk suyu basınçları artacaktır. Şekil 3.2a' da gösterildiği gibi sıkışma eğilimi gösteren zemin monotonik olarak kesildiğinde pik kayma mukavemetine ulaşmakta ve sonrasında ise yumuşama göstererek rezidüel kayma direncine ulaşmaktadır. Eğer rezidüel kayma direnci başlangıçtaki statik kayma direncinden daha az ise bu durumda akma sıvılaşması olarak isimlendirilen bir göçme meydana gelmektedir. Eğer aynı zemin tekrarlı olarak kesilirse, bu durumda ise her bir yükleme çevriminde artık boşluk suyu basınçları oluşmakta ve drenaj olmadığı için boşluk suyu basınçları birikerek efektif gerilme izi göçmeye doğru hareket etmektedir (Şekil 3.2a).



Şekil 3.2 Drenajsız kesme sırasında suya doymuş kumların davranışı (a) Gevşek kumlar b) Sıkı kumlar

Eğer kayma gerilmeleri başlangıç statik kayma gerilmelerinin altına düşer ise akma sıvılaşması meydana gelir ve tekrarlı yüklemelerin bitiminden sonra bile deformasyonlar devam eder. Akma sıvılaşmasının oluşabilmesi için gevşek suya doymuş kum zemin yeterli büyüklükteki drenajsız bir yüklemeye ya da yeterli sayıda yük çevrimlerine maruz kalmalıdır. Bu koşullarda denge koşulları oluşuncaya kadar zeminde oldukça büyük deformasyonlar meydana gelir.

Genleşme eğilimi gösteren sıkı kum zeminler kesmeye maruz kaldıklarında küçük şekil değiştirmelerde artık boşluk suyu basıncı üretebilmektedir. Fakat, büyük şekil değiştirmelerde zemin daneleri birbirleri üzerinden kayıp hareket ederek hacimde bir artışa (genleşmeye) neden olmakta, bu durumda boşluk suyu basınçları azalarak negatif değerler almaktadır. Sonuç olarak Şekil 3.2b' de gösterildiği gibi monotonik olarak kesilen sıkı bir kum zeminde efektif gerilmelerde ve kayma direncinde artış meydana gelmektedir. Şekil 3.2b' de aynı zeminin dinamik yüklemeler altındaki davranışı da gösterilmektedir. Bu durumda her bir kesme çevriminde boşluk suyu basıncı birikimleri ve deformasyonlar oluşmaktadır. Fakat belli bir noktadan sonra zeminin genleşme eğilimi göstermesi sonucu oluşan negatif artık boşluk suyu basınçları daha fazla deformasyon oluşumunu sınırlar ve efektif gerilme izi sola doğru hareket eder, fakat hiçbir şekilde göçme yüzeyine ulaşmaz. Tekrarlı yüklemeler bittikten sonra uygulanacak monotonik kesme deneyinde zeminin mukavemet kazandığı

gözlemlenecektir. Dikkate değer miktarda deformasyonlar oluşsa da, akma sıvılaşmasında meydana gelebilecek büyük deformasyonlar sıkı kum zeminlerde meydana gelmez ve bu durum ise çevrimsel hareketlilik (cyclic mobility) olarak isimlendirilir. Dolayısı ile drenajsız koşullarda rezidüel ya da nihai kayma direnci başlangıç statik kayma direncinden büyük olduğu için sıkı kumlarda akma sıvılaşması meydana gelmez.

Zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışının araştırılmasında hem arazide hem de laboratuvar deneylerinden yararlanılmaktadır. Laboratuvarda gerçekleştirilen deneylerde tabiattaki gerilme ve şekil değiştirme koşulları yaklaşık olarak sağlanabilmektedir. Fakat araziden alınan numunelerde az da olsa meydana gelen örselenme veya yeniden oluşturulan numunelerdeki fiziksel özellik farklılıkları zemin numunesinin davranış biçimini etkilemektedir. Bu nedenle laboratuvar deneylerinden elde edilen bulguların arazi deneyleriyle desteklenmesi çok kullanılan bir yaklaşım yöntemidir (Ansal ve Erken 1985).

Arazi ve laboratuvarda yapılan deneysel çalışmalarla zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme özellikleri (birim deformasyona bağlı olarak kayma mukavemeti, dinamik kayma modülü ve elastisite modülü, poisson oranı, sönüm oranı) ile kayma mukavemeti ve sıvılaşma parametreleri belirlenmeye çalışılır. Dinamik kayma modülünün ve sönüm oranının birim kayma şekil değiştirmesine bağlı olarak değişimleri belirlenir. Mukavemet özellikleri olarak ise göçmeye ya da büyük şekil değiştirmelerine neden olan kayma gerilmesi değeri ve çevrim sayısı belirlenir.

Zeminlerin dinamik davranış özelliklerine etki eden bir çok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler birim kayma şekil değiştirme genliği γ , ortalama efektif çevre gerilmesi σ_m , boşluk oranı e , yükleme çevrim sayısı N , suya doygunluk derecesi S , aşırı konsolidasyon oranı AKO, yükleme frekansı, dane çapı dağılımı, ince dane oranı, plastisite, kullanılan deneysel yöntem, yükleme biçimi ve yüklemenin doğrultusu olarak sıralanabilir (Altun, 2003).

Genel olarak zeminler elasto-plastik davranış gösteren anizotrop malzemeler olarak tanımlanmakla birlikte, zeminlerin farklı şekil değiştirme seviyelerinde farklı gerilme-şekil değiştirme davranışı gösterdiği bilinmektedir. Özellikle suya doygun gevşek kum zeminlerin depremler gibi tekrarlı yüklemeler altında diğer zeminlere göre farklı bir davranış sergilediği bilinmektedir. Tekrarlı yüklemeler etkisindeki suya doygun bir kum zemin sıkışma eğilimi gösterirken, içerisinde bulunan suyun dışarıya çıkmaması nedeni ile rijtliğinde bir azalma ve mukavemet özelliklerinde değişim meydana gelmektedir.

Suya doygun kumların drenajsız koşullarda tekrarlı ve hızlı monotonik yüklemeler altındaki

dinamik davranış özelliklerini belirlemek amacı ile son yıllarda bir çok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalar sonucunda kumların dinamik gerilme-şekil değiştirme ve mukavemet özelliklerinin farklı gerilme seviyeleri dikkate alınarak incelenmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

3.3 Zeminlerin Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri

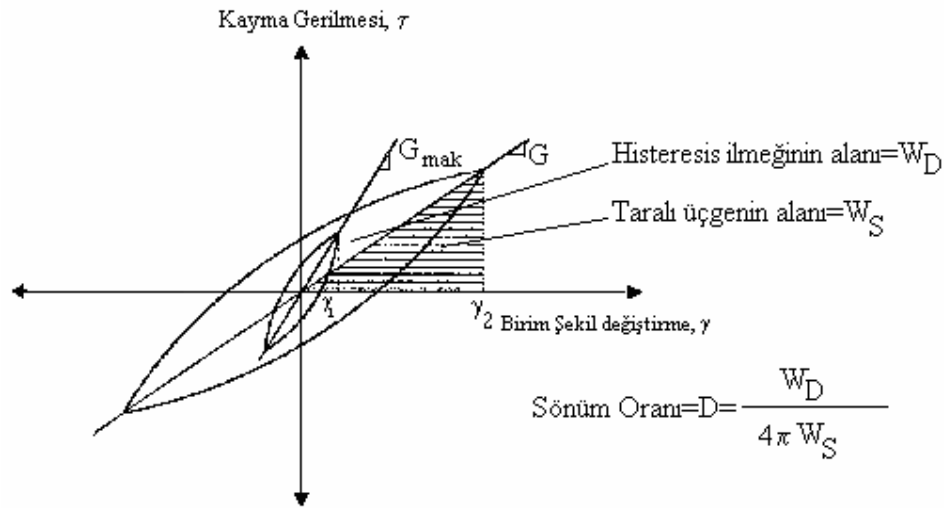
Zeminlerin dinamik davranışının şekil değiştirme aralığına göre farklılık gösterdiği ve dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesinde ve bunların analizinde olası şekil değiştirme seviyesinin belirleyici bir rol oynadığı bilinmektedir. Şekil değiştirme seviyelerine göre zemin davranışında beklenen özellikler Şekil 3.3’de özetlenmiştir.

Zeminlerin gerek monotonik gerekse dinamik yükler altındaki davranış biçimlerini gerçeğe en yakın biçimde tanımlamak için farklı bünye modelleri kullanılmaktadır. Dinamik yükler altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini ve deformasyon özelliklerini modelleyebilen bünye modelleri Şekil 3.3’den de görüleceği gibi şekil değiştirme seviyesi dikkate alınarak seçilmelidir. Ayrıca zeminlerde şekil değiştirmelerin doğrusal olmaması ve zamana bağlı oluşu da bünye modellerinin uygunluğunu etkilemektedir. Dolayısı ile zaman faktörünün de dikkate alındığı modeller ve zemin özellikleri büyük şekil değiştirme seviyelerinde geçerli olan plastik model teorileri kullanılmaktadır (Puzrin ve Burland, 1998; Puzrin ve Shiran, 2000; Wang ve Kuwano, 1999).

Kayma şekil değiştirmesi	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Küçük şekil değiştirme	Orta seviyede şekil değiştirme	Büyük şekil değiştirme	Göçme şekil değiştirmesi		
Elastik						
Elasto-plastik						
Göçme						
Yük tekrarının etkisi						
Yüklene hızının etkisi						
Model	Doğrusal elastik model		Visko-elastik model		Yükleme tarihçesi iz modeli	
Davranış Analizi Metodu	Doğrusal davranış analizi		Eş değer doğrusal model		Adımsal integrasyon modeli	

Şekil 3.3 Şekil değiştirme seviyesine bağlı zemin davranışı modellemesi (Ishihara, 1996)

Şekil değiştirmelerin küçük seviyelerde olması durumunda gerilme-şekil değiştirme davranışının analizinde “lineer elastik modeller” kullanılabilir. Bu şekil değiştirme seviyesinde zemin davranışının modellenmesinde “dinamik kayma modülü” anahtar bir parametre olmaktadır (Ishiara, 1996). Şekil değiştirmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını ifade edebilmek için teorik olarak yaklaşık 10^{-5} ’den küçük olması gerektiği kabul edilmektedir. Bu şekil değiştirme seviyelerinde ve elastik sınırlar içerisinde dinamik kayma modülünün maksimum değerinde ve sabit olduğu kabul edilebilir. Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeretik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile dinamik kayma modülü ve sönüm oranı Şekil 3.4’ te gösterilmiştir.



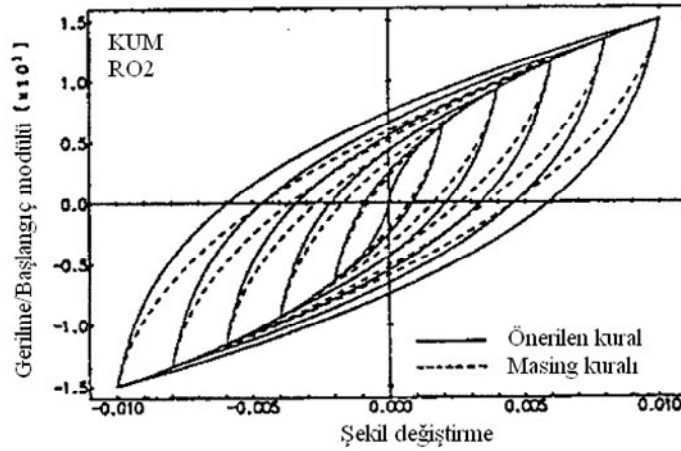
Şekil 3.4 Farklı şekil değiştirme genliklerindeki histeretik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve maksimum dinamik kayma modülü ve sönüm oranı

Şekil değiştirme seviyesinin yaklaşık olarak 10^{-3} civarında olması durumunda zeminin davranışları elasto-plastik bir hal alır ve dinamik kayma modülü şekil değiştirmeler arttıkça azalır. Aynı zamanda bu şekil değiştirme seviyelerinde dinamik yüklemelerle birlikte enerji sönümlenmesi de başlar ve zeminin bu özelliği sönüm oranı ile ifade edilir. Zeminlerdeki enerji sönümlenmesi histeretik biçimdedir. Zeminlerin kararlı olan bu davranışlarını en uygun şekilde modelleyebilmek için visko-elastik teorilere dayanan bünye modellerini kullanmak gerekmektedir. Bu şekil değiştirme seviyelerinde zemin özelliklerini temsil edebilmek için dinamik kayma modülü ve sönüm oranı şekil değiştirmenin bir fonksiyonu olarak belirlenmelidir. Şekil değiştirmelere bağlı fakat çevrimden bağımsız zemin özelliklerini barındıran analitik yöntem ise visko-elastik teoriye dayanan eşdeğer lineer analiz yöntemidir. Bu yöntemde zemin parametreleri adımsal olarak değiştirilerek şekil değiştirme uyumlu bir çözüm elde edilene kadar doğrusal bir analiz tekrarlanır. Yatay zemin tabakalarının tepki analizi için kullanılan SHAKE (Schnabel vd., 1972) bu mertebelerdeki şekil değiştirme

aralıklarında zemin davranışı hakkında bilgi almak için yaygın olarak kullanılan bir programdır. Lineer viskoelastik model çalışmalarında zeminin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, enerji sönümlmeleri dikkate alınarak ve Kelvin ve Maxwell gibi bazı yay- sönüm modelleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Lineer olmayan ve çevrimden bağımsız model çalışmalarında ise yine enerji sönümlmeleri de dikkate alınarak doğrusal olmayan deformasyonların dikkate alındığı Hiperbolik ve Ramberg-Osgood gibi gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmakta ve böylelikle dinamik kayma modülü ve sönüm oranı elde edilebilmektedir.

Kayma şekil değiştirmelerinin 10^{-2} den büyük olması durumunda zemin özellikleri şekil değiştirmeler arttıkça değişmeye ve kalıcı şekil değiştirmeler oluşmaya başlar. Bu şekil değiştirme seviyesinden sonra dinamik kayma modülü ve sönüm oranı yükleme çevrimleri ile değişmeye devam eder. Bu durumda zemin davranışı azalan histerisis türü olarak isimlendirilir. Dinamik kayma modülü ve sönüm oranının tekrarlı yüklerle birlikte değişimi efektif gerilmede meydana gelen değişimler dikkate alınarak hesaplanır. Efektif gerilmedeki değişimin dikkate alınması için yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme adımlarını temsil eden gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin tanımlandığı bünye denklemleri gerekmektedir. Bu amaç için en çok kullanılan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi Masing kuralı olarak bilinmektedir. Göçmeye yakın büyük şekil değiştirme mertebelerindeki zemin davranışının Masing kuralı gibi bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak modellenmesinde ise Şekil 3.3’de de gösterildiği gibi adımsal integrasyon içeren nümerik modeller kullanılmaktadır (Ishihara, 1996). Bu modeller arasında depremler sırasında kumların sıvılaşmasını nümerik olarak modelleyebilmek için Towhata ve Ishihara (1985) tarafından geliştirilen “çok yönlü elastik yay modeli” de yer almaktadır. Bu modelde sıvılaşma sırasındaki zemin davranışı asal gerilme eksenlerinin rotasyonu ve zemin karakteristiklerine bağlı yay karakteristikleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu model daha sonra Iai vd. (1992) tarafından belirli bir gerilme durumunda kayma gerilemeleri birikmesine bağlı boşluk suyu basıncı oluşumuna dayalı model ile birleştirilmiştir. Bu modelin geçerliliği farklı yükleme şekillerinde yapılmış burulmalı üç eksenli deneyler ile incelenmiştir. Deneyler sırasında uygulanan yükleme şekilleri ise asal gerilme eksen rotasyonu da göz önüne alınarak uygulanan yarı dairesel yükleme ve dairesel yükleme şekilleridir. Bu yükleme şekillerin her ikisinde de asal gerilme eksen döngüsü dikkate alınmıştır. Nümerik modelden elde edilen sonuçlar ile burulmalı üç eksenli deney sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Dolayısı ile gerilme durumu ve birikmiş kayma gerilmesi bilindiğinde boşluk suyu basıncının bir fonksiyonu olan efektif gerilme de belirlenebilmektedir.

Ishiara vd. (1985) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise dinamik yükleme koşulları altında zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tarif eden yeni bir kural önerilmektedir. Bunun nedeni ise gerilme-şekil değiştirme davranışında çok sık kullanılan Masing kuralı'nın kayma şekil değiştirmesinin geniş aralıklarında zemin karakteristiklerini doğru bir şekilde temsil edememesidir. Masing kuralı, nonlinear analizlerde histeresis ilmeğini elde edebilmek için kullanılmakta ve bir bünye denklemi ile tanımlanan zemin omurga eğrisinin boşaltma ve yeniden yükleme sırasında izleyeceği yolu belirlemektedir. Önerilen yeni kural ise deneysel verilere uygun olarak zemin omurga eğrisinin kullanılmasını sağlamakta ve dolayısı ile Masing kuralı'ndan türetilenden farklı bir histeresis ilmeği elde edilmektedir (Şekil 3.5). Elde edilen sonuçlar önerilen kuralın kumların dinamik yükleme sırasındaki gerilme-şekil değiştirme davranışını daha iyi modelleyebilen bir zemin omurga eğrisi ve histeresis ilmeği verdiğini göstermiştir.



Şekil 3.5 Masing kuralı'ndan ve Önerilen kuraldan elde edilen histeresis ilmeklerinin karşılaştırılması (Ishiara, 1985)

Zeminlerin dinamik yüklemeler altında davranışlarını tanımlamak için kullanılan bünye modellerinin temel özellikleri Bölüm 4'de ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

Yukarıda açıklanan zemin davranışını modelleme çalışmaları ile birlikte, zeminlerin gerilme-şekil değiştirme özelliklerini belirlemek için laboratuvarda bozulmamış veya yeniden oluşturulmuş numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar da sürdürülmektedir. Laboratuvar deneyleri gerilme veya şekil değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilebilmekte, yükleme çevrim sayısında artışla birlikte boşluk suyu basıncı artışları Bu deneylerde çevrim sayısındaki artışla beraber boşluk suyu basıncında artış meydana gelmekte ve zeminin mukavemeti azalmaktadır. Zeminlerin dinamik yükler altında gerilme-şekil değiştirme

özelliklerini temsil eden dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ve bunları artan şekil değiştirme seviyesine bağlı olarak değişimi her bir çevrimdeki histeresis eğrilerinden faydalanılarak belirlenebilmektedir.

Seed ve Idriss (1970), Kovacs vd. (1971), Hardin ve Drenevich (1972a, 1972b) tarafından kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde dinamik kayma modülü ve sönüm oranı ilişkisi birim kayma deformasyonuna bağlı olarak incelenmiştir. Bu araştırmalarda kum zeminlerin dinamik kayma modülüne etki eden en önemli faktörlerin çevre gerilmesi, birim şekil değiştirme genliği ve boşluk oranı olduğu belirlenmiştir. Sönüm oranının ise daha çok kum zemine uygulanan şekil değiştirme seviyesi ve efektif çevre gerilmesinden etkilendiği belirtilmektedir.

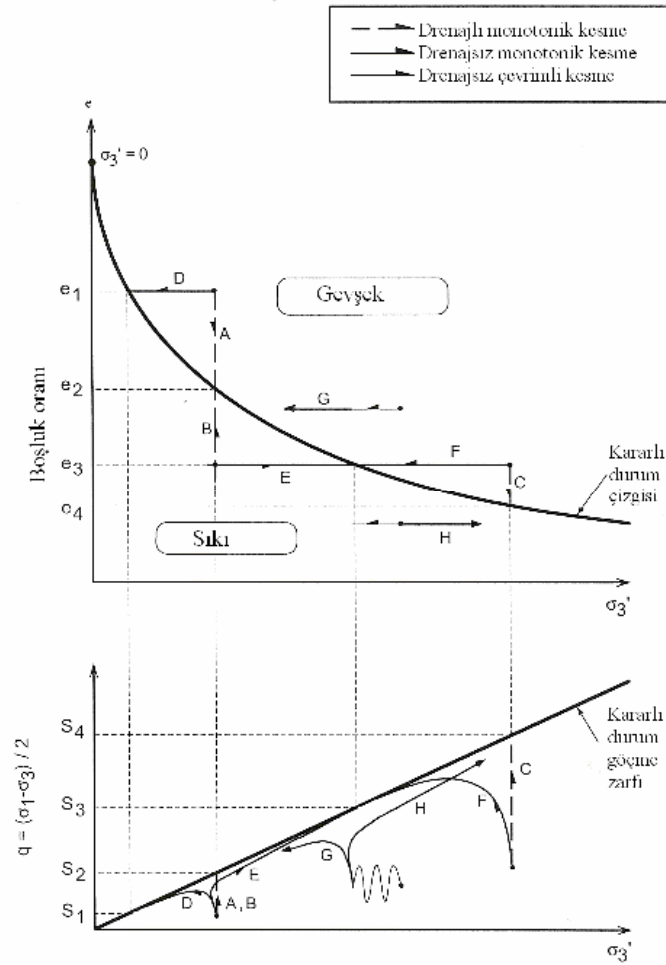
Tekrarlı yükler altında kum zeminlerin dinamik kayma modülünün belirlenmesi ile ilgili olarak ilk deneysel çalışmalar Hardin ve Richard (1963) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı hücre basınçları altında değişik boşluk oranlarında hazırlanmış örnekler üzerinde yapılan deneyler ile kayma modülündeki değişim araştırılmıştır. Daha sonra yapılan üç eksenli deneylerle çevre gerilmesinin kumlarda dinamik kayma modülü ve sönüm oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. (Sherif vd., (1977), Tatsuoka ve Iwasaki (1978), Iwasaki vd., (1978), Kokusho (1980)). Deneysel tekniklerde olan ilerlemelerle birlikte dinamik üç eksenli, dinamik burulmalı kesme ve rezonant kolon deneyleri ile kumların gerilme-şekil değiştirme özelliklerini ve bu özellikleri etkileyen zemin ve yükleme koşullarını belirlemek amacı ile Ansal (1981), Tatsuoka vd., (1982), Seed vd.,(1986), Alarkon-Guzman vd. (1986), Alarkon-Guzman vd., (1988), Kokusho (1987), Vucetic ve Dobry (1991), Ampadu ve Tatsuoka (1993), Lo Presti vd. (1993), Yasuada ve Matsumoto (1993), Vucetic (1994), Lnzo vd.(1997), Chen vd.,(1988), Ishibashi ve Zhang (1993), Ishibashi vd. (1988), Lin vd., (1996), Rollins vd. (1998), Ansal vd. (2001), Altun (2003) tarafından kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.4 Kumlarda Kritik Durum (Kararlı durum) ve Sıvılaşma

Büyük şekil değiştirmelerde zemin davranışı üzerinde yapılan gözlemler sonucunda Castro ve Poulos (1977), Poulos (1981) ve Poulos vd.(1985) tarafından kararlı durum kavramı tanımlanmıştır. Eğer bir zeminde deformasyonlar, sabit bir efektif normal gerilme ve kayma gerilmesi altında, sabit hacimde ve şekil değiştirme hızında meydana geliyorsa, bu zemin kararlı durumdadır. Bir zemin ancak deformasyonlar meydana geldiği sürece kararlı durumdadır. Diğer bir deyişle deformasyonlar durduğunda zemin artık kararlı durumda

değildir. Zemin kararlı duruma drenajlı, drenajsız, monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında ulaşabilir.

Bir zemin için kararlı durumda mümkün olan durumlar üç boyutlu boşluk oranı, efektif gerilme ve kayma gerilmesi uzayında tekil bir eğri oluşturmaktadır. Bu eğri kararlı durum çizgisi ya da kritik durum çizgisi olarak isimlendirilir ve iki boyutlu olarak Şekil 3.6' daki gibi de gösterilebilir. Başlangıç boşluk oranı ve efektif normal gerilmesi durumu belli olan bir zeminin hacimsel değişim davranışının anlaşılması bakımından Şekil 3.6 oldukça faydalı olmaktadır. Kararlı durum çizgisinin üzerinde yer alan zeminlerde kesme sırasında drenaja izin verilmediğinde boşluk suyu basınçlarında artış meydana gelecek ve zemin hacimce sıkışmak isteyecektir. Diğer taraftan kritik durum çizgisinin altında yer alan zeminler ise kesme sırasında drenaja izin verilmediğinde hacimce genleşme eğilimi gösterecek ve boşluk suyu basınçları azalacaktır.



Şekil 3.6 Monotonik ve tekrarlı gerilme izlerinin kararlı durum diyagramında gösterimi

Şekil 3.6’da üç farklı başlangıç koşulundaki zemin numuneleri üzerinde yapılmış 6 monotonik kesme deneyi sonucu gösterilmiştir. Aynı çevre gerilmesi etkisi altında fakat iki farklı sıklıktaki iki kum numunesi (A ve B) üzerinde yapılan drenajlı kesme deneylerinde, her iki numunenin aynı noktada ve aynı nihai kayma mukavemetinde (s_2) kararlı durum çizgisine ulaştığı görülmektedir. Diğer taraftan aynı boşluk oranına sahip fakat daha büyük bir çevre gerilmesi altındaki numunenin (C) drenajlı kesme deneyi sonucunda daha büyük bir kayma mukavemetinde (s_4) kritik durum çizgisine ulaştığı görülmektedir. Bu durumda A ve C numuneleri sıkışma gösterirken, B numunesi ise genleşme göstermiştir. Drenajsız monotonik deneylerde (D-F) ise numunelerin kritik durum çizgisine boşluk oranı sabit olacak şekilde bir yol izleyerek ulaştığı görülmektedir. Şekil 3.6’da da görüleceği gibi, aynı boşluk oranına sahip iki drenajsız deneyde, numuneler (E ve F) kritik durum çizgisinde aynı kayma mukavemetine (s_3) sahip olurken, boşluk oranı daha yüksek olan numune kararlı durumda daha düşük bir kayma mukavemetine (s_1) sahip olmaktadır. Drenajsız durumda, sıkışan numunelerde (D ve F) boşluk suyu basıncı artışları ve dolayısıyla efektif gerilmede azalma gözlemlenirken, diğer taraftan genleşme gösteren diğer numunede (E) artık boşluk suyu basınçlarında azalma meydana gelmektedir.

Drenajsız tekrarlı yüklemeler altında yapılan deneyler de (G,H) Şekil 3.6 ‘da verilen kritik durum diyagramında gösterilebilir. Daha önceden de açıklandığı gibi tekrarlı kayma gerilmeleri artık boşluk suyu basıncı oluşturarak sıkışma eğilimi gösteren kumlarda efektif gerilemelerde azalmaya, genleşme eğilimi gösteren zeminlerde artışa neden olur. Bu yüzden genleşme gösteren numune(H) kritik durum çizgisinden uzaklaşırken, sıkışma eğilimi gösteren numune (G) ise kritik durum çizgisine ulaşmaya çalışır. Çevrimsel yükleme yapılan bir monotonik yüklemelerde ise hem genleşme eğilimindeki numune hem de sıkışma eğilimindeki numune kararlı durum çizgisine doğru bir iz izler.

Bu nedenle kararlı durum çizgisi boşluk oranı, efektif gerilme ve kayma gerilmesi kombinasyonlarında genleşme eğilimindeki ve sıkışma eğilimindeki zeminleri birbirinden ayırmada oldukça faydalı olmaktadır. Kararlı durum çizgisinin üzerinde yer alan bir kum (büyük boşluk oranında veya büyük çevre gerilmesinde) sıkışma eğilimi gösterecek ve dinamik bir yüklemeye maruz kaldığında sıvılaşacaktır. Sıkışma eğilimindeki bir zemin hem dinamik yüklemeler altında hem de monotonik yüklemeler altında kararlı durum koşullarında aynı kayma direncini gösterecektir. Sıkı yerleşimli ya da düşük çevre gerilmesindeki bir kum ise kararlı durum çizgisinin altında yer alır ve akma göçmelerinin meydana geldiği sıvılaşmaya maruz kalmaz. Bu da genleşme eğilimindeki kumda kararlı durum koşullarına

ulaşmadan sınırlı kayma deformasyonlarının meydana geleceği anlamına gelmektedir.

3.5 Kumlu Zeminlerin Sıkışabilirliği ve Sıvılaşmaya Bağlı Oturmalar

Dinamik etkilerin gevşek kohezyonsuz zeminlerde sıkışmaya yol ağtığı bilinmektedir. Dolayısıyla, depremlerin kohezyonsuz zemin tabakalarının sıkışmasına ve zemin yüzünün oturmasına neden olması beklenilebilir. Biręok deprem sırasında, örneğin 1964 Alaska depreminde kum tabakalarının sıkışması sonucu ortaya çıkan zemin yüzü oturmaları yer yer 1.5m'i bulmuştur. 1960 şili ve 1964 Nigata depremlerinde de yine 1m'i bulan oturmalar gözlenmiştir (Özaydın, 1982).

Depremler sırasında gözlenen zemin oturmaları, bir çok durumda, suya doygun tabakalarda titreşimli yükler altında meydana gelen artık boşluk suyu basınçlarının deprem sonrası sönümlenmesi sonucu ortaya çıkan konsolidasyon oturmaları şeklinde oluşmaktadır. Suya doygun olmayan zemin tabakalarında ise, boşluklar su ile dolu olmadığı için, oturmalar danelerin sabit düşey efektif gerilme altında birbirine yaklaşması ve daha sıkı bir yerleşime gelmesi (kompaksiyonu) sonucu meydana gelmektedir. Depremler sırasında konsolidasyon ve kompaksiyon sonucunda meydana gelecek, zemin oturmalarının önceden hesaplanabilmesi için bazı hesap yöntemleri geliştirilmiştir. Yapılan araştırmalar, düşey titreşimlerin önemli miktarda oturmaya yol açabilmesi için depremin düşey bileşeninin $1g$ 'den daha büyük olması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle, oturmaların daha çok yer sarsıntılarının yatay bileşenlerinin yol açtığı tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu meydana geldiği söylenebilir. Laboratuvar tekrarlı basit kesme deneyleri sonuçları da oturma miktarının düşey gerilme, yükleme frekansı ve zeminin kuru veya suya doygun-drenajlı olmasından bağımsız, fakat tekrarlı birim kayma genliği ile doğrudan ilgili olduğunu göstermiştir (Özaydın, 1982).

Konsolidasyona bağlı hacimsel şekil değiştirmeler ve boşluk suyu basıncı sönümlenmeleri zeminin sıkışabilirliğine bağlı olduğundan granüler zeminlerin sıkışabilirlik karakteristiklerini incelemek gerekmektedir. Genel olarak kumlu zeminlerin sıkışabilirliği ile ilgili olarak az bilgi mevcuttur. Bazı alışmalarda Lee ve Albesia (1974), Seed vd., (1976) toplam hacimsel şekil değiştirmeleri, özellikle r_u (artık boluk suyu basıncı oranı) 1 değerine ulaştığında, konsolidasyon ve sedimentasyondan kaynaklanan bir prosedür olarak tanımlamak için kullanılmıştır. Fakat, ölçülen hacimsel şekil değiştirmelere konsolidasyonun yalnız başına etkisini bu yöntemle elde etmek mümkün olmamaktadır.

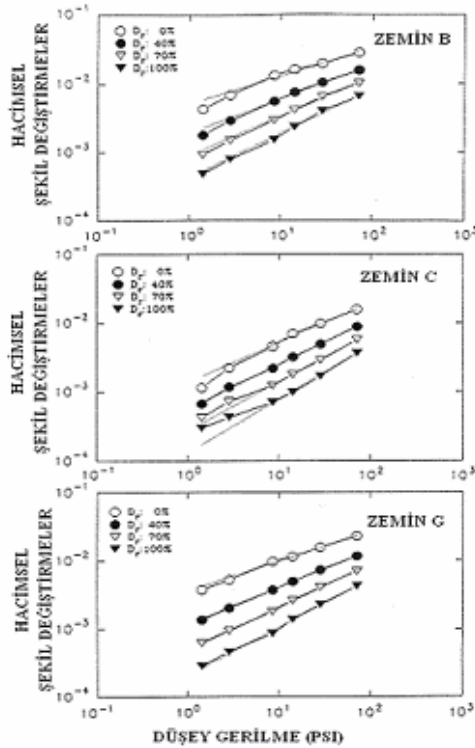
Hassib (1951) 5 farklı kuru kum, bir çakıl-kum karışımı ve bir kuru siltten oluşan 7 farklı

zeminden hazırlanan numuneler üzerinde 400 adet bir boyutlu konsolidasyon deneyleri gerçekleştirmiştir (Çizelge 3.1). Kuru granüler zemin numunelerinin sıkışabilirliği ile su altındaki numunelerin sıkışabilirliğinin ile benzer olduğunu göstermiştir.

Çizelge 3.1 Hassib (1951) tarafından çalışılan zeminlerin özellikleri

Zemin No	TANIMLAMA	ELEK YÜZDE GEÇEN						
		Elek No						
		8	15	30	50	100	200	.02
A	İri Silt						50	50
B	İnce Kum				50	50		
C	İri-İnce Kum			50	50			
D	Çakıl ve Kum	50	50					
E	Siltli Kum			7.5	17.5	25	25	17.5
F	İnce Çakıllı Kum	7.5	17.5	25	25	17.5	7.5	
G	Kum			15	35	35	15	

Hassib (1951) tarafından yapılan çalışma sonuçları kullanılarak elde edilen log gerilme-log şekil değiştirme ($\log \sigma$ - $\log \epsilon$) grafiklerinden B, C ve G zeminleri için elde edilmiş olanlar grafikler Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Farklı granüler zeminler (temiz kumlar) için elde edilmiş ($\log \sigma$ - $\log \epsilon$) grafikleri (Hassib, 1951)

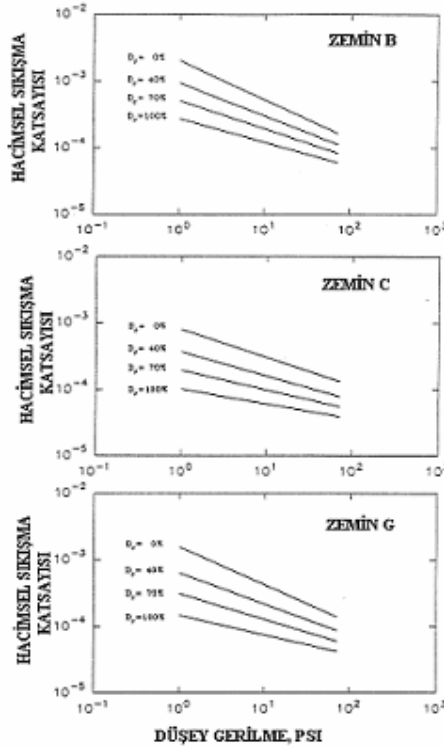
Elde edilen bulgulardan görüleceği gibi hacimsel şekil değiştirme ile düşey gerilme arasındaki ilişki her bir rölatif sıklık için lineer bir doğru ile aşağıdaki ifade ile temsil edilebilmektedir.

$$\varepsilon_v = C\sigma^D \quad (3.1)$$

Burada, D; log-log grafiğindeki doğrunun eğimi ve C ise düşey gerilme σ 'nın 1 psi değerine karşılık gelen ε 'nu tanımlayan bir sabittir ve zeminin rölatif sıklığının bir fonksiyonu olmaktadır. Hacimsel sıkışma katsayısı m_v (ise) aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır.

$$m_v = d\varepsilon / d\sigma = DC\sigma^{D-1} \quad (3.2)$$

Burada; $d\varepsilon$, küçük bir efektif düşey gerilme değişimine ($d\sigma$) karşılık gelen hacimsel şekil değiştirmedir. Şekil 3.8'de B, C ve G zeminleri için m_v ile σ arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu değişimler, m_v ile çevre basıncı arasında bir ilişki bulunduğunu ve hacimsel sıkışma katsayısı m_v 'nin gerilme seviyesine bağlı olduğunu göstermektedir.



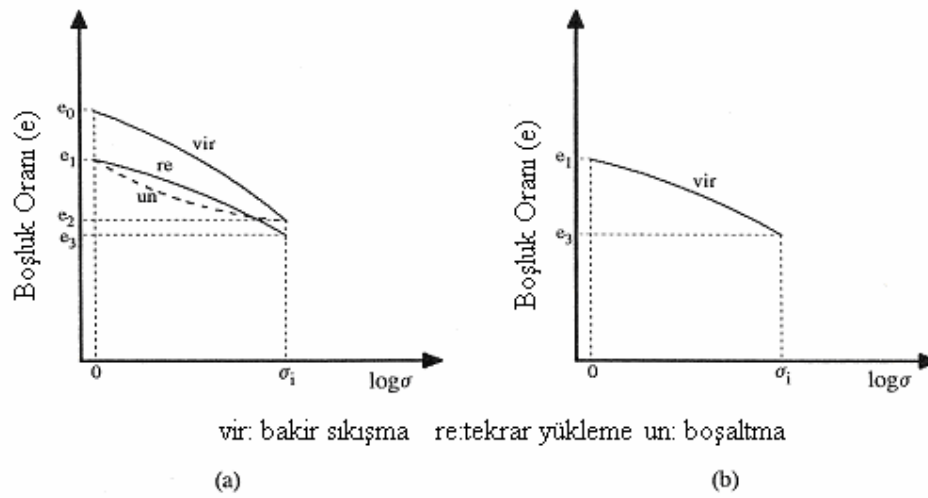
Şekil 3.8 B, C ve G zeminleri için hacimsel sıkışma katsayısı m_v ile σ arasındaki ilişki(Hassib, 1951)

Konsolidasyon problemlerinde hacimsel sıkışma katsayısı değerleri arazide beklenen gerilme aralıklarında seçilir. Herhangi bir efektif gerilme aralığında aşağıdaki gibi ifade

edilmektedir.

$$m_v = C\sigma^{D_2} - C\sigma^{D_1} / \Delta\sigma \quad (3.3)$$

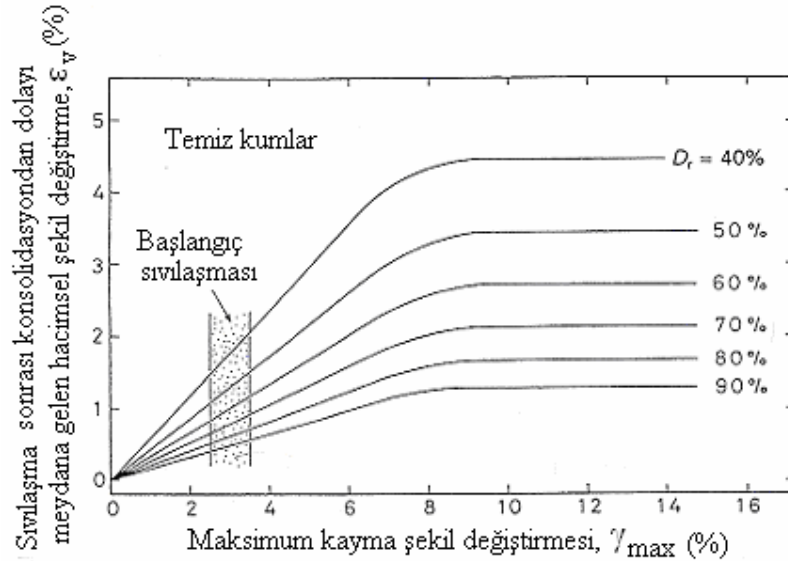
Temiz kumlarda, bakir sıkışma eğrisinden boşaltma eğrisine kadar olan sıkışabilirlikteki azalma 1.3 ile 1.6 kat arasında değişmektedir (Seaman vd., 1963). Bu bağlamda, tekrar yükleme eğrisi boyunca olan sıkışabilirlik (Şekil 3.9a) yaklaşık olarak bakir sıkışma eğrisi (Şekil 3.9b) boyunca olan sıkışabilirliğe yaklaşık olarak eşit kabul edilir. Böylece, bakir sıkışma için sıkışabilirlik değerleri tekrar yükleme sırasındaki değerlere (m_v 'nin başlangıç boşluk oranına bağlı olduğu göz önünde bulundurularak) eşit alınabilir.



Şekil 3.9 Kumların bir boyutlu sıkışma davranışının şematik olarak gösterimi (Adalier, 1992)

Drenajsız koşullarda tekrarlı yüklemeler etkisi altında oluşan artık boşluk suyu basıncının sönümlenmesi ile kumlarda meydana gelen hacimsel değişim laboratuvarında Lee ve Albesia (1974), Tatsuoaka vd. (1984) ve Nigase ve Ishiara (1988) tarafından deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, kumların sıvılaşma sonrasındaki hacimsel şekil değiştirmelerinin sadece kumun başlangıç rölatif sıkılığına bağlı değil, daha çok tekrarlı yüklemelerin yol açtığı maksimum kayma şekil değiştirmelerine bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu gözleme dayanarak Tokimatsu ve Seed (1987), sıvılaşma sonrasındaki zemin oturmalarını tahmin etmek için bir metodoloji geliştirmişlerdir. Ishiara ve Yoshmine (1992) tarafından da önerilen, sıvılaşma sonrası oluşan hacimsel şekil değiştirmeleri etkileyen önemli parametre olan maksimum kayma şekil değiştirmesini dikkate alan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, yoğun laboratuvar araştırmaları sonuçlarından üretilmiş iki temel esasa dayanmaktadır. Bunlardan birincisi, suya doymun kum zeminde oluşan hacimsel değişim ile maksimum kayma şekil değiştirmeleri arasındaki ilişkidir. Farklı rölatif sıkılıklardaki temiz

kumlarda gerçekleştirilmiş dinamik kesme deneylerinde drenajsız koşullarda düzensiz tekrarlı yüklemeler sırasında numunede meydana gelen maksimum kayma şekil değiştirmesi (γ_{maks}) ile konsolidasyon sonucu meydana gelen hacimsel şekil değiştirmeler (ϵ_v) arasındaki ilişki Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Görüleceği gibi %3 mertebesinde maksimum kayma şekil değiştirmeleri meydana gelebilmesi için yeterli büyüklükte çevrimsel yüklemeler uygulandığında, oluşan artık boşluk suyu basıncı düşey efektif gerilmelere eşit olmaktadır. Bu sonuç %100 artık boşluk suyu basıncı oluşumu veya başlangıç sıvılaşmasının %2-%3 mertebesindeki kayma şekil değiştirmelerinde meydana geldiğini gösteren diğer deneysel sonuçlar ile de sonuçları ile de uyumludur. Şekil 3.9'da dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise, başlangıç sıvılaşması için gerekli olan %2-3 mertebesindeki maksimum kayma şekli değiştirmelerin aşılması ile birlikte hacimsel şekil değiştirmeler de önemli miktarda artmaktadır.

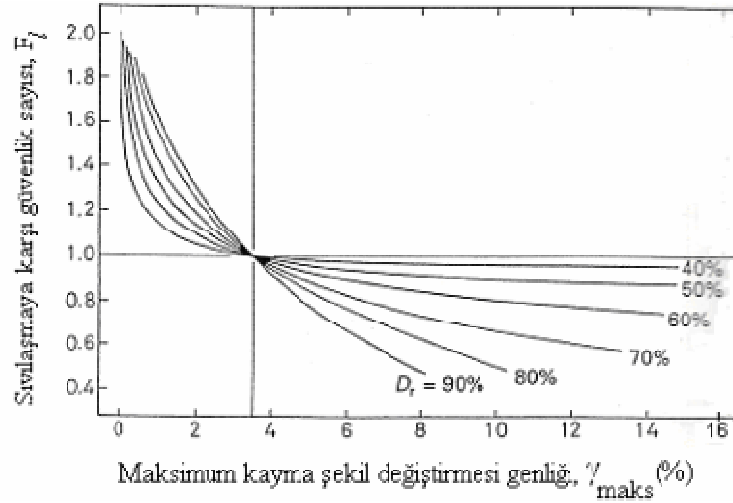


Şekil 3.10 Sıvılaşma sonrası oluşan hacimsel şekil değiştirme ile maksimum kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişki (Ishihara, 1996)

Sıvılaşma etkisi ile bir kum zeminde meydana gelecek oturmaları Şekil 3.10'da verilen korelasyondan yararlanarak belirleyebilmek için, olası bir deprem sırasında kum tabakasında oluşacak maksimum kayma şekil değiştirmesinin bilinmesi gerekmektedir. Bu ise aşağıdaki ikinci unsura dayalı olarak gerçekleştirilebilir. Genellikle, bir kumun sıvılaşma direnci, üç eksenli deneyde numunede oluşan çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliğinin %5 olması için gerekli tekrarlı gerilme oranı olarak kabul edilmektedir. Çok gevşek bir kumda, genel olarak yumuşama (başlangıç sıvılaşması) başlar başlamaz önemli seviyelerde deformasyonlar da oluşmaya başlar. Bu nedenle çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliği ne olursa olsun sıvılaşma direnci (çevrimsel mukavemet) hemen hemen aynı olacaktır. Fakat, orta sıkı kumlar

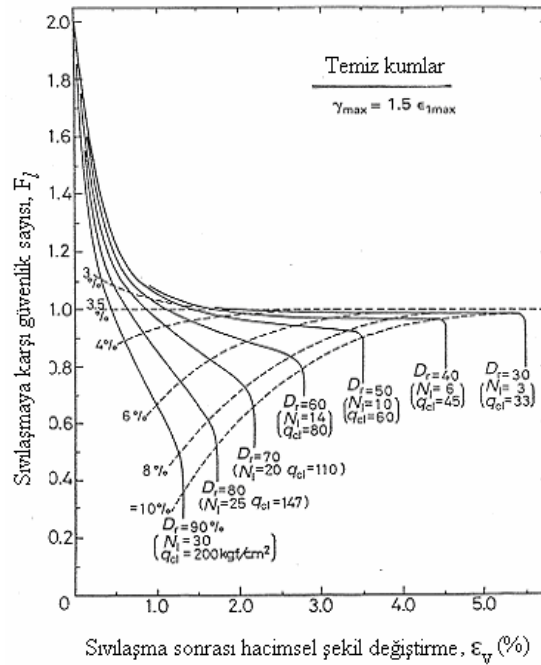
ile sıkı kumlarda bu durum geçerli olmamaktadır. Aslında, başlangıç sıvılaşmasını tanımlayabilmek için artan kayma şekil değiştirme büyüklükleri ile birlikte daha büyük bir tekrarlı gerilme oranı gereklidir. Diğer bir deyişle, üç eksenli numunede %5 çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliğinden daha büyük değerlerin oluşmasına izin verildiğinde daha büyük bir tekrarlı gerilme oranı mobilize olacaktır. Sonuç olarak, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 1'e eşit olması demek %5 çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliğinin oluşmasına neden olan tekrarlı yumuşama durumunun oluştuğu, diğer taraftan sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 1'den küçük olduğu durumlar ise %5 çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliğinden daha büyük eksenel şekil değiştirmelerin oluştuğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (F_l) çift yönlü eksenel şekil değiştirme genliğinin bir fonksiyonudur. Bir başka ifade ile bir arazideki kum tabakasında sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı biliniyorsa, bu durumda sıvılaşma sırasında kum tabakasında meydana gelecek çift yönlü eksenel şekil değiştirme de kestirilebilir. Bu şekil değiştirmenin yarısı, yani tek yönlü eksenel şekil değiştirme genliği ise sıvılaşma sırasında kum zeminde meydana gelen maksimum kayma şekil değiştirmesidir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ile kayma şekil değiştirme genliği arasındaki yukarıda bahsedilen ilişki laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlara dayalı olarak belirlenebilir. Nagase (1985) tarafından temiz kumlar üzerinde yapılan basit kesme deneyleri sonucunda elde edilen deneysel data yukarıda verilen kapsamda değerlendirildiğinde, Şekil 3.11'deki gibi farklı rölatif sıkılıklar için sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ile maksimum kayma şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler elde edilmektedir. Şekil 3.11'den görüleceği gibi sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının 1'den küçük değerleri için rölatif sıkılığı ne kadar büyükse, oluşacak maksimum kayma şekil değiştirmesi de o kadar küçük olmaktadır. Şekil 3.11'de verilen eğriler bilinen bir sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı değeri için maksimum kayma şekil değiştirmesi genliğini belirlemek için kullanılabilen ve sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme seviyesi de Şekil 3.10 yardımı ile belirlenebilmektedir.



Şekil 3.11 Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ile maksimum kayma şekil değiştirme arasındaki ilişki (Ishiara, 1996)

Eşit büyüklükteki maksimum kayma şekil değiştirme değerlerini veren güvenlik sayısı(F_f) değerleri ve hacimsel şekil değiştirme(ϵ_v) değerleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'den okunarak birleştirildiğinde ise Şekil 3.12'deki gibi farklı sıklıklardaki kumlar için sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ile sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiyi veren eğriler elde edilebilmektedir. Eğer bu eğriler pratik amaçlı olarak kullanılacaksa, bu durumda üç eksenli deneydeki aksenal şekil değiştirmenin $\gamma_{maks}=1.5\epsilon_1$ eşitliği ile basit kesmedeki kayma şekil değiştirmesine dönüştürülmesi gerekmektedir.



Şekil 3.12 Sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme ile sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı arasındaki ilişki (Ishiara, 1996)

Şekil 3.10’da her bir rölatif sıklık değeri için konsolidasyona bağlı hacimsel şekil değıştirmelerde üst bir sınır bulunduğu görölmektedir. Bu nedenle maksimum kayma şekil değıştirmesi oldukça büyük değerler aldığında dahi hacimsel şekil değıştirmelerde önemli bir artış ortaya çıkmamaktadır. Bu durum Şekil 3.12’de gözlenmektedir.

Ishiara (1996) yöntemi ile, derinlik boyunca sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı ve rölatif sıklık değeri bilindiğinde, depremler sırasında kum tabakalarının sıvılaşması sonucu meydana gelecek yüzeysel oturmalar tahmin edilebilmektedir. Her bir tabaka için Şekil 3.12’den belirlenecek hacimsel şekil değıştirmeler düşey deplasmanlara dönüştürölerek toplandığında yüzey oturmaları elde edilebilmektedir.

4. KUMLARIN SIVILAŞMA DAVRANIŞINI AÇIKLAYAN BÜNYE İLİŞKİLERİ VE DAHA ÖNCE YAPILAN NÜMERİK MODELLEME ÇALIŞMALARI

Depremeler sırasında kumlu zeminlerin davranışı sonucunda oluşan hasarların en büyük nedenlerinden birisi sıvılaşma sonucu meydana gelen mukavemet kaybı olmaktadır. Geçmişte büyük ölçekli hasarların meydana geldiği Alaska ve Nigata depremleri sıvılaşma konusundaki araştırmaların hızlanmasına yol açmıştır. Bu nedenle depremler sırasında zeminlerin davranış mekanizmasını anlamak için yapılan çalışmalar geoteknik ve deprem mühendisliğinde en yoğun araştırmaların gerçekleştirildiği alanlardan birisini oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, zemin araştırmaları ve deneysel metodlardaki gelişmeler ile çeşitli vaka analizlerinin sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda, sıvılaşma potansiyelinin tahmine edilmesine yönelik bazı metodlar önerilmiştir ve inşaat mühendisliği pratiğinde sıkça kullanılmaktadır. Pratikte, sıvılaşma potansiyelinin tahmini deprem sırasında oluşan eşdeğer kayma gerilmesi oranı zeminin sıvılaşmaya karşı direncinin karşılaştırılması ile belirlenmektedir. Sıvılaşmaya yol açan olan artık boşluk suyu basıncı ise, pratik tasarımlarda sıvılaşma potansiyelinin tahmini için genellikle dikkate alınmamaktadır. Ancak, zeminde meydana gelebilecek rijitlik ve mukavemet kaybı ile olası oturmaları belirleyebilmek için artık boşluk suyu basıncının göz önüne alınması gerekmektedir.

Ayrıca, kumlu zeminlerde dinamik yüklemeler etkisi altında oluşan sıvılaşma sonucunda zeminde büyük yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Bu yer değiştirmelerin hesabında mekanik esaslı bir yaklaşıma ek olarak problemin fiziksel yönü de düşünülmelidir. Bu yaklaşımda problemin başlangıç ve sınır koşullarının denge ve uyumluluğunun sağlanması gerekmektedir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar tekniği kullanan nümerik yöntemlerden gerilme-şekil değiştirme analizleri için çok sık faydalanılmaktadır. Zeminde gerilme-deformasyon analizi için kullanılan tüm yöntemlerde, malzeme davranışını modelleyebilmek için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine ya da diğer bir deyişle bünye modellerine ihtiyaç vardır. Analiz yöntemleri arasında en önemli farkı kullanılan gerilme-şekil değiştirme davranışı için kullanılan bünye modelleri oluşturmaktadır. Bu bünye modellerinin geliştirilmesinde

1. Laboratuvar deneyleri gözlemleri dikkate alınarak, artık boşluk suyu basıncı ve kayma gerilmesi (efektif gerilme izi) arasındaki ilişki
2. Artık boşluk suyu basıncı ve yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişki

3. Genleşme nedeni ile oluşan hacimsel şekil değiştirme ile yükleme çevrim sayısı arasındaki ilişki

gibi ilişkilerin birlikte düşünüldüğü farklı kombinasyonlar ile sıvılaşma davranışının modellenmesi amaçlanmaktadır.

Ishihara vd. (1976) tarafından yapılan çalışma yukarıdaki (1) ilişkisine örnek oluşturmaktadır. Bunun yanında Seed vd. (1975) tarafından (2) no'lu ilişki kullanılarak kumlu zeminlerin sıvılaşma sırasındaki davranışını açıklayan yöntem geliştirilmiştir. Yoshimi ve Tokimatsu (1978) tarafından yapılan çalışma ise yukarıda ifade edilen (3) ilişkisi kullanılarak yapılan ve bu konudaki öncü çalışmalardan birini oluşturmaktadır. Nishi vd. (1986), Nishi ve Kanatani (1986) tarafından da benzer bir metod kullanılarak, çok boyutlu zemin ortamlarında yüksek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik davranışını analiz etmek için ve kum zeminlerde depremler sırasında oluşan oturmaların tahminine yönelik bir çalışma yapılmıştır. Bu yöntemler, doğrusal olmayan (nonlinear) deformasyon davranışını tam olarak modellememesine rağmen, basit ve pratik olması açısından oldukça yararlı yöntemler olarak literatürde yer almaktadırlar.

Diğer taraftan, yakın zamanlarda deneysel çalışmalar ile geliştirilen bünye modellerinden yararlanılan nümerik yöntemlerde de hızlı gelişmeler gözlenmektedir. Bu yöntemler kullanılarak zeminlerin depremler sırasındaki davranışı, efektif gerilme değişimlerine bağlı olarak bağlı kayma gerilmesi ve kayma modülü değişimleri göz önüne alınarak analiz edildiği için, doğruya yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Efektif gerilme analizine dayalı bu bünye modellerinde boşluk suyu basıncı oluşumunun hesaplanabilmesi için önerilen yöntemler aşağıdaki gibi iki kısma ayrılabilir:

1. Doğrusal olmayan bir kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme ilişkisi ve artık boşluk suyu basıncı veya hacimsel şekil değiştirme için deneysel olarak belirlenen bazı eşitlikler kullanan yöntemler
2. Genleşme etkisini de içine alan elasto-plastik gerilme-şekil değiştirme ilişkilerini kullanan yöntemler

İlk grupta yer alan yöntemlerde kayma gerilmesi-şekil değiştirme ilişkileri, efektif gerilmeye bağlı olarak hiperbolik eğrilerle veya Masing kuralını kullanan Ramberg-Osgood ilişkisinden yararlanan modeller ile ifade edilmektedir. Bu yöntemlerde artık boşluk suyu basıncı ve hacimsel şekil değiştirme, dinamik davranış analizlerinden belirlenen kayma gerilmesi-zaman

ya da kayma şekil değiştirmesi-zaman değişimlerinden yararlanılarak belirlenmektedir. Liou vd. (1977), Finn vd. (1977), Ghaboussi vd. (1978), Ishiara ve Towhata (1980), Kokusho vd. (1982), Nishi vd. (1985), Yamauchi ve Skai (1985) ve Yamazaki vd. (1985) tarafından yapılan çalışmalarda gerilme-şekil değiştirme davranışı ve kum zeminlerde sıvılaşma oluşumu bu yaklaşımdan faydalanılarak incelenmiştir. Bu yöntemler arasında Kokusho vd. (1982) tarafından önerilen sıvılaşma modelinde iki boyutlu arazi koşulları dikkate alınmaktadır. Önerilen diğer modeller ise bir boyutlu arazi koşulları için geçerli olmaktadır. Ayrıca, Liou vd. (1977) tarafından önerilen modelde yanal yönde sınırlanmış durumlar dikkate alınmışken, Yamazaki vd.(1985) tarafından önerilen modelde deprem sırasında kumun davranışı çok yönlü kayma durumları için modellenebilmektedir. İkinci grupta yer alan metodlar içerisinde Oka vd.(1981a), Sato vd. (1980), Oka vd.(1981b), Hirari vd.(1985) Shiomu vd.(1984) tarafından önerilenler gibi bir boyutlu yöntemler olduğu gibi Uchida ve Hasegawa (1987) ve Ohtsuki vd. (1986) tarafından önerilen iki boyutlu yöntemler de bulunmaktadır. Bununla birlikte, endokronik teori ve deneysel eşitlikler kullanılarak, tekrarlı kayma gerilmeleri altında oluşan hacimsel şekil değiştirmelerden boşluk suyu basıncının hesaplandığı yöntemler de bulunmaktadır. Fakat bu modellerde genleşme elasto-plastik bünye eşitliklerinden doğrudan belirlenmemektedir. Tanaka vd.(1983) ve Ghaboussi ve Momen (1982) ise bu yönde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

Zeminler kayma gerilmelerine maruz kaldıklarında hem elastik hem de plastik deformasyonlar meydana gelmektedir. Sonuç olarak zeminde meydana gelebilecek şekil değiştirme değişimlerinin ($d\epsilon$) elastik ($d\epsilon^e$) ve plastik ($d\epsilon^p$) şekil değiştirme değişimlerinin toplamı olduğu düşünülebilir. Genellikle, zeminin elastik davranışının doğrusal ve izotropik olduğu, plastik davranışının ise doğrusal olmayan ve anizotropik bir davranış olduğu varsayılmaktadır. Zeminin plastik davranışını tanımlayabilmek için;

- Plastik akmanın meydana geldiği gerilme durumunu tanımlayan akma yüzeyinin
- Plastik şekli değiştirme artım tensörü ile gerilme ve gerilme artım tensörlerini birleştiren akma kuralının
- Plastik şekil değiştirme sırasında akma yüzeyinin değişimini belirten pekleşme kuralının

belirlenmesi gerekmektedir.

Zeminin elastik olmayan davranışını ifade etmek için elasto-plastik teorilere dayalı bünye

ilişkilerinin geliştirilmesi çalışmaları büyük oranda 1950'li yıllarda başlamıştır. İlk zamanlarda zeminin göçmeye kadar olan deformasyon sürecini modelleyebilmek için, konsolidasyon tarihçesi ve genleşme gibi zemin karakteristiklerinin bünye modellerinde nasıl dikkate alınabileceği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Cam clay modeli (Schofield ve Wroth, 1968) bu yönde yapılan çalışmalara bir örnek oluşturmaktadır. Bu modellerde, kil tabakalarında konsolidasyona bağlı oturmalarından dolayı meydana gelen yanıl deformasyon, kazıların stabilitesi ve temel altındaki zeminlerin taşıma gücü ve deformasyonu ile ilgili problemlere uygulanmıştır. Bu modellerin yukarıda bahsedilen problemlerin çözümündeki yeterliliği bir çok araştırmacı tarafından ispat edilmiş olmasına rağmen, bir çoğu izotropik teoriye dayandığı için zeminlerin dinamik yüklemeler sırasındaki gerilme-şekil değıştirme davranışını modellemekte yetersiz kalmaktadır. Metaller üzerinde uygulanan plastisite teorisinde ilk başlarda bu nokta üzerinde çok çalışılmış ve Prager (1955) ve Ziegler (1959) tarafından kinematik pekleşme kuralı, Hodge (1957) tarafından izotropik pekleşmeyi içeren birleştirilmiş pekleşme kuralı önerilmiş ve Bausinger etkisi görülen malzemelerin tekrarlı yüklemeler altındaki elastik olmayan davranışı üzerinde uygulanmıştır. Bunlara ek olarak, Mrotz'un plastik pekleşme kuralı (Mrotz, 1967), Dafalia ve Popov (1975) tarafından önerilen kritik yüzey teorisi ve Krieg (1975) tarafından önerilen iki yüzey teorisi gibi teoriler de zemin mekaniği alanında olumlu gelişmelere olanak sağlamıştır.

Bu çalışmalar, deneysel olarak gözlemlenen tekrarlı yüklemeler altında kayma şekil değıştirmesi, hacimsel şekil değıştirme ve artık boşluk suyu basıncı oluşumlarını modellemekte oldukça katkı sağlamıştır. Fakat, gerilme-deformasyon davranışının detaylı bir şekilde açıklanmasını sağlayacak girişimlerde, teori oldukça komplike bir hal almakta, bünye ilişkilerinde geçen malzeme sabitlerinin sayısı artmakta, ve bu malzeme sabitlerini tanımlamada ve belirlemede güçlükler yaşanmaktadır. Daha da önemlisi, halen bazı problemlerin çözümü beklenmektedir. Örneğin, kayma gerilmelerinin yön değıştirmesine bağlı deformasyon davranışı ve asal gerilme yönlerinin rotasyonundan dolayı meydana gelen plastik deformasyon davranışı bünye modellerinde henüz tam olarak ifade edilememektedir.

Nishi ve Kanatani (1990) tarafından önerilen modelde izotropik pekleşebilen malzemeler için geleneksel elasto-plastik teori geliştirilmiştir. Böylece, kumlarda boşluk suyu basıncı oluşumu, anizotropik konsolidasyon durumu, tekrarlı yükleme sırasında asal gerilme yönlerinin rotasyonu ve sıkı kumların davranışı da gözönüne alınarak modellenenilmektedir. Modelde bünye eşitlikleri, efektif gerilme oranı ve plastik potansiyel fonksiyonu cinsinden akma fonksiyonu ile formüle edilmiştir. Ayrıca Nishi ve Kanatani (1990) tarafından önerilen

bu modelde Sekiuchi ve Ohta (1977) tarafından önerilen rölatif gerilme oranını dikkate alınmaktadır. Böylece, kumların çok yönlü gerilme durumlarında yükleme ve boşaltma sırasındaki deformasyon davranışı modellenenilmekte ve deformasyon davranışında asal gerilmelerin yön değıştirme durumu da göz önüne alınabilmektedir. Modelde, çok yönlü gerilme koşulları için Masing kuralı geliştirilerek pekleşme fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Modelde geçen malzeme parametreleri geleneksel laboratuvar deneyleri ile kolayca elde edilebilmekte ve farklı sıklıklardaki kumların drenajsız tekrarlı deformasyonu tatminkar bir şekilde modellenenilmektedir.

Bu bölümde zeminlerin dinamik yüklemeler altındaki davranışını açıklayan bünye modellerinin temel özellikleri ve dinamik yüklemeler altındaki bir kumun davranışını temsil edebilecek bünye modellerinin özellikleri anlatılmaktadır.

4.1 Elastisite Teorisine Dayalı Modeller

Elastisite teorisine dayalı modeller toplam gerilme analizi yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. Bu tür modeller, herhangi bir kayma gerilmesi limiti, yani kayma gerilmesinin ulaşacağı maksimum değeri sınırlayan bir göçme kriteri içermeyen zemin modelleridir. Zeminin doğrusal olmayan gerilme-şekil değıştirme davranışı iki şekilde modellenmektedir.

- i. Artımsal doğrusal yaklaşım
- ii. Eşdeğer doğrusal yaklaşım

Gerilme ve şekil değıştirmelerle birlikte boşluk suyu basıncı hesaplanmadığı için, zeminin drenajsız davranışı modelde kullanılan parametrelerle yansıtılmaktadır. Dolayısı ile boşluk suyu basıncı artışlarının etkileri, azaltılmış mukavemet ve diğer rijitlik parametrelerine dahil edilerek modellenmektedir. Bu modeller zeminin drenajsız koşullardaki davranışını hesaplayan basit ve pratik yöntemler arasındadır.

4.2 Elasto-Plastik Teoriye Dayalı Modeller

Elasto-plastik teoriye dayalı bünye modelleri efektif gerilme yaklaşımlarına temel oluşturan modellerdir. Bu modeller kayma ve çekme gerilme limitlerini içermekte ve boşluk suyu basıncı oluşumunu ve sönümlenmesini de içine alarak zeminin karakteristik gerilme-şekil değıştirme davranışını modellemektedir. Yükleme esnasındaki boşluk suyu basıncı oluşumu

ve sonrasındaki sönümlenme aşaması, analizin her adımında zemin iskeletinin artımsal mekanik deformasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Bu nedenle, zeminin yükleme sırasında ve sonrasındaki davranışı bünye modeli tarafından tanımlanmaktadır. Uygun bünye modeli kullanıldığında, elasto- plastik yaklaşımların daha güçlü ve doğru yaklaşımlar olduğu söylenebilir. Fakat, efektif gerilme analizine dayalı bünye modelleri daha karmaşık ve uygulama esansında bir çok malzeme parametresine ihtiyaç duyulan modellerdir. Bu ise bu yaklaşımları zorlaştıran en temel unsurdur. Artımsal elasto-plastik teorisinin esasları geniş bir şekilde Hill (1950)'de verilmektedir. Ancak bu teori ile ilgili esaslar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Elasto-plastik teoriye dayalı modeller genel olarak toplam şekil değiştirme değişimi $d\epsilon$ 'nin elastik şekil değiştirme değişimi $d\epsilon^e$ ve plastik şekil değiştirme değişimi $d\epsilon^p$ olmak üzere iki bileşenden oluştuğunu varsaymaktadır. Gerilme uzayı büyük asal gerilme σ'_1 ve küçük asal gerilme σ'_3 'ten oluşan asal efektif gerilmelerle tanımlanır, elastik ve plastik davranışı birbirinden ayıran gerilme noktaları sınır yüzeyi oluşturmakta ve “Akma yüzeyi” ya da “Yükleme yüzeyi” olarak isimlendirilmektedir. Bu yüzey matematiksel olarak ise aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$f(\sigma'_{ij}) = 0 \quad (4.1)$$

Burada, σ'_{ij} efektif gerilme tensörünün elemanlarını temsil etmektedir. (4.1) eşitliğindeki herhangi bir gerilme durumu akma yüzeyinin üzerinde yer almaktadır. Eğer $d\sigma'_{ij}$ gerilme artışı uygulanırsa ve gerilme durumu o andaki elastik bölgeden dışarı doğru hareket ederse, plastik şekil değiştirmeler meydana gelir, akma yüzeyi genişler ve bu durum “Pekleşme” olarak isimlendirilir. Diğer taraftan, eğer gerilme durumu elastik bölgenin içine doğru hareket ederse, yükleme boşaltması durumu meydana gelir, elastik bölgede bir değişim olmaz ve elastik şekil değiştirmeler ortaya çıkar. Yukarıda verilen üç gerilme durumunun akma yüzeyine göre olan durumuna göre yükleme kriteri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$f=0$ ve $df>0$ plastik şekil değiştirmeler

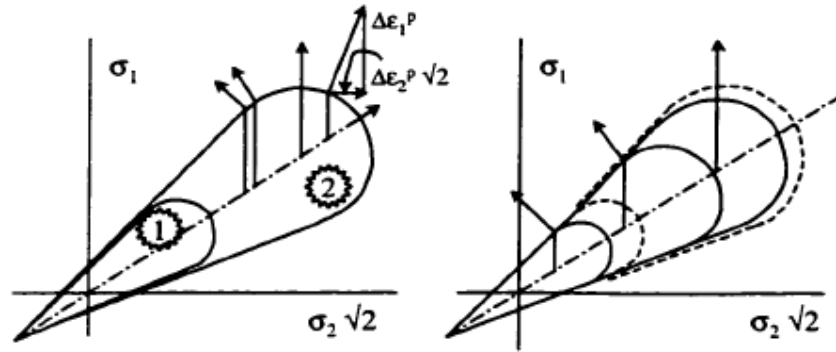
$f=0$ ve $df<0$ elastik şekil değiştirmeler

$f=0$ ve $df=0$ plastik şekil değiştirmeler (4.2)

burada,

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} d\sigma'_{ij} \quad (4.3)$$

(4.2) ve (4.3) eşitlikleri ile tanımlanan yükleme kriteri plastisite teorisinin hesaplamalardaki en büyük avantajını oluşturmaktadır. Çünkü izotropik bir malzeme için yükleme durumunun tek eksenli ya da çok eksenli olup olmadığını kesin olarak belirlemektedir. Aslında $\partial f / \partial \sigma'_{ij}$ bileşenlerinden oluşan vektör akma yüzeyine diktir ve bu yüzden, bu vektör ile $d\sigma'_{ij}$ gerilme artımı vektör bileşenleri yükleme artımını belirlemektedir. Fakat, akma yüzeyinin genişlemesi yükleme altında bir zeminin nihai durumunu tanımlayan göçme kriteri ile sınırlandırılmaktadır. Bu sınırlandırma ise bir göçme yüzeyi kriteri ile belirlenmektedir. Akma yüzeyi göçme yüzeyi ile temas ettiğinde akma yüzeyi daha fazla genişleyemez. Zeminin mukavemetini tanımlayabilmek için çeşitli göçme kriterleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında Mohr Coulomb, Tresca, Drucker ve Prager (1952), Matsuoka(1974) ve Lade ve Duncan (1975) sayılabilir. Bununla birlikte bu kriterler izotropik sıkışma altında meydana gelen plastik hacimsel şekil değiştirmeleri hesaplamakta yetersiz kalmaktadır. Drucker vd.(1955) bu sınırlamayı belirtmekte ve Şekil 4.1'de gösterildiği gibi sepeti andıran bir akma yüzeyi ile hidrostatik eksenlerin bir kısmını içine alabilmektedir. Bu şekilde basınç yüklemelerinde plastik şekil değiştirmeler dikkate alınabilmektedir. Daha sonra da değinileceği gibi bu sınırlamaları dikkate alan çeşitli modeller geliştirilmiştir.



Şekil 4.1 Üç eksenli test koşulları için Drucker vd. (1955) tarafından önerilen akma yüzeyi

Yukarıda açıklanan akma kriterlerine ek olarak artımsal elastoplastik teoriyi oluşturan dört temel eleman vardır;

- i. Pekleşme kuralı

- ii. Pekleşme parametresi
- iii. Akma kuralı
- iv. Artımsal gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

Pekleşme kuralı, akma oluşurken elastik bölgenin genişlemesinin ne şekilde olacağını tanımlamaktadır. Elastik bölgedeki değişim pekleşme olarak tanımlanmaktadır ve Prager (1955) iki farklı pekleşme mekanizması olduğunu söylemektedir. Bunlar; izotropik pekleşme ve kinematik pekleşme olarak isimlendirilmektedir. İzotropik pekleşme, yeni plastik durumun oluşması için akma yüzeyinin tüm yönlerde aynı oranda genişlemesini temsil etmektedir. Kinematik pekleşme ise akma yüzeyinin yer değiştirmesini elastik bölgenin yönünde, boyutunda ve şeklinde değişim olmaksızın tanımlayan bir pekleşme mekanizmasıdır. Elastik bölgenin yeni pozisyonu akma bölgesinin yeni gerilme durumu için yerleşmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, pekleşmenin iki tipi birleştirilerek karışık pekleşme mekanizması da oluşturulabilir.

Pekleşme parametresi K skalar bir büyüklük olup, akma yüzeyinin büyüklüğünü karakterize eder. Yükleme esnasında oluşan plastik deformasyon tarihçesini kaydetmek için kullanılır. Pekleşme parametresi ya kümülatif plastik şekil değiştirme artımları (Hill, 1950; Mroz, 1967 Roscoe ve Burland, 1968; Prevost ve Hoeg, 1975; Vermeer, 1978) ya da plastik iş (Hill, 1950; Lade, 1977) cinsinden ifade edilir.

Pekleşen bir malzeme için, akma yüzeyinin büyüklüğü, f , ve pozisyonu, ya da her ikisi birden, sadece gerilme durumuna (σ'_{ij}) değil, pekleşme parametresi K a da bağlıdır. Bu nedenle akma yüzeyi

$$f(\sigma'_{ij}, K) = 0 \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Akma kuralı, plastik şekil değiştirme artım vektörünün yönünü ($d\epsilon^p$) tanımlamaktadır. İdeal bir akışkanın akması durumunu düşünerek bir benzetme yapılacak olursa, akma yüzeyi üzerindeki herhangi bir noktada potansiyel fonksiyon plastisite teorisinde tanımlıdır ve plastik potansiyel, $g(\sigma'_{ij})$, olarak isimlendirilir. Bu nedenle, plastik şekil değiştirme artım vektörünün yönü ($d\epsilon^p$) plastik potansiyele dik olan birim vektörle çakışır ve bu nedenle plastik şekil değiştirme artımının bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$d\epsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (4.5)$$

Burada, λ pozitif skalar bir değer olup plastik yükleme tarihçesi boyunca değişir ve plastik şekil değiştirme artımının büyüklüğünü verir, $\partial g / \partial \sigma'_{ij}$ ise plastik şekil değiştirme artımının yönünü belirler.

Diğer bir deyişle, (4.5) eşitliği akma kuralını tarif etmektedir. Eğer plastik potansiyel fonksiyonu (g) akma yüzeyi ile çakışırsa, yani $g=f$ olursa, bu durumda akma kuralı “birleşik akma kuralı” olarak, çakışmıyorsa, “birleşik olmayan akma kuralı” olarak adlandırılır.

Genel olarak, zeminlerin yüklemeler altında davranışını tarif eden gerilme-şekil değiştirme eğrileri doğrusal olmayan eğrilerdir. Fakat, bazı durumlarda adımsal lineer (doğrusal) yaklaşımlarla bu doğrusal olmayan davranış temsil edilmeye çalışılır. Maksimum akma gerilmesinden sonra her bir doğrusal parça elastik ve plastik modülü temsil eden kendine ait bir eğime sahiptir ve her bir doğrusal parça farklı bir akma yüzeyi ile ilişkilendirilir.

Mroz(1967) bu kavramı, her bir akma yüzeyinin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin her bir doğrusal parçası ile ilişkilendirildiği toplam bir akma yüzeyi ağı kullanarak genelleştirmiştir.

Toplam şekil değiştirme değişimi($d\epsilon_{ij}$), elastik ($d\epsilon_{ij}^e$) ve plastik ($d\epsilon_{ij}^p$) şekil değiştirme değişimlerinin toplamı olarak düşünülebilir.

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p \quad (4.6)$$

Gerilme değişimi ile elastik şekil değiştirme değişimi ilişkisi Hooke Yasası ile genelleştirilmiştir.

$$d\sigma'_{ij} = C_{ijkl} d\epsilon_{kl}^e = C_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p) \quad (4.7)$$

Burada, C_{ijkl} elastik rijitlik tensörüdür. Plastik şekil değiştirme değişimi ($d\epsilon_{kl}^p$) (4.5) eşitliği ile verilmiştir. Dolayısı ile artımsal gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$d\sigma'_{ij} = C_{ijkl} \left(d\epsilon_{kl} - \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{kl}} \right) \quad (4.8)$$

Artımsal elastik-plastik modeller, aşağıdaki özellikleri hakkında yapılan varsayımlar

- i. Pekleşme kuralı; elastik bölgenin nasıl değişeceği

- ii. Akma kuralı; plastik şekil değiştirme artımının yönünün nasıl olacağı
- iii. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; gerilme ve şekil değiştirme artımlarının nasıl ilişkilendirileceği

ile birbirinden farklılıklar göstermektedir.

4.3 Dinamik Yüklemeler Altında Kumların Davranışı ve Artımsal Elasto-Plastik Yaklaşım

Bu bölümde, kumların dinamik yüklemeler altındaki davranışı artımsal elasto-plastik teori ile ilişkilendirilerek, gözlenen kum davranışı ile elasto-plastik teori arasında bir ilişki kurulmaya çalışılacaktır.

Deneysel gözlemler kumlarda meydana gelen şekil değiştirmelerin elastik ve plastik olmak üzere bileşenden oluştuğunu göstermektedir. Kumlarda meydana gelen elastik şekil değiştirmeler yaklaşık olarak geçmişte ulaştığı maksimum gerilme seviyesi ile sınırlandırılmıştır (Akma Yüzeyi). Bu sınır içerisinde (Elastik Bölge) bütün şekil değiştirmeler elastiktir. Geçmişte ulaşılmış maksimum gerilme seviyesi aşıldığında bu sınır bölge (yüzey) değişir ve bu durum elastik bölgenin şekil değiştirme pekleşmesi olarak isimlendirilir. Şekil değiştirme değişimlerinin plastik bileşenleri, plastik potansiyel olarak bilinen ve geometrik olarak birbirine benzeyen eğri grubuna diktir ve bu eğriler ulaşılan maksimum gerilme seviyelerindeki sınır yüzeylerle ile çakışmaz (Birleşik Olmayan Akma Kuralı). Yükleme sırasında kumların davranışı nihai bir mukavemet değeri ile sınırlandırılmıştır (Göçme Yüzeyi). Dolayısıyla, kumlar sınır yüzeyinin genişlemesi ile nihai bir değere kadar, yani göçme yüzeyine ulaşana kadar, şekil değiştirme pekleşmesi gösteren bir malzeme gibi davranmaktadır. Akma yüzeyi, plastik potansiyel çizgileri ile hiçbir zaman çakışmaz, fakat gerilme uzayında kumun elastik davranış gösterdiği varsayılan bölgeler oluştururlar. Bu bölgelerin dışında ise kumlar plastik davranış göstermekte, ayrıca kumun davranışı izotropik olmayıp, tekrarlı yüklemeler altında gerilme boşalmaları meydana geldiğinde akma yüzeyi pozisyonu değişmektedir.

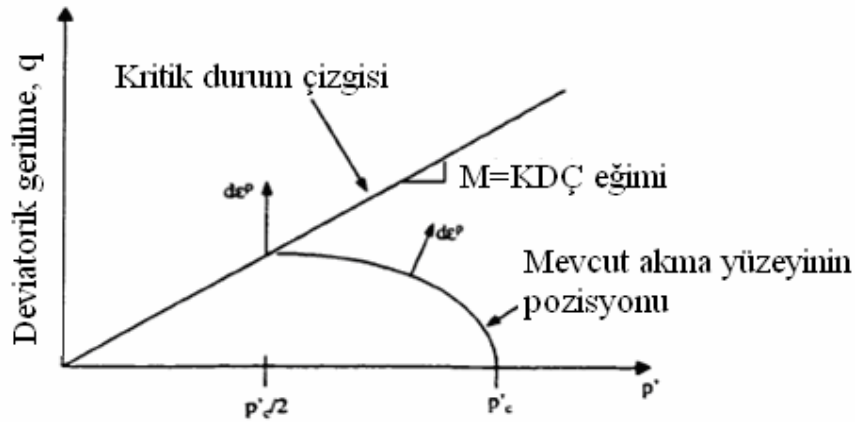
4.4 Artımsal Elasto-Plastik Bünye Modelleri Tipleri

Artımsal elasto-plastik teorisinin yukarıda özetlenen temel teorilerine dayalı olarak çeşitli bünye modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin büyük bir kısmı iki kategori altında toplanabilir: kritik durum modelleri ve Mohr Coulomb modelleri. Bunlar arasındaki en temel

farklar akma yüzeyi, pekleşme kuralı ve akma kuralı ile ilgili olarak yapılan varsayımlardır. Bununla birlikte, zemin davranışını modelleyebilmek için çok farklı yaklaşımlar izleyen değişik modeller de geliştirilmiştir. Örnek olarak sınırlandırılmış yüzey plastisitesi (Dafalls ve Herrmann, 1980) ve endokronik teori (Valanis, 1971; Ansal, 1978) bunlar arasında sayılabilir.

4.4.1 Kritik durum modelleri

Schofield ve Wroth (1968), yeniden oluşturulmuş kil numuneleri üzerinde gerçekleştirdikleri üç eksenli deney sonuçlarına dayanarak Kritik Durum Teorisi'ni geliştirmişler ve Cam Clay Modeli olarak isimlendirdikleri bünye modelini bu teori üzerine kurmuşlardır. Bu modelde birleşik akma kuralına dayalı bir izotropik pekleşme geçerlidir. Göçme yüzeyi, sabit hacim ve gerilmede şekil değiştirmeler oluşmasını tanımlayan gerilme durumlarını gösteren kritik durum çizgisi (KDÇ) ile belirlenmektedir. Akma yüzeyi ise boşluk oranında veya özgül hacimde bir azalma olduğunda pekleşen eliptik bir yüzey olarak varsayılmaktadır. Zeminin davranışını modelleyebilmek için üç farklı durum parametresi kullanılmaktadır. Bunlar efektif ortalama normal efektif gerilme (p'), genelleştirilmiş deviatorik gerilme(q') ve özgül hacim (v) olmaktadır. Modelin genel özellikleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Cam-Clay modelinin genel özellikleri

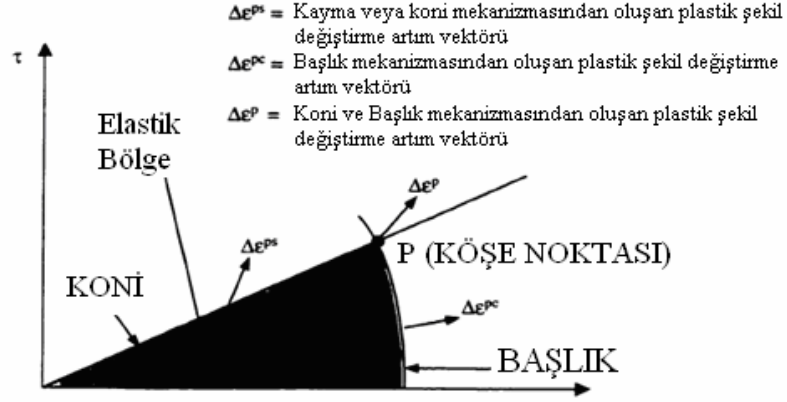
Bu yaklaşıma dayalı çeşitli modeller geliştirilmiştir ve bu modeller “Kritik Durum Modelleri” olarak isimlendirilmektedir. Fakat deneysel çalışmalar (Poorooshasb vd.,1966) birleşik akma kuralının kumlara uygulanabilir olmadığını göstermiştir. Ayrıca, izotropik pekleşme varsayımı tekrarlı yükleme sırasında ya da gerilme yön değiştirmesi sırasında oluşan kalıcı deformasyonları ve artık boşluk suyu basıncı oluşumlarını belirlemekte yetersiz kalmaktadır. Bununla ilgili olarak Carter vd.(1982), elastik bölgenin yükleme boşalması sırasında büzüldüğünü ve bu nedenle yeniden yükleme sırasında plastik şekil değiştirmelerin

oluşturduğunu belirtmişlerdir. Jefferies (1997) ise efektif ortalama normal gerilmenin belirli bir değerinden sonra, yükleme boşalması için eliptik akma yüzeyini sürükleyen ve büzen bir başlık modeli önermiştir.

4.4.2 Mohr-Coulomb Modelleri

Kumlar için, akma yüzeyinin içsel sürtünme açısının mobilize olmuş bir değeri ile belirlenmesi varsayımına göre Mohr-Coulomb modelleri geliştirilmiştir (Vermeer, 1980). Birleştirilmemiş akma kuralları kullanılmasına rağmen izotropik pekleşme varsayımının kullanıldığı modeller için (Lade ve Duncan (1975), Matsuoka ve Nakai (1977) ve Vermeer (1978)) yukarıda bahsedilen sınırlamalar geçerli olmaktadır.

Puebla vd. (1996, 1997) birleştirilmemiş akma kuralı ve karışık pekleşmeye benzer bir kapsamla yeni bir Mohr-Coulomb modeli önermiştir. Bu modelde kullanılan ve gerilme boşalması sırasındaki elasto plastik davranışın dikkate alındığı pekleşme kuralında, yükleme sürecinde gerilme boşalması oluşmadıysa sadece elastik şekil değiştirmeler göz önüne alınmaktadır. Bu modelin kullanılması ile CANLEX dolgusunun gözlenen davranışının iyi bir şekilde tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Buna rağmen, hidrostatik eksen (Şekil 4.1) akma yüzeyinin bir parçası olarak içermeyen modeller, izotropik sıkışması sırasında kumda oluşan şekil değiştirmeleri belirleyememektedir. Bu sınırlamayı ortadan kaldırmak için, Drucker (1955) tarafından önerilen sepet biçimli akma yüzeyi fikrine dayanarak, araştırmacılar izotropik sıkışma altında oluşan plastik hacimsal şekil değiştirmeleri ve elastik bölgeyi hidrostatik eksene göre dikkate alan ikinci bir akma yüzeyi önermişlerdir. İki akma yüzeyi genel olarak “koni” ve “başlık” yüzeyleri olarak isimlendirilmişlerdir. Birbirinden bağımsız olan bu iki yüzey yükleme sırasında zeminin davranışını belirlemek için birlikte hareket edebilmekte, her iki yüzeyin de kendisine ait plastik potansiyeli, akma kuralı, pekleşme kuralı ve pekleşme parametresi bulunmaktadır. Bu yüzden, gerilme durumu σ'_{ij} 'nin $d\sigma'_{ij}$ 'nin hangi yönde olduğuna bağlı olarak ya koni ya da başlık sınır yüzeyi tek başına veya her ikisi birden aynı anda harekete geçerler. İkinci durum σ'_{ij} 'nin her iki eğirinin kesişme yerinde bulunması ve $d\sigma'_{ij}$ 'nin elastik bölgenin dışına doğru yönlendirilmesi (Şekil 4.3) durumunda meydana gelmektedir.

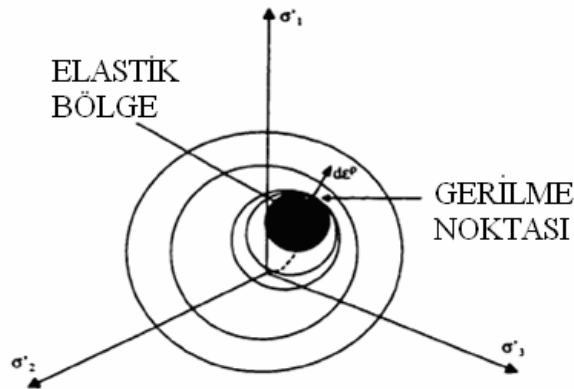


Şekil 4.3 Başlık ve Koni sınır yüzeyleri

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi iki akma yüzeyinin kesiştiği nokta olan P noktası, köşe noktası olarak isimlendirilmektedir. Bu noktada davranış başlık ve uç akma yüzeylerinin her ikisinin de katkısı ile modellenmektedir. Roscoe ve Burland (1968), Prevost ve Hoeg (1975), Lade (1977), Vermeer (1978, 1980) zemin davranışını modellemek için bu tip bir akma yüzeyi önermişlerdir.

4.4.3 Birden Fazla Göçme Yüzeyi Modeli

Daha önce değinildiği gibi, birden fazla göçme yüzeyi içeren bir bünye modeli Mroz (1967) tarafından sunulmuştur. Bu modelde gerilme-şekil değiştirme eğrilerini modellemek için birden fazla akma yüzeyinin oluşturduğu bir ağ kullanılmaktadır. Bu modelin asal gerilme uzayındaki grafiksel gösterimi Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Birden fazla akma yüzeyinin oluşturduğu bir ağ şeklindeki akma yüzeyleri(Mroz, 1967)

En içte yer alan akma yüzeyi yükleme olduğunda hareket eden elastik bölgeyi tanımlamaktadır. Yükleme altında elastik bölge gerilme noktası ile birlikte en yakın komşu akma yüzeyine ulaşıncaya kadar hareket eder. Akma yüzeyleri arasındaki temas akma

yüzeylerinin hiçbir şekilde kesişmeyeceği şekilde teğetsel biçimdedir. Daha sonra yükleme sırasında bütün göçme yüzeyleri bir sonraki aşamaya kadar birlikte hareket ederler. Her bir akma yüzeyi, benzer mekanik özelliklere sahip bölgeleri tanımlar. Böylece, artımsal şekil değiştirmeler ve gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin doğrusal yaklaşımları elde edilmiş olur. Boşaltma sırasında ise gerilme noktası sınıra ulaşana kadar elastik bölge içerisinde hareket eder. Bu süreçte, akma yüzeyi kararlı olarak kalır ve bu yüzden davranış tamamen elastik olur. Farklı bir yönde yükleme olduğunda, malzeme elasto-plastik bir davranış sergiler. Bu modelde elastik bölge büzüldüğünde, tüm davranış elasto-plastik olarak göz önüne alınır. Fakat her bir akma yüzeyinin izini muhafaza etmek ve karışık pekleşme kuralı ile uygulamak modeli oldukça karmaşık bir hale sokmaktadır.

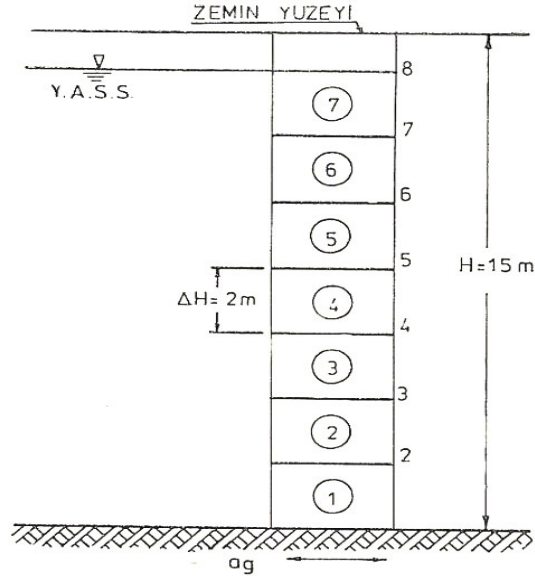
4.4.4 Diğer Modeller

Diğer modeller, karışık pekleşme ve birden fazla akma yüzeyi modellerinin karmaşıklığından kaçınmak için geliştirilmiş modellerdir. Dafalias ve Herrmann (1980) tarafından geliştirilen “Sınır yüzey zemin plastisitesi” olarak isimlendirilen modelde, zemin davranışı bir gerilme ve şekil değiştirme durumu ile sınır yüzey arasındaki mesafeye bağlı olarak tanımlanmaktadır. Daha farklı bir yaklaşım ise Valanis(1971) tarafından endokronik teori olarak geliştirilmiştir. Sınır yüzey modelleri için Dafalis ve Herrmann (1980, 1982) ve Bardet (1986)’da detaylı bilgi verilmektedir. Endokronik teori ile ilgili çalışmalar ise aşağıda özetlenmiş olup ayrıntılı bilgi Bazant ve Kriizek (1976), Valanis ve Read (1982), Bazant vd. (1982) ve Ansal (1978)’de yer almaktadır.

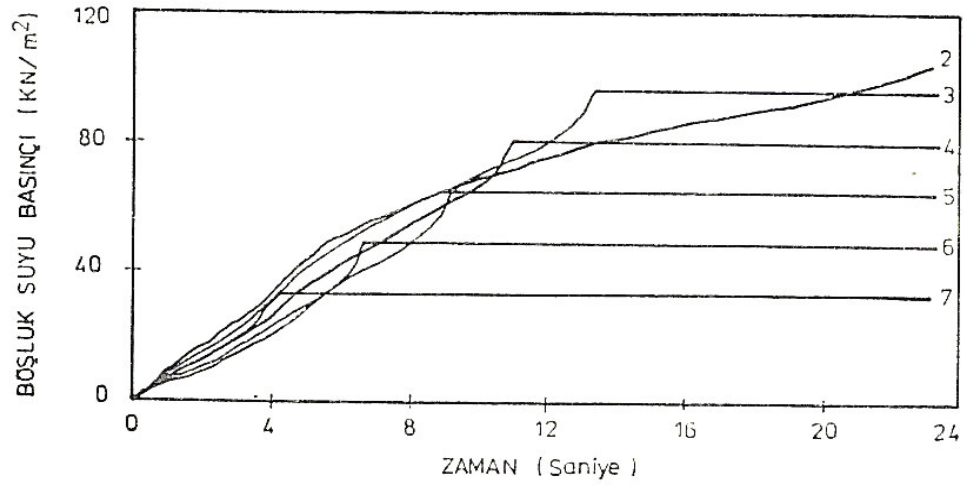
4.4.4.1 Endokronik Teori

Sıvılaşma davranışlarının modellenmesi ve doğada sıvılaşma olasılığının değerlendirilmesi için önerilmiş yöntemler arasında en ilgi çeken yaklaşımlardan bir tanesi de endokronik yapısal modeldir (Bazant ve Kriizek 1976; Ansal vd., 1978, 1980). Endokronik yaklaşımdaki ana kavram içsel zaman değişkeni kavramı olup, bu değişken yardımıyla malzemenin elastik olmayan davranışlarına yol açan enerji sönümlenmesi modellenmektedir.

Endokronik yaklaşım kullanılarak Şekil 4.5’de gösterilen kesit için yapılmış bir çalışmada her bir elemanda oluşan boşluk suyu basıncı artışları belirlenmiş ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Buradan da Endokronik Teori yaklaşımıyla sıvılaşma olayının belirli bir yaklaşıklık içinde genel olarak da gerçekçi bir şekilde model edilebildiği görülmektedir (Ansal, 1982).



Şekil 4.5 Analiz için seçilmiş zemin profili (Ansal, 1982)



Şekil 4.6 Bir zemin tabakasında Endokronik sıvılaşma modeli sonuçları (Ansal, 1982)

4.5 Kumların Sıvılaşma Davranışının Modellenmesinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Anahtar Faktörler

Kumların sıvılaşma davranışı için yukarıda özetlenen bünye modellerindeki farklılıkları oluşturan unsurlar değerlendirildiğinde, kumların sıvılaşmasını modelleyebilecek bir bünyesel gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin, drenajlı, kısmen drenajlı ve drenajsız koşullarda kumun karakteristik davranışını belirleyebilmesi gerekmektedir. Özetlenecek olursa, kumların sıvılaşma davranışını modelleyebilecek bünye modelinde dikkate alınması gerekli faktörler aşağıdaki gibidir:

1. Kumların sıkılık derecesine bağlı bir doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi olmalıdır.
2. Drenajlı ve drenajsız koşullarda kayma gerilmeleri ile hacim değişimi ilişkisi ve bunların boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.
3. İzotropik olmayan ve gerilme izine bağlı bir davranışı dikkate alınmalıdır.
4. Yükleme yönü etkisi dikkate alınmalıdır.
5. Asal gerilmelerin rotasyonu göz önünde bulundurulmalıdır.
6. Boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi etkileri de sıvılaşma analizlerinde dikkate alınması gerektiğinden, bünye modelinin su akımı çözümünü de içermesi gerekmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR: TEK YÖNLÜ SARSMA TABLASI DENEYLERİ

5.1 Giriş

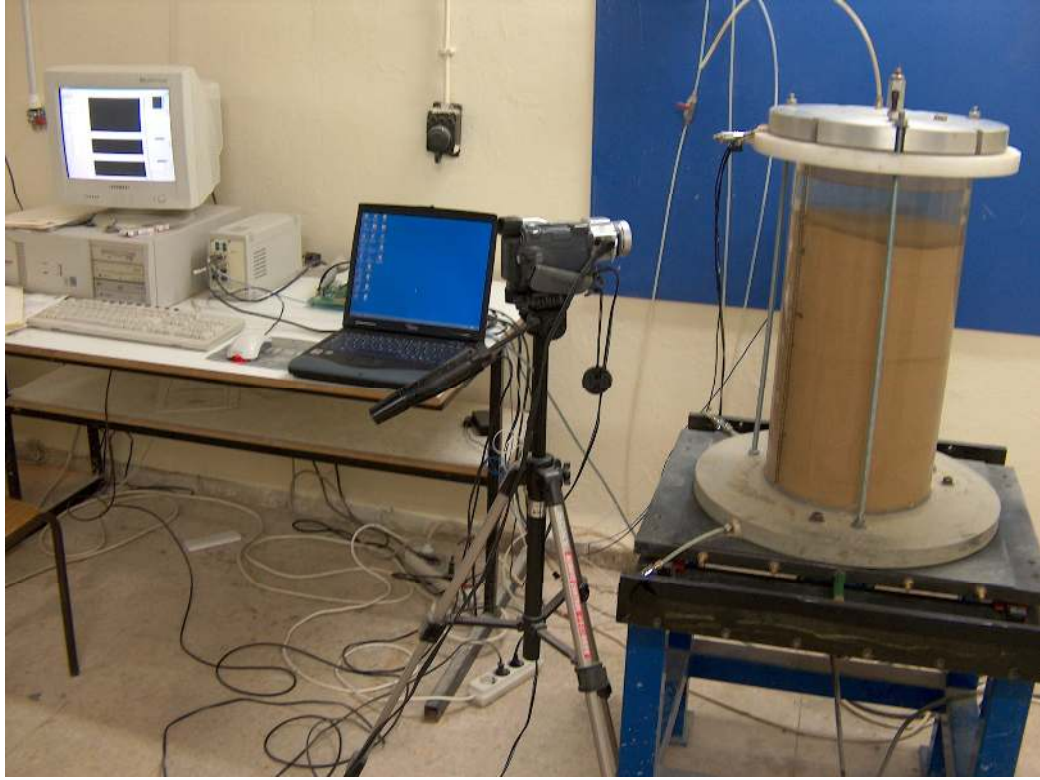
Bu tez çalışması kapsamında suya doymuş tabakalı kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışının araştırılması amacı ile laboratuarda oluşturulan uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde titreşimli yükler uygulanan model deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan ekipmanlar, kum kolonlarını hazırlama yöntemleri ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Titreşimli yükler etkisi altında davranışları deneysel olarak incelenen suya doymuş kum zemin kolonları bir sarsma tablası üzerine yerleştirilmiş pleksiglas bir silindir içerisinde oluşturulmuştur. Suya doymuş kum kolonlarında sıvılaşma oluşturabilmek için sarsma tablası dinamik yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneylerde dinamik yükleme sırasında kum kolonlarında oluşan artık boşluk suyu basınçlarını ölçebilmek için üç farklı derinlikte yerleştirilmiş dinamik boşluk suyu basıncı sensörleri kullanılmıştır. Model deneyler sırasında meydana gelecek oturmaların ve silt ara tabakalı kum kolonlarında silt tabakasının altında oluşması beklenen su filminin dijital renkli bir kamera ile görüntüsü alınarak, sıvılaşma ve sonrasında zemin kolonu yüzey oturması ve su filmi kalınlığının zamanla değişimi belirlenmiştir. Sarsma tablasında uygulanan tek yönlü dinamik yüklemenin ivme zaman değişimi ise sarsma tablası üzerine yerleştirilmiş bir ivme ölçer ile kaydedilmiştir.

Aşağıdaki bölümlerde önce deneysel çalışmada kullanılan deney sistemi ve ekipmanlar hakkında bilgi verilmiş, daha sonra deneysel çalışmalar sunulmuştur.

5.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan Deney Sistemi ve Ekipmanlar

Deprem yükleri altında suya doymuş tabakalı kumlu zeminlerin davranışı ile oluşabilecek olası sıvılaşma ve sonrası davranışı araştırmak için kurulan deney sistemi Şekil 5.1’de gösterilmektedir. Şekil 5.1’den görüleceği üzere kurulan deney düzeneği, zemin modelini oluşturmak için kullanılan bir pleksiglas silindir, sarsma tablası düzeneği ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır.



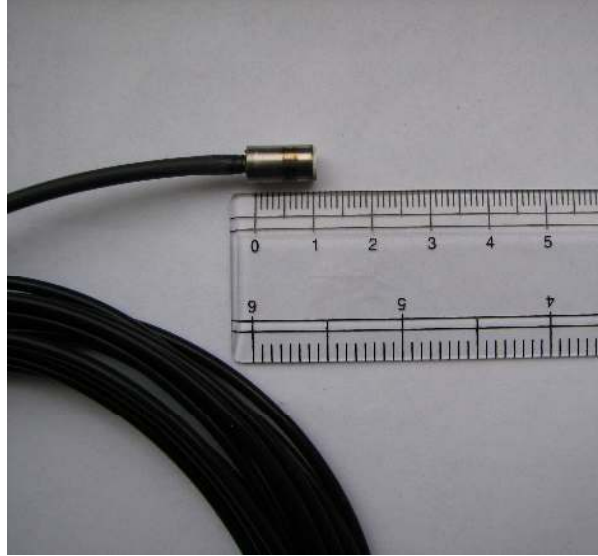
Şekil 5.1 Deney düzeneği

Deneyisel çalışmada zemin modelini oluşturmak için kullanılan silindirin iç çapı 25.4 cm, et kalınlığı 10 mm ve yüksekliği ise 60 cm olup zemin davranışını görsel olarak izleyebilmek amacı ile saydam pleksiglastan imal ettirilmiştir. Pleksiglas silindir Şekil 5.1’ de görüleceği gibi sarsma tablası üzerine bir taban plakası yardımı ile sabitlenmiştir. Pleksiglas silindirin taban plakasında içerisini su ile doldurmak ve içerisindeki suyu boşlatabilmek için iki adet drenaj kanalı oluşturulmuştur. Deneyler sırasında içerisinde kum kolonu oluşturulan silindir sarsma tabla üzerine sabitlenmiş ve uygulanan yatay ivmenin zamanla değişimi ivme ölçer ile kaydedilmiştir. Sıvılaşma sırasında kum kolonunda meydana gelen yüzeysel oturmanın ve silt ara tabakalı kum kolonlarında gözlenen su filmi kalınlığının zamanla değişimini belirlemek için ise dijital bir kamera tarafından alınan görüntülerden faydalanılmıştır. Elde edilen bu görüntüler bir görüntü işleme sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

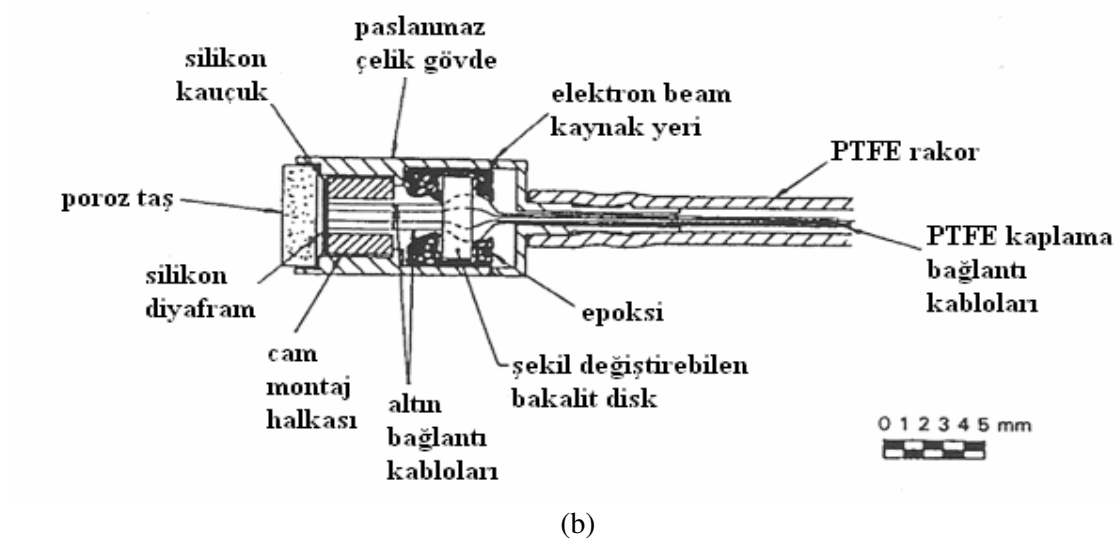
Deneylerde kum kolonunda oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmek için kullanılan dinamik boşluk suyu basıncı sensörlerine, ivme ölçere, data toplama sistemine ve görüntü işleme sistemine ait teknik özellikler aşağıda özetlenmiştir.

5.2.1 Boşluk suyu basıncı sensörleri ve ivme ölçerin özellikleri

Boşluk suyu basıncı sensörü olarak DRUCK tarafından üretilen ve Şekil 5.2’de gösterilen PDCR81 tipi boşluk suyu basıncı sensörü kullanılmıştır. Sensörlerin doğru ölçüm alıp almadıkları sabit basınç uygulayan bir sistem kullanılarak test edilmiştir. PDCR81 boşluk suyu basıncı sensörüne ait teknik özellikler Çizelge 5.1’ de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.2 Druck PDCR 81 Boşluk suyu basıncı sensörü (a) Sensörün görünümü(b) Sensörün detayı

Çizelge 5.1 DRUCK PDCR 81 Boşluk suyu basıncı sensörüne ait teknik özellikler

Özellikleri	
Dinamik Ölçüm aralığı	0-100 kPa
Ölçüm hassasiyeti	0.020mV/V/mba
Çözünürlük	sonsuz
Doğruluk	$\pm \%0.2$
Çalışma sıcaklığı	-20 ⁰ C° - +120 ⁰ C

Deneyler sırasında sarsma tablası tarafından uygulanan yatay ivmenin zamanla değişimi Şekil 5.3’ de gösterilen PCB Piezotronics tarafından üretilmiş tek eksenli kuvartz kristalli ivme ölçer sarsıntı yönünde yerleştirilerek ölçülmüştür. Kullanılan ivme ölçer 19.1 mm çapında ve 23.6 mm yüksekliğinde olup teknik özellikleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir. İvme ölçerin kalibrasyonu için üretici firma tarafından verilen kalibrasyon faktörleri kullanılmış olup ivme-ölçerin test edilmesi amacı ile Y.T.Ü Makine Mühendisliği Makina Teorisi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı’na ait ve kalibrasyonu TÜBİTAK tarafından kontrol edilmiş “Vibration Analyser” isimli bir cihaz kullanılmıştır.



Şekil 5.3 PCB 353B33 İvme ölçer

Çizelge 5.2 PCB 353B33 ivme ölçere ait teknik özellikler

Performans Özellikleri	
Dinamik Ölçüm aralığı	$\pm 50g$ pk
Ölçüm hassasiyeti	100 mV/g
Çözünürlük	0.0005 g rms
Genlik doğrusalılığı	% 1
Rezonans frekansı	0.7-6.500 Hz ($\pm \%10$)

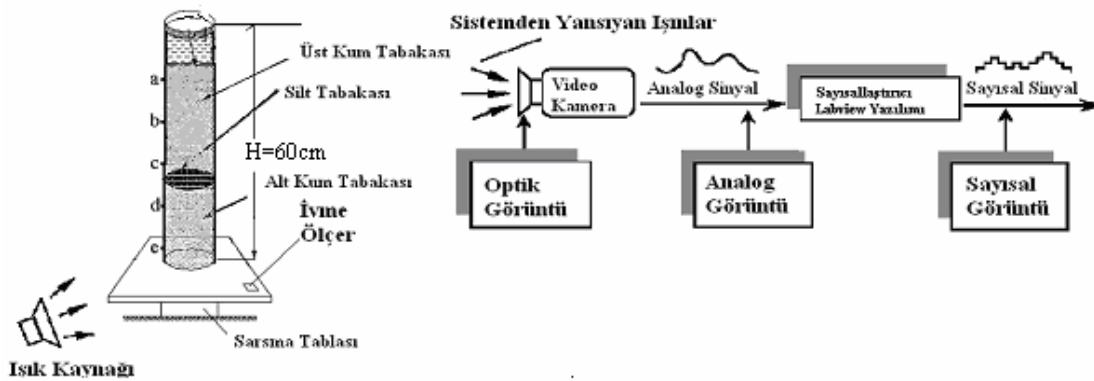
5.2.2 Veri toplama sistemi

Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan boşluk suyu basıncı sensörlerinden elde edilen sinyallerin güçlendirilmesi amacı ile PHOENIX tarafından üretilmiş bir sinyal güçlendirici kullanılmış ve basınç sensöründen alınan sinyaller 10 kat güçlendirilmiştir. İvme ölçerden alınan sinyalleri bilgisayara aktarmak için ise PCB tarafından üretilmiş A/D (Analog sinyalleri dijital sinyallere çeviren) tipi 4 kanallı bir sinyal koşullayıcı kullanılmıştır. Sinyal koşullayıcı gelen sinyallerin kuvvetine göre kazancı 1,10 ve 100 kat artıracak şekilde

ayarlanabilmektedir. Deneyler sırasında veri toplamayı hassas ve kolay bir şekilde yapabilmek ve sensörlerden alınan sinyalleri sayısal değerlere dönüştürmek için, National Instruments tarafından üretilmiş saniyede 200.000 örnek alma kapasitesine sahip bir data toplama kartı kullanılmış ve verilerin bir bilgisayarda toplanması sağlanmıştır. Bilgisayara kaydedilmiş olan dijital sinyalleri boşluk suyu basıncı değerlerine ve ivme değerlerine dönüştürmek için ise, LABVIEW paket programında bu tez çalışması için hazırlanan bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Hazırlanan bilgisayar programı saniyede 1000 örnek alacak şekilde ayarlanmış olup bu örnek alma hızının deneysel çalışma sırasında dinamik değerleri yeterli bir şekilde yakalama kapasitesine sahip bir hız olduğu görülmüştür.

5.2.3 Görüntü işleme sistemi

Model deneyler sırasında sıvılaşma ve sonrası meydana gelecek oturmaların ve silt ara tabakalı kum kolonlarında silt tabakası altında oluşacak su filmi kalınlığının zamanla değişimini belirleyebilmek için bir dijital renkli kamera ve bu kamera görüntülerini bilgisayar ortamına aktaran bir görüntü toplama kartı kullanılarak, LabVIEW ortamında bir görüntü işleme (Image Processing) programı geliştirilmiştir. Bu amaçla hazırlanan program, daha önce değinilen ivme ölçer ve transdüserlerden ölçüm alma programı ile eş zamanlı olarak çalışarak, 1 sn aralıklarla sistemden alınan görüntüleri bilgisayara kaydetmektedir. Alınan görüntüler daha sonra yine aynı görüntü işleme programı yardımı ile sayısal değerlere dönüştürülerek, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri elde edilmiştir. Görüntü işleme programının işleyiş mantığı Şekil 5.4 'de görülmektedir.



Şekil 5.4. Görüntü İşleme Programının İşleyiş Mekanizması

5.2.4 Sarma tablası ve özellikleri

Deprem yükleri altında suya doymuş tabakalı kumlu zeminlerin sıvılaşma ve sonrası davranışını incelemek amacı ile gerçekleştirilen deneylerde, kum kolonu tabanında etkiyecek dinamik yüklemeyi oluşturmak amacı ile bir sarsma tablası imal ettirilmiştir. Görünümü Şekil 5.5’ te verilen sarsma tablası 75 cmx75 cm boyutlarında olup üzerinde kum kolonu oluşturulan pleksiglas silindirin taban plakasının monte edildiği 25 mm kalınlığında paslanmaz çelik bir plaka mevcuttur.



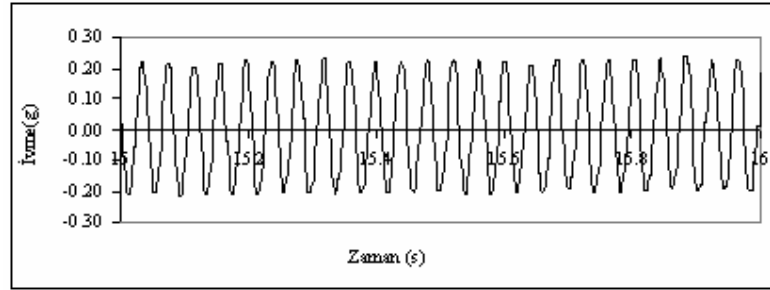
Şekil 5.5 Sarsma Tablasının Görünümü

Sarsma tablasının yatayda tek yönlü hareketini sağlamak amacı ile, çelik plak doğrusal yataklar üzerine oturtulmuş ve böylelikle diğer yönlerdeki hareketi engellenmiştir. Tablanın hareketi elektrikli bir vibratör ile sağlanmakta ve motor bir kontrol paneline bağlı bilgisayar tarafından kontrol edilmektedir. Kullanılan sarsma tablasının ve üzerindeki zemin kütlesinin dinamik hareketi frekansa bağımlı olduğu için, farklı frekans değerlerinde deney süresince uygulanan ivme genlikleri ve bu ivmelerin tekrar edilebilirliği araştırılmış ve uygulanan ivme değerlerinin tekrar edilebilir olduğu görülmüştür. Bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, 3 farklı frekans değeri ve bu frekans değerlerinde üretilen üç farklı ivme genliği kullanılmıştır. Bu ivme genlikleri sırası ile 25Hz, 30Hz ve 35 Hz frekans değerlerine karşılık gelen 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme değerleridir. Uygulanan titreşimler sabit genlikli ve sinüzoidal değişime sahip olup, toplam çevrim sayısı yaklaşık 300 olacak şekilde uygulama süreleri ayarlanmıştır. Uygulanan titreşimlerin özellikleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

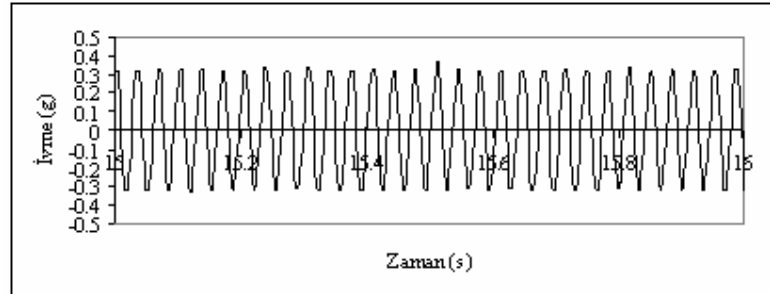
Çizelge 5.3 Uygulanan Titreşimlerin Özellikleri

Uygulanan Frekans (Hz)	İvme Genliği(g)	Uygulama Süresi (s)	Toplam Sayısı	Çevrim
25	0.23	12	300	
30	0.30	10	300	
35	0.40	8.6	301	

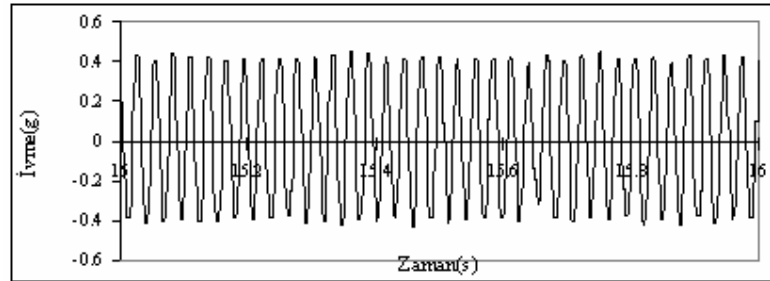
0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde uygulanan titreşimlerin 1 saniye sürede değişimleri Şekil 5.6’da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.6 Uygulanan titreşimlerin 1 saniye sürede değişimleri (a) 0.23g (b) 0.30g (c) 0.40g

5.2.5 Kum yağmurlama düzeneği

Sıvılaşma deneylerinde kullanılacak kum kolonunu oluşturmak amacı ile, pleksiglas bir silindir içerisine kum malzemenin kontrollü bir şekilde konulabilmesi için literatürde verilen yöntemler araştırılmıştır. Sonuç olarak, üzerinde model deneyler uygulanacak kum kolonlarının üniform sıklıkta oluşturulabilmesi için bir “Kum Yağmurlama Sistemi” imal ettirilmiştir. İmal ettirilen kum yağmurlama sistemi Şekil 5.6’ da görüldüğü gibi bir huni ve bu huni ağzına monte edilmiş bir borudan oluşmaktadır. Kumun pleksiglas silindir içerisine yağdırılması huni ile boru arasına konulmuş olan bir kapak yardımı ile kontrol edilebilmektedir. Kapak açıklığı ayarlanarak kumun akış hızı da ayarlanabilmektedir. Boru içerisinde ayrıca boru yüksekliği boyunca farklı mesafelerde kumun uniform bir şekilde yağması için yerleştirilmiş elekler de bulunmaktadır. Kum yağmurlama sistemine yerleştirilmiş bir motor yardımı ile huni ve huni ağzına yerleştirilmiş boru sabit bir hızla düşey yönde hareket edebilmekte ve böylece kumun sabit yükseklikten dökülmesi sağlanarak üniform sıklıkta bir kum kolonu hazırlanması gerçekleştirilmektedir. Kumun pleksiglas silindir içerisine yağmurlanması Şekil 5.8’de görüldüğü gibi olmaktadır.



Şekil 5.7. Kum Yağmurlama Sistemi



Şekil 5.8. Kumun Pleksiglas Silindir İçerisine Yağmurlanması

Kum yağmurlama düzeneğinde farklı rölatif sıklıkların elde edilmesine yönelik çok sayıda deneme yapılmış, rölatif sıklığın kumun düşme yüksekliği ve kumun akış hızı tarafından kontrol edilebildiği görülmüştür. Yapılan bu denemelerde aynı zamanda istenilen sıklıkların tekrar edilebilir olup olmadığı kontrol edilmiştir. Farklı rölatif sıklık değerlerinin elde edilmesinde kumun akış hızı, borunun yükselme hızı ve elek yerleri değişken olarak kullanılmıştır.

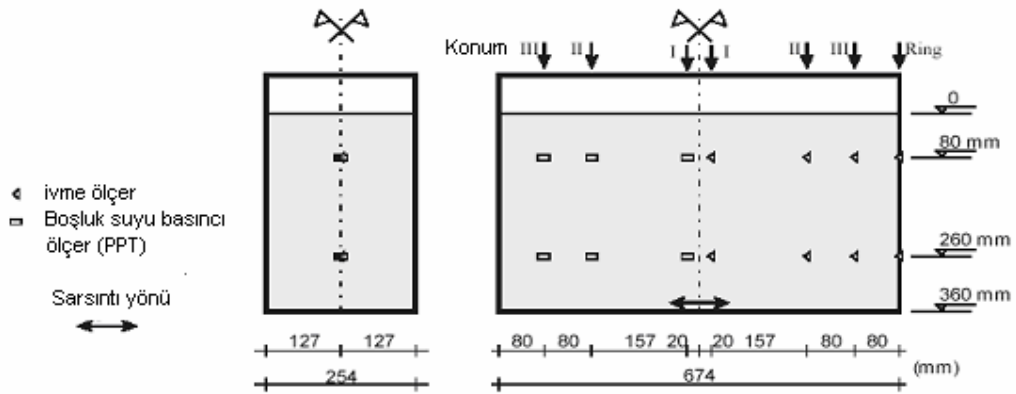
5.2.6 Pleksiglas hücre ve model deneylerde sınır koşullarının etkisi

Sıvılaşma ve dinamik zemin davranışının incelenmesi amacı ile yapılan model deneyler genellikle sonlu sınırları olan kapalı kutularda yapıldığı için deney sonuçlarını etkileyebilecek az ya da çok sınır etkileri ortaya çıkabilmektedir. Sıvılaşma ve sonrasındaki kum davranışını modelleme çalışmalarında sınır koşullarının etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu etkileri azaltabilmek için ve gerçekte arazide mevcut yarı sonsuz durumu modelleyebilmek için tasarlanan deney tankları da bu konuda yapılan ilk çalışmalardan günümüze kadar oldukça büyük değişimler göstermiştir. Model deneylerde kullanılan farklı sınır özelliklerine sahip tanklar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

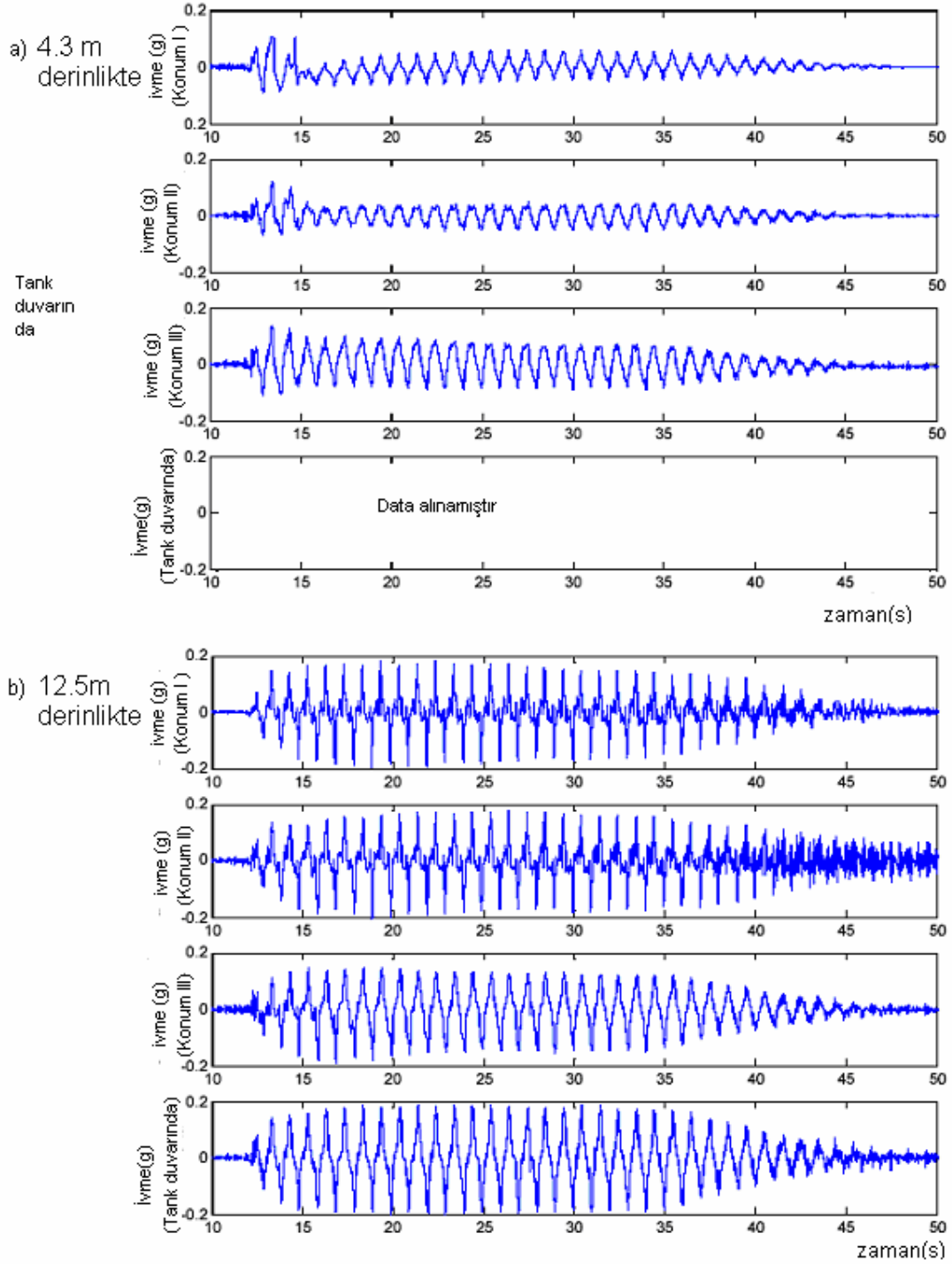
1. Rijit duvarlı tanklar
2. Laminar model tankları
3. ESB (Equivalent Shear Beam) tipi tanklar

Teymur(2002) yukarıda bahsedilen model deney tanklarının özellikleri ile ve bu tankların avantaj ve dezavantajlarını ayrıntılı bir şekilde anlatmaktadır. Yaygın olarak günümüzde santrifüj deneylerinde kullanılan laminar model tankları (Hushmand, 1988) ve ESB tipi model deney tankları arazi sınır koşullarını temsil etmesi bakımından en çok tercih edilen tank tipleridir.

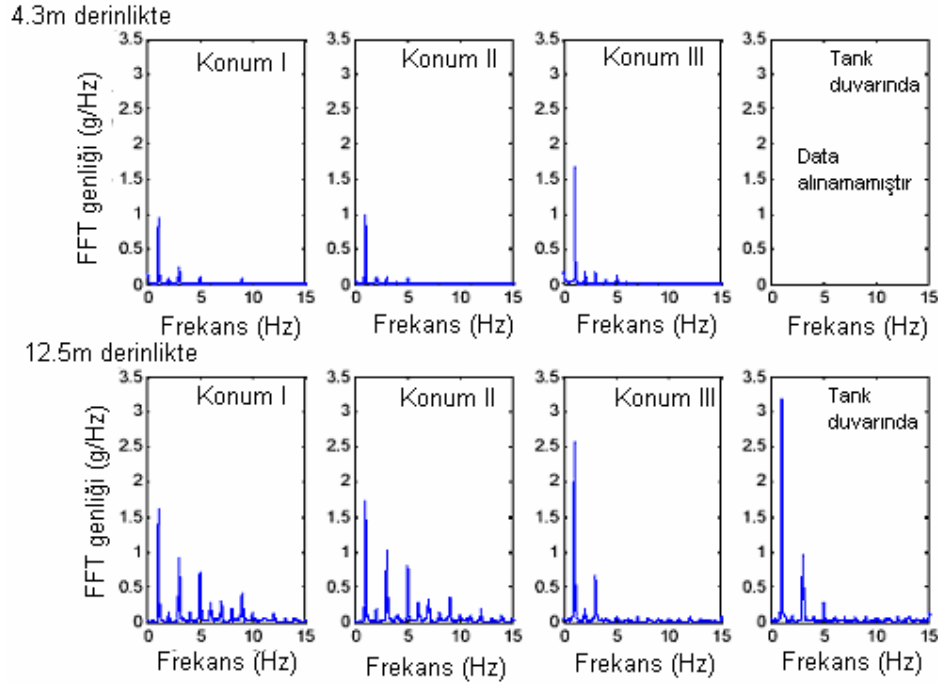
Sıvılaşma ve dinamik zemin davranışını inceleyen model deneylerde sınır etkilerinin ölçüm sonuçları üzerindeki etkileri Teymur (2002) ve Coelho (2003) tarafından santrifüj deneyleri ile araştırılmıştır. Coelho(2003) tarafından yapılan çalışmada sınır etkilerini incelemek için tankın çeşitli yerlerine, modelin merkezinde (Konum I), tankın kenarlarından 160 mm uzaklıkta (Konum II) ve tankın kenarlarından 80 mm uzaklıkta (Konum III) ivme ölçerler ve artık boşluk suyu basıncı ölçerler yerleştirilmiş (Şekil 5.9) ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasındaki elde edilen ölçümler prototip olarak 4.3 m ve 12.5 m'ye karşılık gelen derinlikler göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Bu derinliklerde elde edilen ve Şekil 5.10'da verilen ivme değişimlerinden görüleceği gibi Konum I ve Konum II' de oldukça benzer değerler ölçülürken, yüksek tank rijitliğinden dolayı Konum III'de daha büyük değerler ölçülmüştür. Bu farklılık ivme ölçümlerinin FFT analizlerinden de görülebilmektedir (Şekil 5.11).



Şekil 5.9 Model deney tankı ve ivme ölçerler ve artık boşluk suyu basıncı ölçerlerin konumu (Coelho vd. 2003)



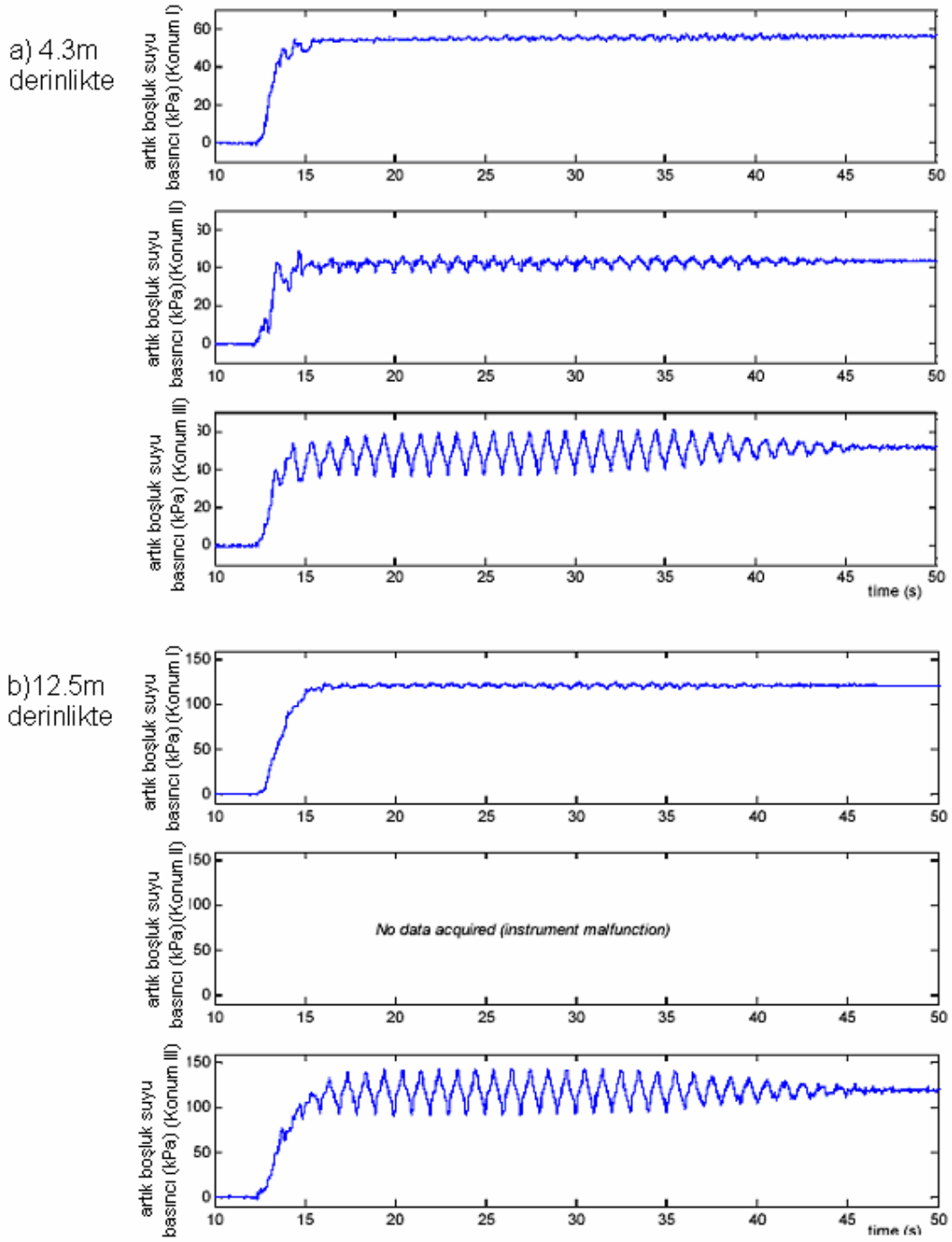
Şekil 5.10 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlarda ölçülmüş yatay ivme değişimleri (Coelho vd. 2003)



Şekil 5.11 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlardaki yatay ivmelerin FTT analizleri (Coelho vd. 2003)

Şekil 5.12’de prototip ölçekte gevşek kumda ölçülmüş artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Tankın sınır etkilerinin boşluk suyu basınçları üzerindeki etkilerini incelemek için ivme ölçümlerinde yapılan karşıtırmalara benzer olarak farklı derinliklerde (4.3m ve 12.5m) ve farklı konumlarda yer alan boşluk suyu basıncı sensörlerinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, model deneyler sırasında sınırların dinamik zemin davranışını önemli bir şekilde etkileyebildiğini göstermektedir. Coelho (2003), model kenarlarındaki zemin davranışının dikkate alınmaması ve merkezde yapılacak ölçüm sonuçlarının kullanılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Teymur (2002) kuru kum ve suya doymun kumlar üzerinde 15 adet santrifüj deneyi yaparak sınır koşullarının etkisini araştırmıştır. Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda sınır etkilerinden dolayı kuru kum modellerinde ivmelerde büyüme, suya doymun modellerde ise sıvılaşma sonucu ivmelerde azalma olduğu görülmüştür. İvmelerdeki artışın özellikle tank duvarları boyunca oluşan P dalgalarından kaynaklandığı, artık boşluk suyu basıncı oluşumlarının da oldukça farklılık gösterdiği gözlenmiş ve bu durumun tankın rijitliği ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca; deney sırasında P dalgaları oluşumundan dolayı zeminin daha fazla deforme olduğu ve tank kenarlarında zemin davranışının bundan etkilendiği belirtilmiştir.



Şekil 5.12 Gevşek kumda farklı derinliklerde ve farklı konumlardaki artık boşluk suyu basıncı ölçümleri (Coelho vd. 2003)

Sonuç olarak; Teymur (2002) sarsıntı sırasında zemin ile tank duvarlarının etkileşimi nedeni ile, sınır etkilerinin P dalgalarının oluşumuna ve artık boşluk suyu basınçları ile ivme değişimlerinin farklılaşmasına neden olduğunu belirtmekte ve model deneylerde enstrümantasyonun model zeminin merkezinde yerleştirilerek ölçüm alınmasını önermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan model deneylerde, Teymur (2002) ve Coelho (2003) tarafından gözlenen, model deneylerde sınır koşullarının ölçümlere olan etkisi göz önünde bulundurularak, boşluk suyu basıncı sensörleri model kum kolonunun ortasına yerleştirilerek sınır etkileri azaltılmaya çalışılmıştır.

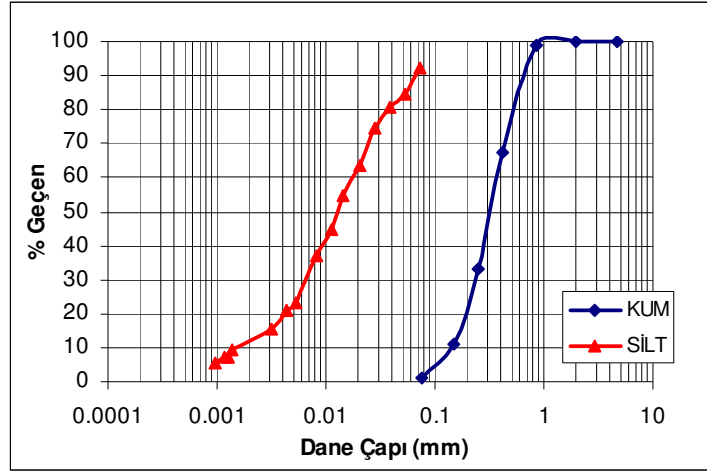
5.3 Model Deneyler ve Deney Programı

Tabakalı kumlarda sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışı incelemek için 5 farklı seriden oluşan 60 adet deney yapılmıştır. Bu 5 farklı seri deney uniform kum kolonu deneylerinden, farklı sıklıktaki tabakalı kum kolonu deneylerinden ve silt ara tabakalı kum kolonu deneylerinden oluşmaktadır. Deneyler sırasında, üç farklı derinliğe yerleştirilmiş olan boşluk suyu basıncı sensörlerinden artık boşluk suyu basıncının zamanla değişimi ölçülmüş, ve her bir deneyden digital kamera yardımı ile 1sn aralıklarla görüntü alınmıştır.

Yapılan deneylere ait özellikler, kum kolonlarının hazırlanma biçimi, kullanılan kumun ve siltin özellikleri, her bir seri deneyin amacı ve elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

5.3.1 Kullanılan kum ve silt zeminlerin özellikleri

Model deneylerde kullanılan kumun ve siltin özelliklerini belirleyebilmek için laboratuarda bazı deneyler yapılmıştır. Kumun granülometrik özelliklerini belirleyebilmek için elek analizi, siltin granülometrik özelliklerini belirlemek için ise hidrometre analizi yapılmış ve deneylerde kullanılan kum ve silt zeminlerin granülometri eğrileri Şekil 5.13’de verilmiştir. Kumun maksimum ve minimum boşluk oranı değerlerini belirleyebilmek için Adalier (1992) tarafından kullanılan yöntemden faydalanılmış ve kumun maksimum ve minimum boşluk oranı ile diğer granülometrik özellikleri Çizelge 5.4’ de verildiği gibi elde edilmiştir.

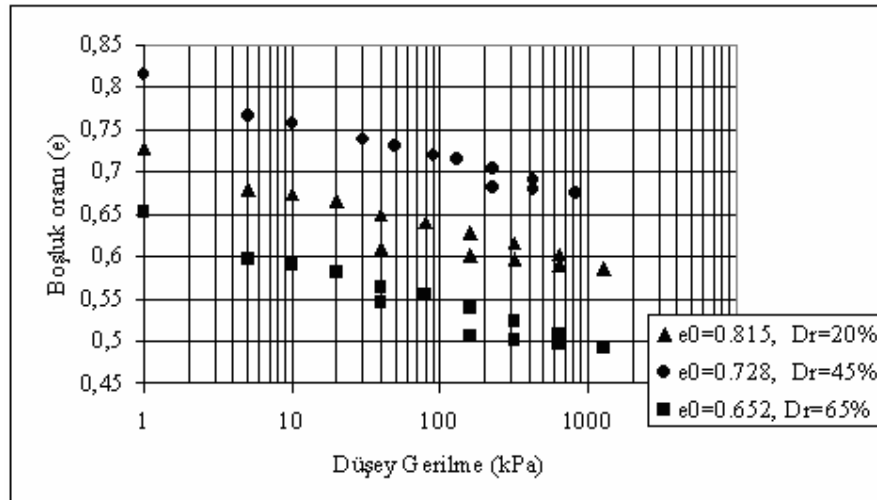


Şekil 5.13. Deneylerde kullanılan kum ve silt zeminin granülometri eğrileri

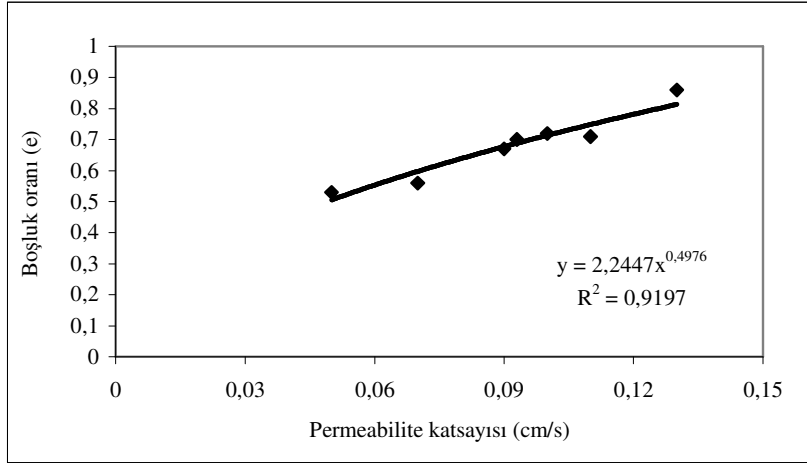
Çizelge 5.4 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kumun Özellikleri

Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sembolü	SP
Özgül Yoğunluk, G_s	2.65
Maksimum Boşluk Oranı, e_{max}	0.88
Minimum Boşluk Oranı, e_{min}	0.50
Ortalama Dane Çapı, D_{50} (mm)	0.31
Efektif Çap, D_{10} (mm)	0.15

Farklı başlangıç sıklık değerlerinde hazırlanmış kum numuneleri üzerinde ayrıca bir boyutlu konsolidasyon deneyleri ve sabit seviyeli permeabilite deneyleri yapılmıştır. Farklı sıklıklarda hazırlanmış örneklerden elde edilen efektif gerilme- boşluk oranı değişimi ve permeabilite-boşluk oranı değişimi sırası ile Şekil 5.14’ de ve Şekil 5.15’ de verilmiştir.



Şekil 5.14. Bir boyutlu konsolidasyon deneyleri sonucunda elde edilen efektif gerilme-boşluk oranı değişimleri



Şekil 5.15. Sabit seviyeli permeabilite deneyleri sonucunda elde edilen permeabilite-boşluk oranı değişimleri

5.3.2 Kum kolonlarının hazırlanması

İstenilen sıklıkta kum kolonları hazırlanması için kum yağmurlama sisteminden ve sarsma tablasından faydalanılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında gevşek kum ($D_r = \%40$) kolonlarının oluşturulmasında kum yağmurlama sisteminden, sıkı tabakaların oluşturulmasında ise aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılacağı gibi hem kum yağmurlama sisteminden hem de sarsma tablasından yararlanılmıştır. Farklı sıklıklarda hazırlanmış kum kolonlarının oluşturulması sırasında kuru kum, yağmurlama sistemi yardımı ile belirli bir seviyeye kadar içi su ile dolu olan pleksiglas silindir içerisine yağmurlanmıştır. Bu yöntem uniform sıklıkta ve suya doygunluk derecesi yüksek kum kolonu oluşturmak için yapılan çeşitli denemeler sonucunda en uygun yöntem olduğu görülerek tercih edilmiştir. Bieganousky ve Marcuson (1976) suya yağmurlama metodu ile hazırlanmış kumların %97 suya doygunluk derecesine sahip olurken, kuru yağmurlama ile oluşturulan ve yukarı yönlü sızıntı ile suya doyurulmaya çalışılan kumların suya doygunluk derecesinin %83 ile %97 arasında değişeceğini belirtmektedirler. Suya yağmurlama yöntemi ile %97 veya %97'den daha büyük suya doygunluk derecesine sahip kum kolonları oluşturulduğu düşünülmektedir. Kum kolonlarının suya doygunluk derecesini artırmak için bu tür model deney çalışmalarında sık başvurulan bir yöntem olan vakum uygulama işlemi deneysel çalışma sırasında birkaç kez deneme amaçlı olarak yapılmış, fakat uygulanan vakumun kum kolonunun üst tabakasını ve yüzeyini bozduğu görülmüştür. Bu nedenle model deneylerde vakum uygulanması işleminden vazgeçilmiştir.

Boşluk suyu basıncı sensörlerinin üç farklı derinlikte yerleştirilebilmesi için kum kolonları tabakalar halinde hazırlanarak boşluk suyu basıncı sensörleri istenilen derinliklere yerleştirilmiştir. Kum kolonlarının tabakalar halinde oluşturulması için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. Etüvde kurutulmuş ve istenilen sıklıkta kum tabakası oluşturmak için gerekli miktarda kum, içi kısmen su ile dolu olan pleksiglas silindir içine, boşluk suyu basıncı sensörünün yerleştirileceği seviyeye kadar yağmurlanmıştır.
2. Boşluk suyu basıncı sensörü dikkatli ve oluşturulan kum tabakasını örselemeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Sensörler, uygulanan dinamik yüklemenin boşluk suyu basıncı ölçümlerinin doğruluğunu etkilememesi amacı ile sarsıntı yönüne dik olarak yerleştirilmiştir. Sensörün kabloları ise pleksiglas borunun çeperine yapıştırılmıştır.
3. Bir sonraki kum tabakası da birinci adımda anlatıldığı gibi oluşturularak diğer boşluk suyu basıncı sensörü yerleştirilmiştir.
4. Boşluk suyu basıncı sensörleri belirlenen derinliklere yerleştirildikten sonra ve kum kolonu yüksekliği 45cm'e ulaşınca yağmurlama işlemi bitirilmiş ve oluşturulan kum kolonunun üst yüzeyi dikkatli bir şekilde düzeltilmiştir.

Yağmurlama işlemi bittikten sonra pleksiglas silindirin üzeri üst başlık ile kapatılarak, boşluk suyu basıncı sensörlerinin suya doymun hale gelmesi için bir gün beklenilmiştir. Aksi halde, yapılan denemeler sonucunda boşluk suyu basıncı sensörlerinden doğru okuma alınamadığı görülmüştür.

Deneysel araştırma kapsamında farklı sıklıklarda tabakalı kum kolonları da hazırlanmıştır. Alt tabakanın daha sıkı ($Dr = \%50$, $Dr = \%60$, $Dr = \%70$), üst tabakanın ise gevşek kum tabakasından oluştuğu durumlarda, yukarıda maddeler halinde tarif edilen yöntem ek olarak sarsma tablası yardımı ile her bir tabaka sarsılarak istenilen sıklık derecesine ulaşması sağlanmıştır.

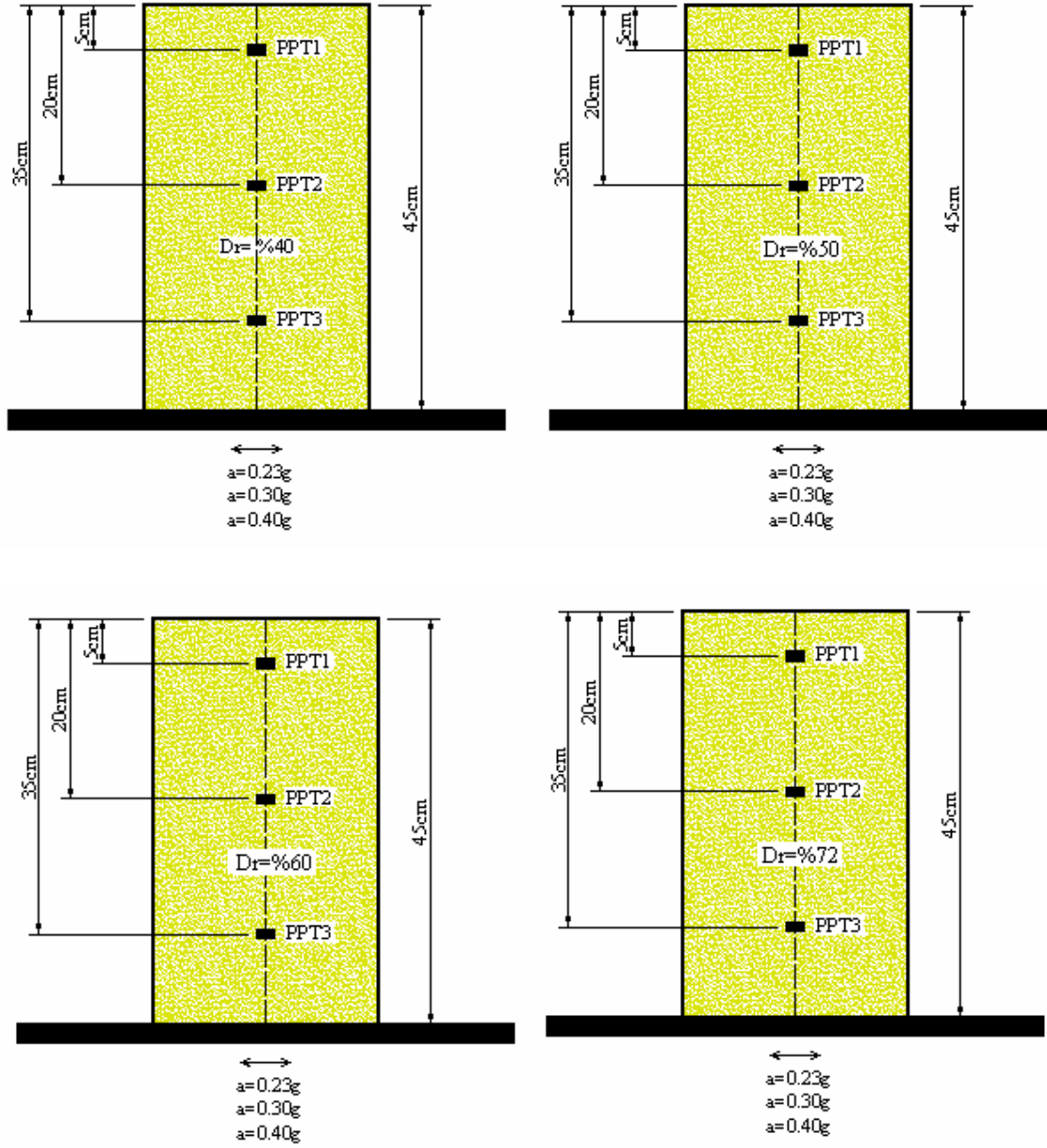
5.3.3 Birinci seri deneyler (Uniform kum kolonu deneyleri)

Birinci seri deneyler toplam 12 adet deneyden oluşmaktadır. Çizelge 5.5'te gösterildiği gibi bu deneylerde 4 farklı sıklıkta hazırlanmış ($Dr = \%40$, $Dr = \%50$, $Dr = \%60$, $Dr = \%72$) uniform kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde titreşimli yüklemelere maruz

bırakılarak, boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi ile meydana gelen oturmaların zamanla değişiminin araştırılması amaçlanmıştır. Farklı sıklıklarda uniform kum kolonu deneyleri için hazırlanan modellerin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Şekil 5.16'dan görüleceği gibi uniform kum kolonları 45cm yükseklikte olup, model içerisine üç farklı derinlikte boşluk suyu basıncı sensörleri yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında yüzeysel oturmanın zamanla değişimini ölçebilmek için video kamera ile 1sn aralıklarla görüntü alınmış, daha sonra ise bu değerler sayısallaştırılmıştır. Veri toplama işlemi, titreşimler sona erdikten sonra da boşluk suyu basınçları sönümlenerek kararlı duruma ulaşınca ve yüzeysel oturmalar tamamlanınca kadar devam ettirilmiştir. Birinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 Birinci seri deneylerin özeti

Model No.	Model	Model Yüksekliği (cm)	a_{max} (g)	D_r (%)	
				Üst Tabaka	Alt Tabaka
U1-A	Uniform kum	45	0.23	40	
U2-A	Uniform kum	45	0.23	50	
U3-A	Uniform kum	45	0.23	60	
U4-A	Uniform kum	45	0.23	72	
U1-B	Uniform kum	45	0.30	40	
U2-B	Uniform kum	45	0.30	50	
U3-B	Uniform kum	45	0.30	60	
U4-B	Uniform kum	45	0.28	72	
U1-C	Uniform kum	45	0.40	40	
U2-C	Uniform kum	45	0.40	50	
U3-C	Uniform kum	45	0.40	60	
U4-C	Uniform kum	45	0.40	72	



Şekil 5.16 Birinci seri model deneylerin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi

5.3.4 İkinci seri deneyler

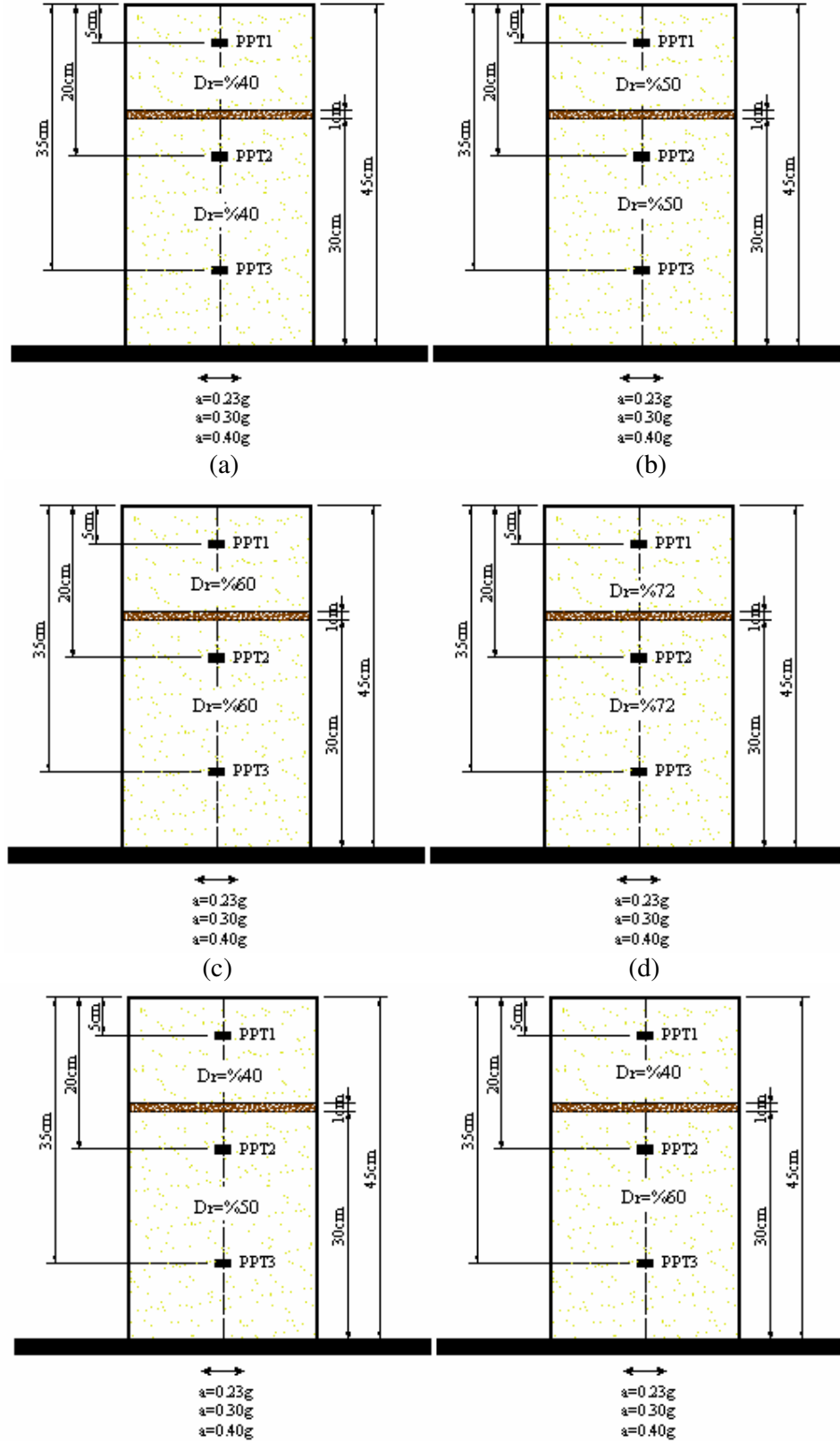
İkinci seri deneyler, toplam 21 adet deneyden oluşmaktadır. Çizelge 5.6’da özetlendiği gibi bu deneyler ince bir silt ara tabakası içeren farklı sıkılıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde uygulanmıştır. Bu deneylerde silt ara tabakasının üzerinde ve altında %40, %50, %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda kum tabakaları oluşturulan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve

0.40g ivme genliklerinde titreşimlere maruz bırakılmış, boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi yanında, meydana gelen oturmaların ve silt ara tabakası altında su filmi oluşumunun zamanla değişimi araştırılarak, silt ara tabakalı kumların dinamik yükler altındaki davranışı incelenmeye çalışılmıştır.

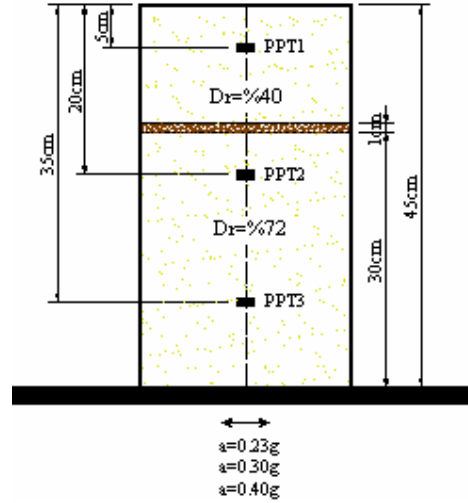
Çizelge 5.6 İkinci seri deneylerin özeti

Model No.	Model	Model Yüksekliği (cm)	a_{max} (g)	D_r (%)	
				Üst Tabaka	Alt Tabaka
L1-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	40	40
L2-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	50	50
L3-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	60	60
L4-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	72	72
L5-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	40	50
L6-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	40	60
L7-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	40	72
L1-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	40	40
L2-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	50	50
L3-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	60	60
L4-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	72	72
L5-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	40	50
L6-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	40	60
L7-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	40	72
L1-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	40	40
L2-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	50	50
L3-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	60	60
L4-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	72	72
L5-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	40	50
L6-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	40	60
L7-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	40	72

İkinci seri deneyler kapsamında hazırlanan modellerin görünümü deneylere ait konfigürasyon ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi L1, L2, L3, L4, L5, L6 model deneyleri için Şekil 5.17’de, L7 modeli için ise Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.17 İkinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L1, L2, L3, L4, L5, L6 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi



Şekil 5.18 İkinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L7 deneyinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterildiği gibi silt ara tabakalı kum kolonu modelleri 45 cm yükseklikte olup, üç farklı derinlikte yerleştirilmiş boşluk suyu basıncı sensörleri içermektedir. Deneyler sırasında yüzeysel oturmanın ve silt tabakası altında oluşan su filmi kalınlığının zamanla değişimi video kamera ile 1 saniye aralıklarla alınan görüntülerin sayısallaştırılması ile belirlenmiştir. Bu deneylerde veri toplama işlemi, boşluk suyu basınçları sönümlenerek kararlı duruma ulaşınca ve su filmi ortadan kayboluncaya kadar devam ettirilmiştir. İkinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 5.5’te verilmiştir.

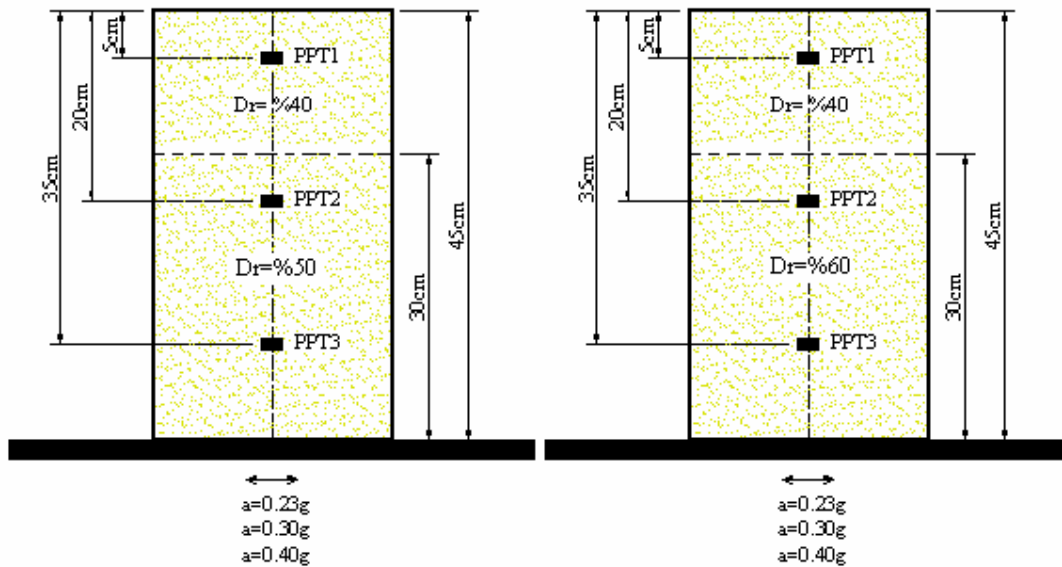
5.3.5 Üçüncü seri deneyler

Üçüncü seri deneyler, toplam 9 adet deneyden oluşmaktadır. Çizelge 5.7’de özetlendiği gibi bu deneyler farklı sıklığa sahip iki tabakadan oluşan kum kolonları üzerinde uygulanmıştır. Alt tabaka %50, %60 ve %72 rölatif sıklıkta, üst tabaka ise %40 rölatif sıklıkta oluşturulmuştur. Alt tabaka sarsma tablası yardımı ile tabakalar halinde sarsılarak yerleştirilmiş ve istenilen sıklık derecesine ulaşması sağlanmıştır. Bu seri deneylerde, altında daha sıkı bir kum tabakasının yer aldığı gevşek üst kum tabakalarının dinamik yükleme altında davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için diğer seri deneylerde olduğu gibi 45 cm yüksekliğinde hazırlanan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde titreşimlere maruz bırakılarak, boşluk suyu basıncı değişimleri ve meydana gelen oturmalar araştırılmıştır.

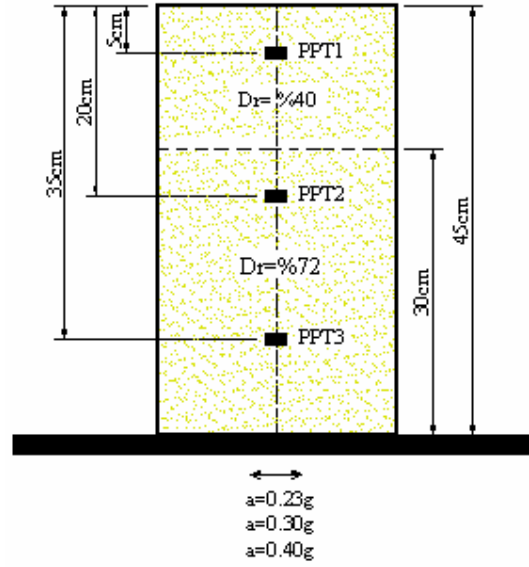
Çizelge 5.7 Üçüncü seri deneylerin özeti

Model No.	Model	Model Yüksekliği (cm)	$a_{\max}$ (g)	D_r (%)	
				Üst Tabaka	Alt Tabaka
L8-A	Tabakalı kum	45	0.22	40	50
L9-A	Tabakalı kum	45	0.23	40	60
L10-A	Tabakalı kum	45	0.23	40	72
L8-B	Tabakalı kum	45	0.30	40	50
L9-B	Tabakalı kum	45	0.30	40	60
L10-B	Tabakalı kum	45	0.30	40	72
L8-C	Tabakalı kum	45	0.40	40	50
L9-C	Tabakalı kum	45	0.40	40	60
L10-C	Tabakalı kum	45	0.40	40	72

Üçüncü seri deneyler kapsamında hazırlanan tabakalı kum modellerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi Şekil 5.19’da gösterilmiş, elde edilen deneysel sonuçlar ise Bölüm 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.19a Üçüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L8 ve L9 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi



Şekil 5.19b Üçüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L10 deneyinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi

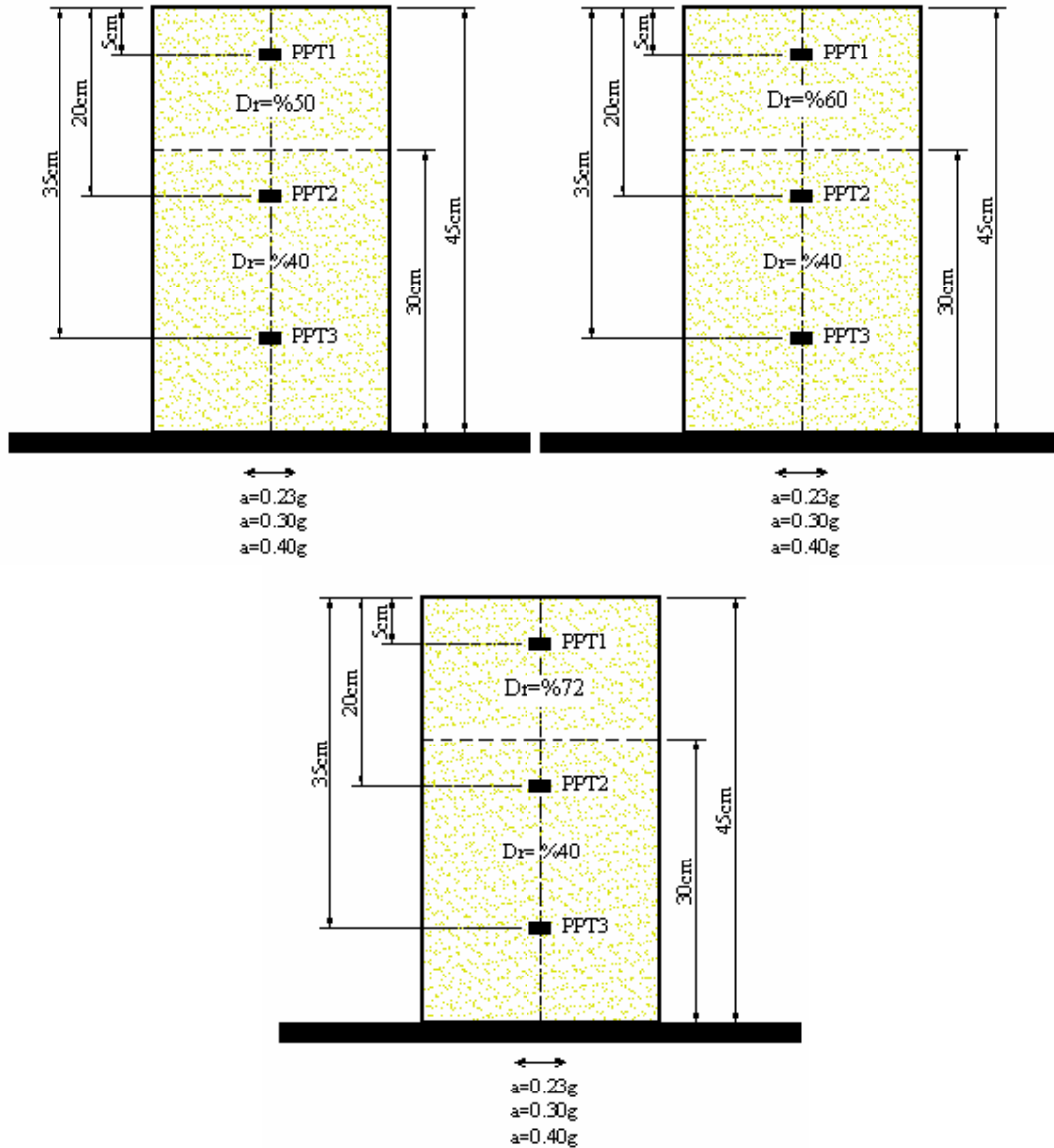
5.3.6 Dördüncü seri deneyler

Dördüncü seri deneyler kapsamında yapılan deneyler toplam 9 adet deneyden oluşmaktadır. Çizelge 5.8’de özetlendiği gibi deneylerde alt tabaka rölatif sıkılığı $D_r = \%40$ olan gevşek bir kum tabakası üzerinde $D_r = \%50$, $D_r = \%60$, $D_r = \%72$ rölatif sıkılıklarda daha sıkı bir kum tabakası olması durumunda dinamik yüklemeler altındaki davranışın araştırılması amaçlanmıştır. Kum kolonlarının hazırlanması sırasında, yağmurlama işleminden sonra yapılan üst yüzeyin düzeltilmesi işlemi model yüksekliğinde bazı küçük farklılıklara yol açmıştır.

Çizelge 5.8 Dördüncü seri deneylerin özeti

Model No.	Model	Model Yüksekliği (cm)	a_{max} (g)	D_r (%)	
				Üst Tabaka	Alt Tabaka
L11-A	Tabakalı kum	45	0.23	50	40
L12-A	Tabakalı kum	45	0.23	60	40
L13-A	Tabakalı kum	45	0.23	72	40
L11-B	Tabakalı kum	45	0.30	50	40
L12-B	Tabakalı kum	45	0.30	60	40
L13-B	Tabakalı kum	44.5	0.30	72	40
L11-C	Tabakalı kum	44.6	0.40	50	40
L12-C	Tabakalı kum	44.5	0.40	60	40
L13-C	Tabakalı kum	44.5	0.40	72	40

Farklı boşluk suyu basıncı değişimlerini ve oluşan oturmaları incelemek amacı ile, hazırlanan modeller ivme genliği 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemelere tabi tutulmuştur. Dinamik yükleme sırasında boşluk suyu basınçları ve oturmalar kaydedilmiş, veri toplama işlemi kum kolonundaki oturmalar sona erinceye kadar devam ettirilmiştir. Dördüncü seri deneyler kapsamında hazırlanan zemin modellerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi Şekil 5.20’de gösterilmiş, elde edilen deneysel sonuçlar ise Bölüm 5.7’de verilmiştir.



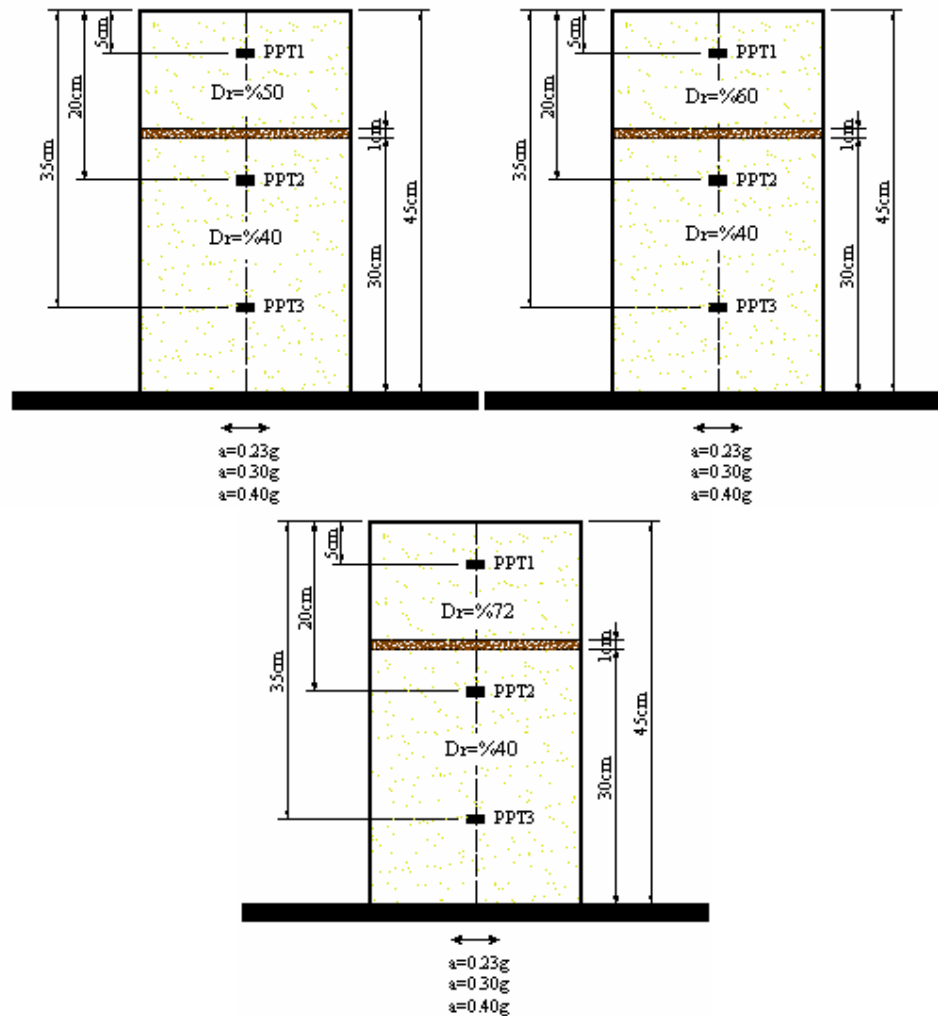
Şekil 5.20 Dördüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen L11, L12 ve L13 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi

5.3.7 Beşinci seri deneyler

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen beşinci seri deneyler toplam 9 adet deneyden oluşmaktadır. Beşinci seri deneyler için oluşturulan zemin modellerine ait özellikler Çizelge 5.9'da özetlenmiştir. Bu serideki model deneylerde, rölatif sıkılığı $D_r = \%40$ olan gevşek bir kum tabakası ile üzerindeki $D_r = \%50$, $D_r = \%60$, $D_r = \%72$ rölatif sıkılıklarda daha sıkı bir kum tabakası arasında bir silt tabakası olması durumu modellenmeye çalışılmıştır. Böylece alt tabakanın üst tabakaya göre daha gevşek olduğu silt ara tabakalı kum çökellerinin dinamik yüklemeler altında davranışının araştırılması amaçlanmıştır. Farklı ivme genliklerinde dinamik yüklemeler etkisinde boşluk suyu basıncı değişimleri ve meydana gelen oturmaları incelemek amacı ile her bir model deney genliği 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemelere tabi tutulmuştur. Dinamik yükleme sırasında boşluk suyu basınçları ve oturmalar kaydedilmiş, veri toplama işlemi boşluk suyu basınçları sönümlenerek kararlı duruma erişinceye ve silt tabakası altında olduğu gözlenen su filmi ortadan kayboluncaya kadar devam ettirilmiştir. Beşinci seri deneyler kapsamında hazırlanan zemin modellerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi Şekil 5.21'de gösterilmiş, elde edilen deneysel sonuçlar ise Bölüm 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.9 Beşinci seri deneylerin özeti

Model No.	Model	Model Yüksekliği (cm)	a_{max} (g)	D_r (%)	
				Üst Tabaka	Alt Tabaka
L14-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	50	40
L15-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	60	40
L16-A	Tabakalı silt/kum	45	0.23	72	40
L14-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	50	40
L15-B	Tabakalı silt/kum	45	0.30	60	40
L16-B	Tabakalı silt/kum	44.7	0.30	72	40
L14-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	50	40
L15-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	60	40
L16-C	Tabakalı silt/kum	45	0.40	72	40



Şekil 5.21 Beşinci seri model deneyler kapsamında gerçekleştirilen L14, L15 ve L16 deneylerinin görünümü ve boşluk suyu basıncı sensörlerinin yerleşimi

5.4 Birinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Farklı sıklık derecelerinde hazırlanmış (%40, %50, %60 ve %72 rölatif sıklıklarda) uniform kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler etkisi altında sıvılaşma davranışının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen birinci seri deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

5.4.1 U1-A, U1-B ve U1C Model Deneyleri (%40 Rölatif Sıkılıkta Kum Kolonları)

Çizelge 5.5'te özellikleri verilen model deneylerden %40 rölatif sıklıkta hazırlanmış uniform kum kolonlarının ivme genlikleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı model deneylerinde, uygulanan ivme-zaman tarihçesi, üç farklı derinlikte ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve dijital kamera görüntülerinden elde edilen yüzeysel oturma-zaman değişimleri kaydedilmiştir. Şekil 5.22'de 0.23g ivme etkisinde kaydedilen

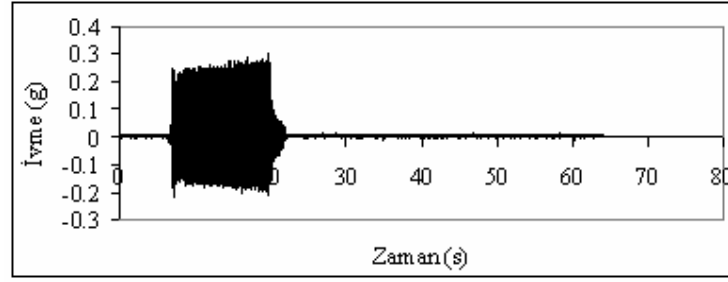
davranış eğrileri gösterilmiş, 0.30g ve 0.40g ivme etkisindeki davranış eğrileri ise Ekler Bölümü’nde Şekil Ek 1.1 ve Şekil Ek 1.2’de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı grafikleri incelendiğinde, artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimlerinin daha önce benzer çalışmalarda elde edilmiş artık boşluk suyu basıncı davranışı ile uyumlu olduğu görülmektedir. Gözlemlenen bu tipik davranış, sarsıntının başlaması ile birlikte ani bir boşluk suyu basıncı artışı, titreşimler süresince boşluk suyu basınçlarının artarak bir platoya ulaşması ve daha sonra sönümlenmesi aşamalarından oluşmaktadır. Üç farklı derinlikte ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının maksimum değerlerine ulaşma anı karşılaştırıldığında, artık boşluk suyu basıncının ilk önce en altta yer alan PPT3 sensöründe daha sonra ortadaki PPT2 sensöründe, ve son olarak en üstte yer alan PPT1 sensöründe maksimum değerine ulaştığı gözlenmektedir. Bu durum boşluk suyu basınçlarının kum kolonunun titreşimlerin uygulandığı alt seviyelerinden yukarıya doğru ilerlediğini göstermektedir.

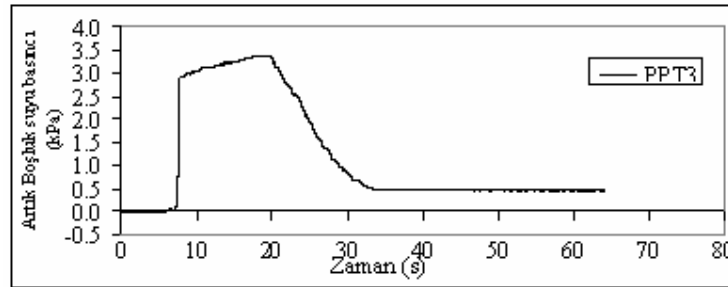
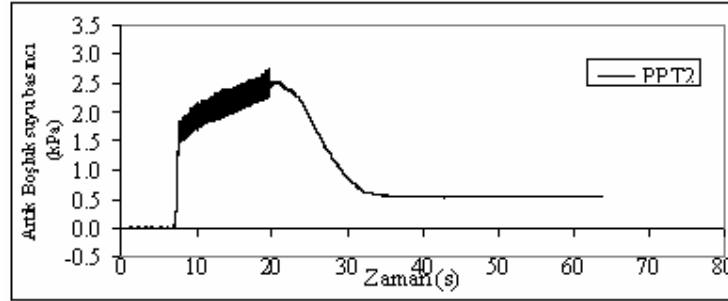
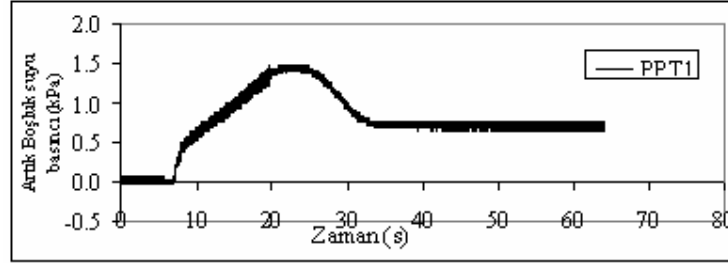
Dinamik yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının, dinamik yüklemeler sona erdikten sonra sönümlenerek kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. Sarsıntı sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişiminden, her üç sensörde de ölçülen basınçların bir süre sonra kararlı duruma geldiği ancak tam olarak sıfırlanmadığı görülmektedir. Bu rezidüel basınçların dinamik yükleme sırasında kumla birlikte içersine yerleştirilmiş boşluk suyu basıncı sensörlerinin de oturması ve bu nedenle bir miktar boşluk suyu basıncı kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deneyler sırasında uniform kum kolonlarında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise toplam oturma miktarının ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve bir kısmı sarsıntı sırasında oluşan oturmaların artık boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sırasında devam ettiği görülmektedir.

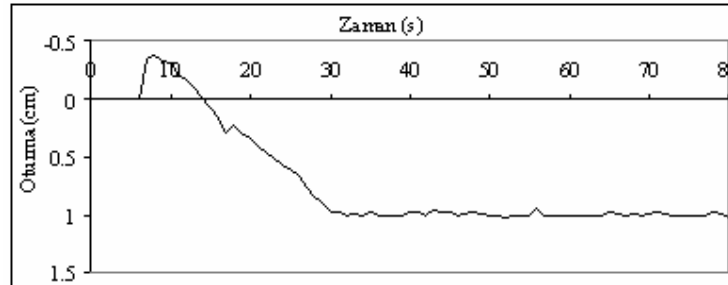
Şekil 5.23’de 0.23g ivme şiddetinde dinamik sarsıntı uygulanması sırasında ve sonrasında ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle ve zamanla değişimi gösterilmektedir. Diğer deneylere(0.30g ve 0.40g) ait sonuçlar ekler bölümü’nde Şekil Ek 2.1 ve Şekil Ek 2.2’de verilmiştir. Grafiklerdeki kalın çizgi başlangıç düşey efektif gerilme değerinin (σ_{v0}') derinlikle değişimini göstermektedir. Artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, sarsıntı sırasında farklı derinliklerde yer alan PPT1, PPT2 ve PPT3 sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının başlangıç düşey efektif gerilme değerinden daha büyük değerlere ulaştığı, dinamik sarsıntı sonrasında ise sönümlenerek



(a)



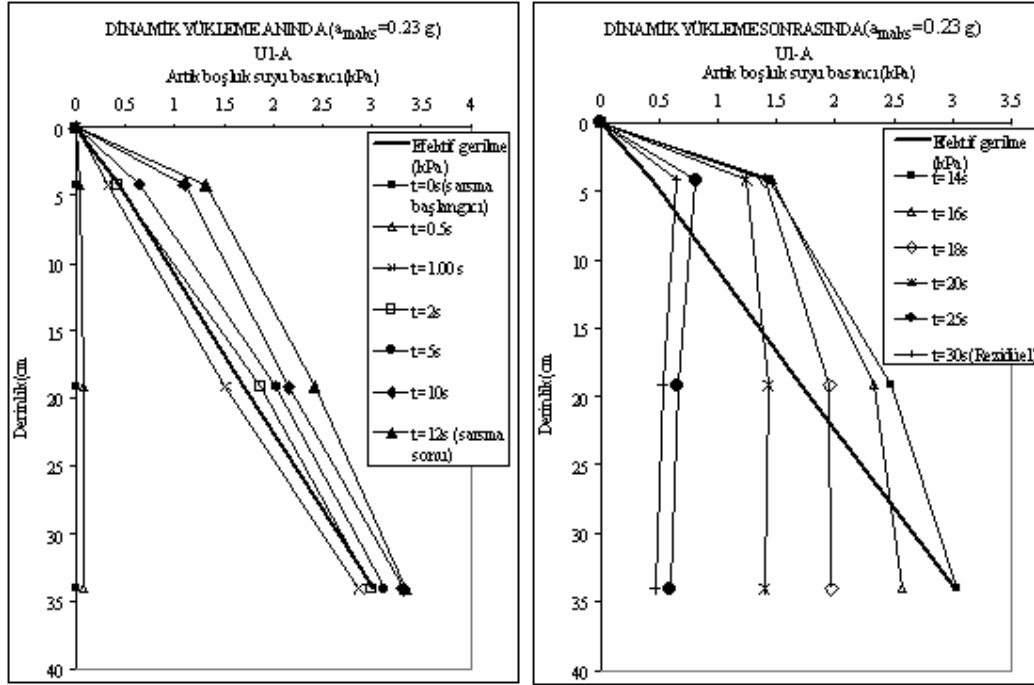
(b)



(c)

Şekil 5.22 U1-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b) Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi

kararlı duruma ulaştığı görülmektedir. Deney sonuçları %40 rölatif sıklıktaki uniform kum tabakalarında uygulanan 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yükleme etkisinde artık boşluk suyu basınçlarının kum kolonu boyunca düşey efektif gerilmeleri aştığını, her üç deneyde de tüm tabakada sıvılaştırmanın meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 5.23 U1-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları (a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

5.4.2 U2-A, U2-B ve U2C Model Deneyleri (%50 Rölatif Sıklıkta Kum Kolonları)

%50 rölatif sıklıkta hazırlanan uniform kum kolonlarının ivme genlikleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı model deneylerinde, uygulanan ivme-zaman tarihçesi, üç farklı derinlikte ölçülen artık boşluk suyu basıncı- zaman ve yüzeyel oturma-zaman değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 1.3, Şekil Ek 1.4 ve Şekil Ek 1.5'de gösterilmiştir.

Sarsıntının başlaması ile birlikte boşluk suyu basınçlarında ani bir artış meydana geldiği, artık boşluk suyu basınçlarının titreşimler süresince artarak bir platoya ulaştığı ve sarsıntının sona ermesi ile birlikte sönümlendiği gözlenmekte, artan sarsıntı şiddeti ile birlikte daha büyük artık boşluk suyu basınçları oluştuğu görülmektedir. Aynı şekilde, toplam oturma miktarının artan sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı, sarsıntı sona erdikten sonra boşluk suyu basınçları sönümlenerek kararlı duruma ulaşırken oturmaların da sona erdiği gözlenmiştir.

Uygulanan sarsıntı sırasında ve sonrasında ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle ve zamanla değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 2.3, Şekil Ek 2.4 ve Şekil Ek 2.5'de gösterilmiştir. Artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, %50 rölatif sıklıkta hazırlanmış üniform kum kolonlarında, 0.23g ve 0.30g ivme genliklerine sahip dinamik yüklemeler etkisi altında yüzeyden 25cm derinliğe kadar artık boşluk suyu basınçlarının başlangıç düşey efektif gerilme değerini aştığı ve sıvılaşma meydana geldiği, daha alt tabakalarda ise sıvılaşma oluşmadığı gözlenmektedir. Uygulanan sarsıntı şiddeti 0.40g olan U2-C deneyinde ise, artık boşluk suyu basınçları, tüm kum kolonunun sıvılaşmasını sağlayan mertebelere ulaşmaktadır.

5.4.3 U3-A, U3-B ve U3C Model Deneyleri (%60 Rölatif Sıklıkta Kum Kolonları)

%60 rölatif sıklıkta hazırlanan üniform kum kolonlarının ivme genlikleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı bu deneylerde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma zaman değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 1.6, Şekil Ek 1.7 ve Şekil Ek 1.8'de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişim grafikleri, sarsıntı sırasında artık boşluk suyu basınçları oluşumu ve sonrasında sönümlenmesinin %40 ve %50 relatif sıklıktaki kum kolonlarının davranışına benzer olduğunu ve artık boşluk suyu basınçlarının büyüklüğünün artan ivme şiddeti ile birlikte arttığını göstermektedir.

Deneyler sırasında ölçülen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise toplam oturma miktarının ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve bir kısmı sarsıntı sırasında oluşan otumaların artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi süresince devam ettiği gözlenmektedir.

Uygulanan sarsıntı sırasında ve sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle ve zamanla değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 2.6, Şekil Ek 2.7 ve Şekil Ek 2.8'de gösterilmektedir. Artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, %60 rölatif sıklıkta hazırlanan üniform kum kolonlarında, sarsıntı şiddeti 0.23g olduğunda kum kolonunun sadece yüzeyden itibaren ilk 7.5cm'lik kısmının sıvılaştığı, 0.30g ve 0.40g sarsıntı şiddetlerinde ise yüzeyden 30cm derinlikte seviyelere kadar sıvılaşma oluştuğu, daha derinlerde ise sıvılaşma oluşturacak mertebelerde boşluk suyu basıncı artışları meydana gelmediği görülmektedir.

5.4.4 U4-A, U4-B ve U4C Model Deneyleri (%72 Rölatif Sıklıkta Kum Kolonları)

%72 rölatif sıklıkta hazırlanan uniform kum kolonlarında ivme genlikleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan dinamik yüklemeler etkisinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma zaman değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 1.9, Şekil Ek 1.10 ve Şekil Ek 1.11'de gösterilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişim grafikleri incelendiğinde artık boşluk suyu basınçlarının maksimum değerlerinin artan ivme şiddeti ile birlikte bir arttığı görülmektedir.

Deneyler sırasında uniform kum kolonlarında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise toplam oturma miktarının ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmı sarsıntı sırasında oluşan oturmaların artık boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sürecinde devam ettiği görülmektedir.

Uygulanan sarsıntı sırasında ve sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının zamanla ve derinlikle değişimleri Ekler bölümü'nde Şekil Ek 2.9, Şekil Ek 2.10 ve Şekil Ek 2.11'de gösterilmektedir. Bu şekillerde gösterilen artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, %72 relatif sıklıkta hazırlanan uniform kum kolonlarında, 0.23g sarsıntı şiddetinde sıvılaşma meydana gelmediği, 0.30g sarsıntı şiddetinde yüzeyden itibaren 18 cm derinliğe kadar, 0.40g sarsıntı şiddetinde ise yüzeyden 22 cm derinliğe kadar sıvılaşma meydana geldiği, daha alt seviyelerde boşluk suyu basıncı artışlarının sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaşmadığı görülmektedir.

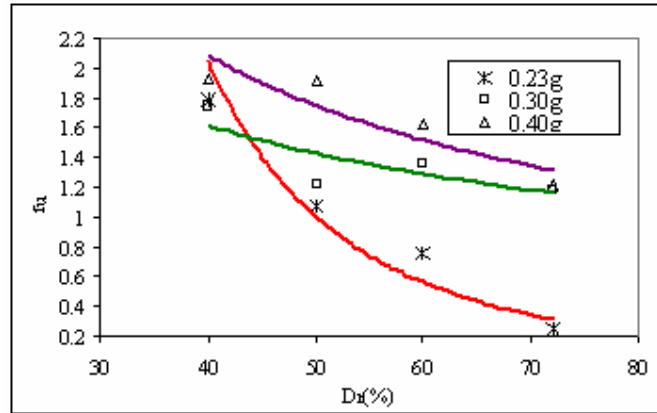
5.4.5 Birinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Farklı sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğine sahip dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı birinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen model deneylerde ölçülen toplam yüzeysel oturma miktarı, hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri(ϵ_v), üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı ($r_{u\max}$) ve bu seviyelerdeki düşey efektif gerilme değerleri Çizelge 5.9'da özetlenmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları ($r_{u(\max)}$), maksimum artık boşluk suyu basıncı değeri o noktadaki düşey efektif gerilmeye bölünerek elde edilmiştir. Çizelge 5.10'da her bir deney için üç farklı derinlikte hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları incelendiğinde, yüzeye yakın olan kesimlerde artık boşluk suyu basıncı oranlarının(r_u) 1'e yakın ve daha büyük değerlerde olduğu ve r_u 'nun derinlikle birlikte azaldığı görülmektedir.

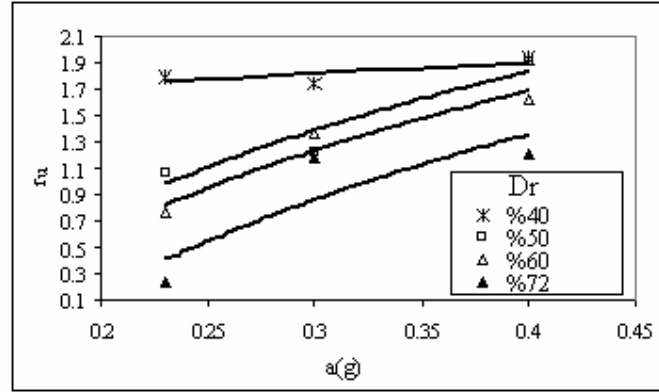
Çizelge 5.10 Birinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar

Model No.	Oturma (cm)	Hacimsel Şekil Değişirme, ε_v (%)	Düşey efektif gerilme σ_{vo}' (kPa)			Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı $r_{u(max)} (\Delta u / \Delta \sigma_{vo}')$		
			PPT1	PPT2	PPT3	PPT1	PPT2	PPT3
U1-A	1.00	2.22	0.443	1.70	3.02	2.93	1.35	1.08
U2-A	0.73	1.62	0.48	1.92	3.36	1.31	1.02	0.88
U3-A	0.55	1.22	0.48	1.93	3.38	1.04	0.74	0.49
U4-A	0.60	1.33	0.498	1.99	3.48	0.52	0.12	0.09
U1-B	1.60	3.55	0.45	1.79	3.10	2.78	1.40	1.04
U2-B	1.40	3.11	0.48	1.92	3.36	1.56	1.18	0.92
U3-B	0.98	2.18	0.44	1.89	3.34	2.09	1.10	0.90
U4-B	0.80	1.78	0.55	1.99	3.48	1.73	0.87	0.93
U1-C	2.20	4.89	0.46	1.73	3.09	3.08	1.64	1.06
U2-C	1.70	3.78	0.48	1.92	3.36	3.58	1.20	0.96
U3-C	1.20	2.67	0.43	1.89	3.34	2.76	1.19	0.92
U4-C	0.92	2.04	0.55	1.99	3.48	1.69	0.99	0.94

Çizelge 5.10'da verilen artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti ile ve rölatif sıkılıkla olan değişimini incelemek amacı ile her bir deney için üç farklı derinlikteki maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının ortalaması alınmıştır. Artık boşluk suyu basıncının sarsıntı şiddeti ve rölatif sıkılıkla olan değişimlerinin gösterildiği Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'den sıkılık derecesi ve sarsıntı şiddetinin artık boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi açık olarak görülmektedir. Kumun rölatif sıkılığı arttıkça dinamik yüklemeler altında daha az boşluk suyu basıncı artışı meydana gelirken, sarsıntı şiddetinin artması ile birlikte daha büyük boşluk suyu basıncı artışları ortaya çıkmaktadır.

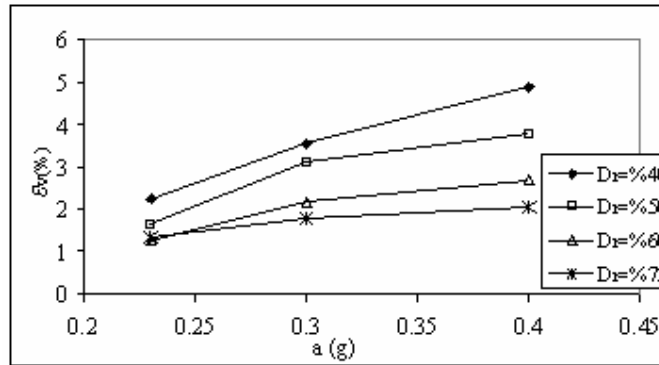


Şekil 5.24 Uniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) rölatif sıkılıkla değişimi



Şekil 5.25 Uniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) sarsıntı şiddeti ile değişimi

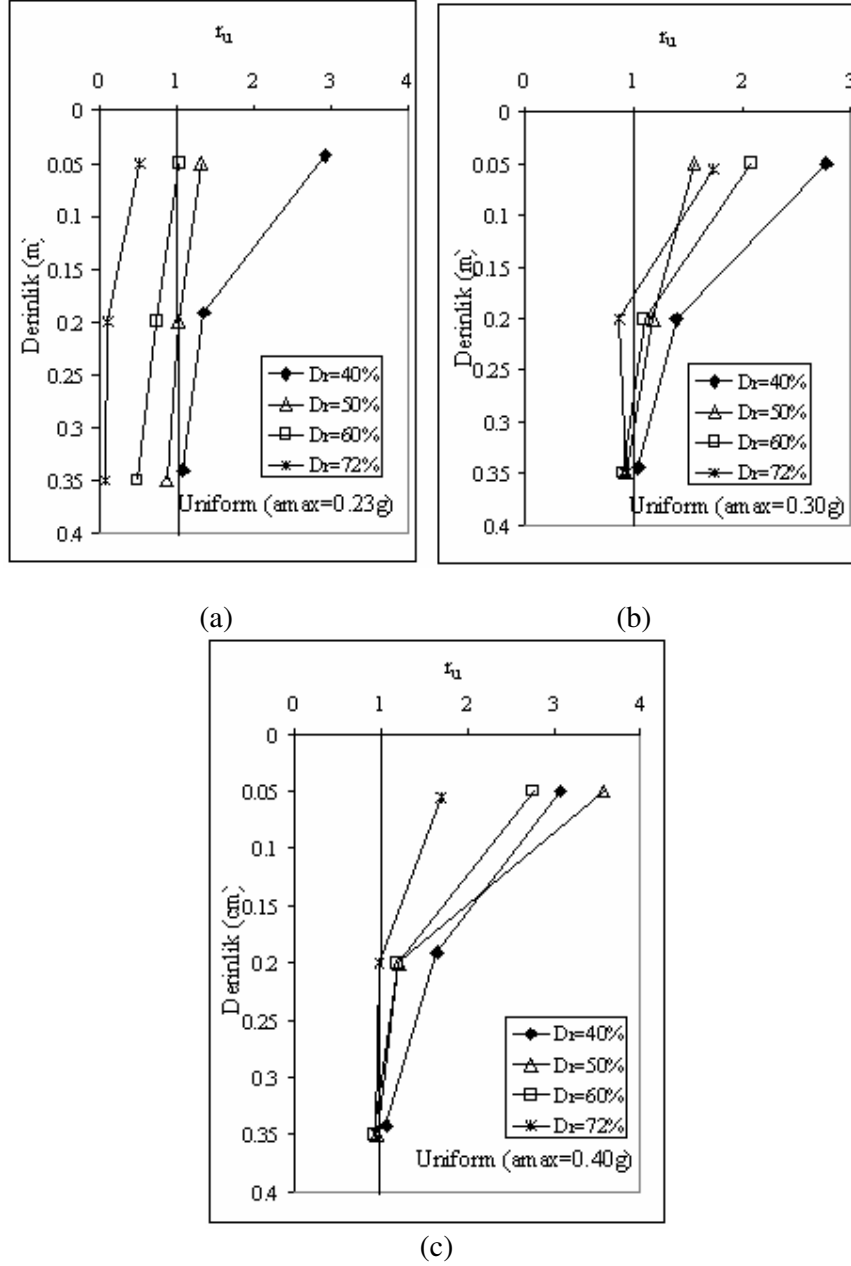
Birinci seri deneyleri oluşturan farklı sıklıkta uniform kum kolonları üzerinde farklı ivme genliklerinde dinamik yüklemelerde yapılan deneyler değerlendirilerek, meydana gelen hacimsel şekil değiştirmelerin ve artık boşluk suyu basıncı oranlarının kumun rölatif sıklığı ve uygulanan ivme genlikleri ile değişimleri incelenmiştir. Dört farklı rölatif sıklıktaki ($Dr=\%40$, $Dr=\%50$, $Dr=\%60$, $Dr=\%72$) uniform kum kolonlarında deneyler sırasında ölçülmüş yüzey oturması değerlerinden Çizelge 5.10'da verilen hacimsel şekil değiştirmeler hesaplanmış ve uygulanan ivme genlikleri ile olan değişimi Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Şekil 5.26'dan dinamik yüklemeler etkisinde oluşan hacimsel şekil değiştirmelerin kumun sıklık derecesi arttıkça azaldığı, uygulanan sarsıntı şiddeti arttıkça da arttığı görülmektedir.



Şekil 5.26. Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında hacimsel şekil değiştirmenin sarsıntı şiddeti ile değişimi

Dört farklı rölatif sıklıktaki ($Dr=\%40$, $Dr=\%50$, $Dr=\%60$, $Dr=\%72$) uniform kum kolonlarında dinamik yüklemeler altında ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının uygulanan ivme genlikleri ve kumun rölatif sıklığı ile olan değişimleri

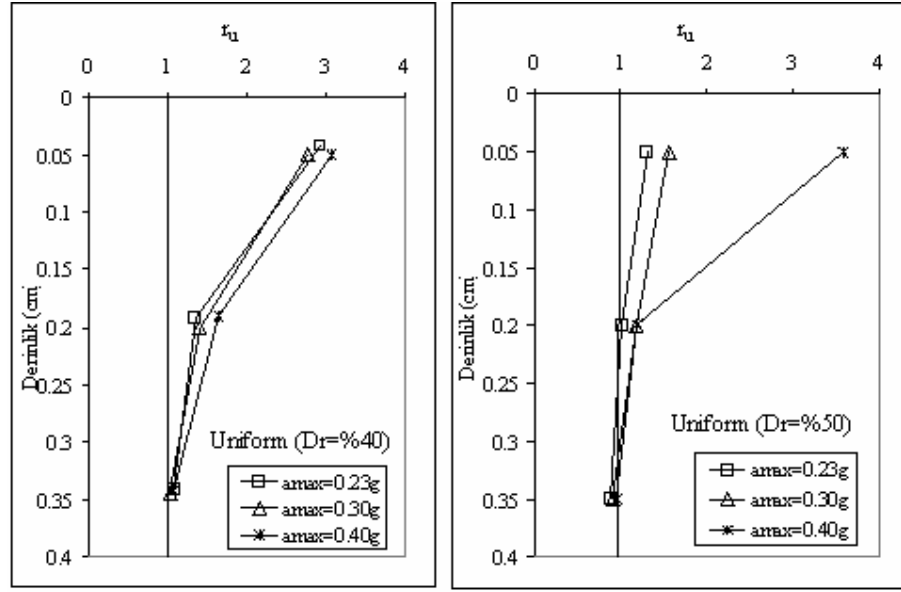
Şekil 5.27’de gösterilmiştir. Farklı ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanan kum kolonlarında aynı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının (r_u) kum kolonunun rölatif sıkılığı arttıkça azaldığı görülmektedir.



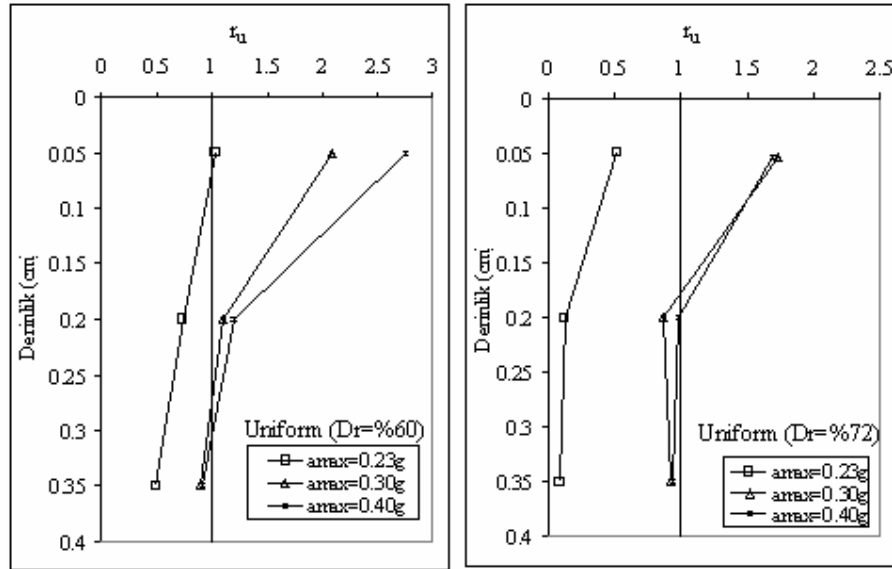
Şekil 5.27 Farklı rölatif sıkılıklarda hazırlanmış uniform kum kolonunda uygulanan farklı ivme genliklerinde maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının derinlikle değişimi

Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’da dört farklı sıkılıktaki uniform kum kolonlarında oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının (r_u) uygulanan ivme genlikleri ile olan değişimi gösterilmektedir. Grafiklerden aynı rölatif sıkılıktaki uniform kum kolonlarında aynı derinlikteki artık boşluk suyu basıncı oranlarının artan ivme genliği ile birlikte genel olarak

arttığı görülmektedir.



Şekil 5.28. %40 ve %50 Rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi



Şekil 5.29 %60 ve %72 Rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

Deneyler sırasında, sarsıntı sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının zamanla sönümlendiği, fakat bir kısmının basınçlar kararlı duruma geldiği halde sıfırlanmadığı görülmektedir. Bu rezidüel basınçların dinamik yükleme sırasında kumla birlikte içerisine yerleştirilmiş boşluk suyu basıncı sensörlerinin de oturması ve bu nedenle bir miktar boşluk suyu basıncı

kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

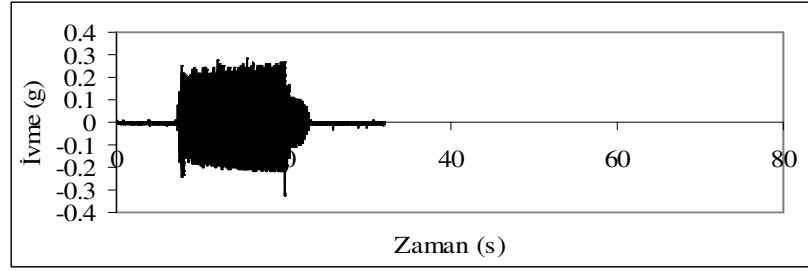
Deneyler sırasında ayrıca, artık boşluk suyu basıncı değerlerinin bazı derinliklerde düşey efektif gerilme değerlerini aştığı görülmüştür. Artık boşluk suyu basıncı oranlarının (r_u) 1'den büyük değerler alması bu noktalarda çok yüksek boşluk suyu basınçları oluştuğunu göstermektedir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir. Kum kolonuna titreşimler tabanda uygulandığı için boşluk suyu basıncı artışları alt seviyelerden başlayarak yukarıya doğru ilerlemektedir. Bundan kaynaklanan hidrolik yük farkından dolayı yukarıya doğru su akımı meydana gelmekte ve oluşan sızıntı kuvvetleri üst seviyelerde aşırı boşluk suyu basıncı artışlarına neden olmaktadır. Dinamik yükler etkisindeki kum kolonlarında görülen bu davranış deneyler sırasında kaydedilen kamera görüntülerinde de gözlemlenmiştir.

5.5 İkinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

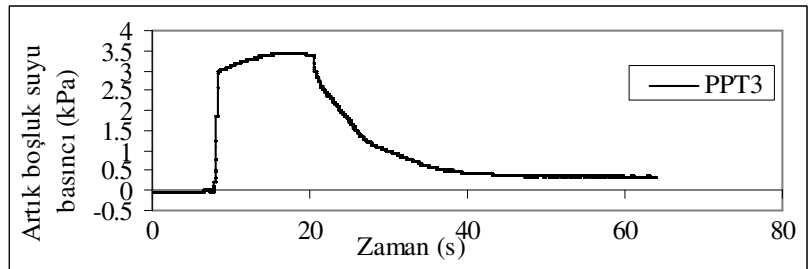
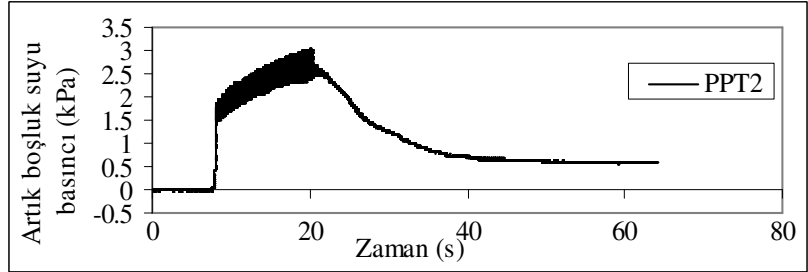
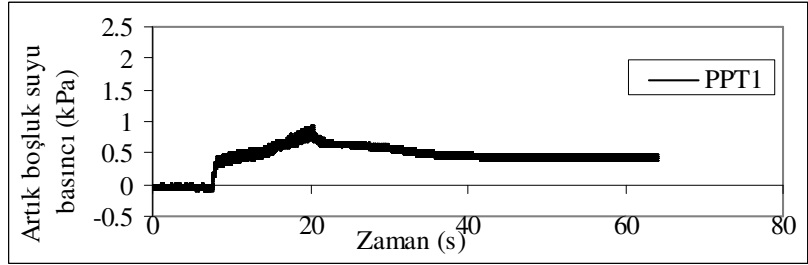
Bu tez çalışması kapsamında, kum çökelleri içinde silt ara tabakaları bulunmasının kum tabakalarının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılabilmesi amacı ile, özellikleri Çizelge 5.6'da verilen ince bir silt ara tabakası içeren farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemelere maruz bırakılmış ve boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi yanında, kum kolonunda meydana gelen oturmaların ve silt ara tabakası altında olduğu gözlenen su filmi kalınlığının zamanla değişimi incelenmiştir. İkinci seri deneyler kapsamında yapılan 21 adet model deneyden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

5.5.1 L1-A, L1-B ve L1-C model deneyleri (Silt ara tabakalı %40 rölatif sıklıkta kum kolonları)

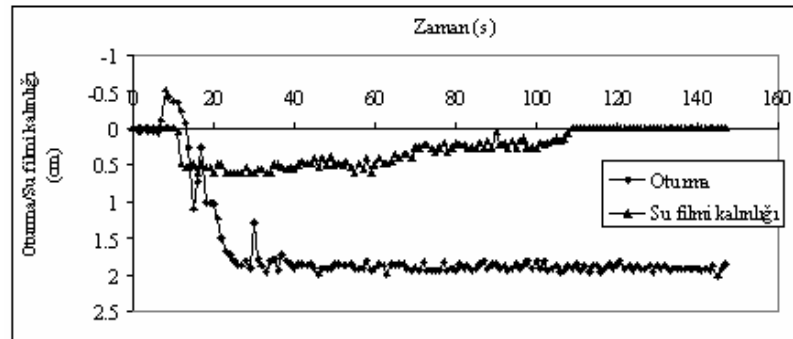
İnce bir silt ara tabakalı olarak %40 relatif sıklıkta hazırlanmış kum kolonları üzerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanan model deneylerinde, artık boşluk suyu basıncı-zaman, yüzeysel oturma-zaman ve silt ara tabakası altında oluşan su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ölçülerek kaydedilmiştir. Bu deneylerden 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler altında gözlenen davranış Şekil 5.30, diğer deney sonuçları Ekler bölümü'nde Şekil Ek 1.12 ve Şekil Ek 1.13'de verilmiştir. Ölçülen artık boşluk suyu basıncı grafikleri toplu olarak incelendiğinde, artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimlerinin daha önce benzer çalışmalarda (Adalier (1992), Arulanandan vd. (1993), Taboada (1995), Teymur (2002), Fiegel ve Kutter (1994)) elde edilmiş artık boşluk suyu basıncı davranışı ile uyumlu olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

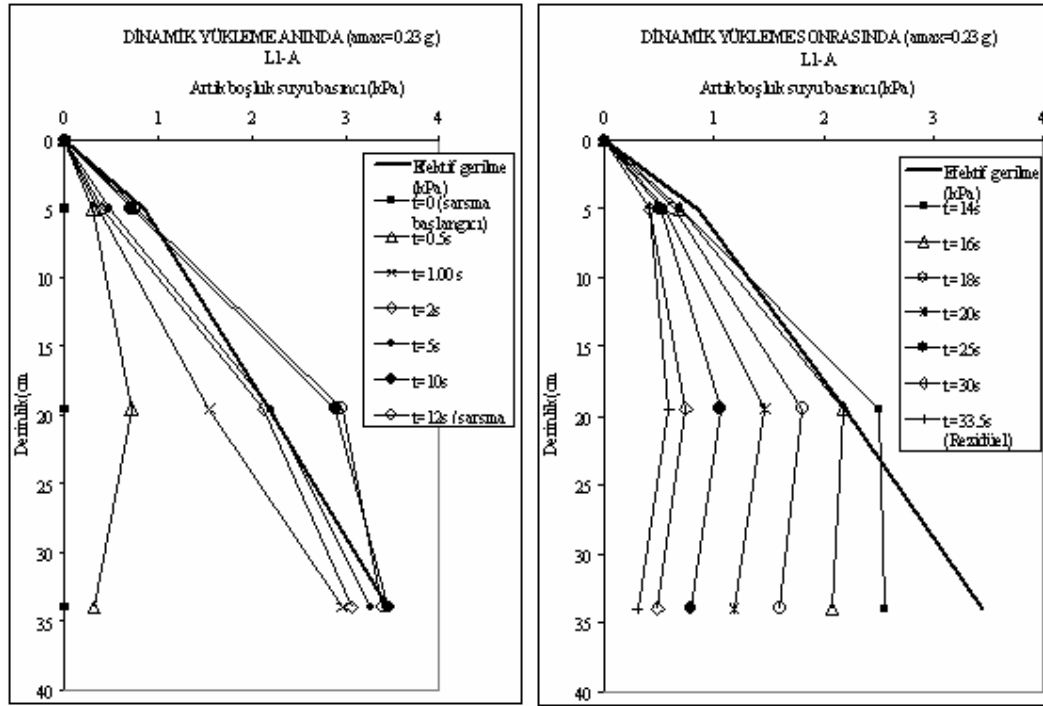


Şekil 5.30 L1-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma ve su filmi kalınlığı-zaman değişimi

Boşluk suyu basıncı-zaman değişimlerinden sarsıntının başlaması ile birlikte boşluk suyu basınçlarında ani bir artış meydana geldiği, sarsıntı devam ettiği sürece boşluk suyu basıncı artışlarının devam ettiği ve sarsıntı sona erdikten sonra sönümlenmeye başladığı görülmektedir. Dinamik yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu basınçları uniform kum kolonu deneylerinde gözlemlendiği gibi, dinamik yüklemelerden sonra sönümlenerek kararlı duruma gelmekte, fakat tam olarak başlangıçtaki sıfır konumuna ulaşmamaktadır.

Kum kolonunda yüzey oturmalarının sarsıntı uygulanması ile birlikte başladığı ve artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi süresince hızı azalarak devam ettiği gözlenmektedir. Dinamik yükleme uygulanmasının başlaması ile birlikte silt ara tabakası altında bir su filmi oluşmakta, artık boşluk suyu basınçları sönümlendikçe bu su filmi kalınlığı azalarak yok olmaktadır.

Şekil 5.31’de 0.23g ivme genliğinde dinamik yükleme uygulanan model deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve dinamik sarsıntı sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Diğer deneylere ait sonuçlar Ekler bölümü’nde Şekil Ek 2.12 ve Şekil Ek 2.13’de verilmiştir. Grafiklerdeki kalın çizgi başlangıç düşey efektif gerilme(σ_{vo}) değerinin derinlikle olan değişimini göstermektedir. Artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, sarsıntı sırasında yüzeyden 5 cm ve 20cm derinliklerdeki PPT1 ve PPT2 sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, en derindeki PPT3 sensöründe ise düşey efektif gerilme değerlerine eşit hale geldiği görülmekte, artık boşluk suyu basıncı büyüklüğünün artan ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve tüm kum kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrasında ise artık boşluk suyu basıncı izokronlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.31 L1-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

Silt ara tabakalı model deneylerde sarsıntı sırasında kum tabakasına göre geçirimsizliği daha düşük olan silt tabakası altında ince bir su tabakası(filmi) olduğu gözlemlenmiştir. Benzer davranış Bölüm 2’de belirtildiği gibi düşük geçirimsizliğe sahip silt ve/veya kil ara katmanlarının bulunduğu kum tabakalarında yapılmış diğer laboratuvar çalışmalarında da gözlemlenmiştir. Dinamik yüklemeler sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçları suyun tabandan zemin yüzeyine doğru hareket etmesine yol açmakta, bu sırada geçirimsizliği düşük olan silt tabakasına rastladığında su iyi drene olamadığı için silt tabakası altında birikerek bir su tabakası oluşturmaktadır. Silt ara tabakası altında oluşan su filmi kalınlığının zamanla değişimi, yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile birlikte incelendiğinde birbirine benzer şekilde artık boşluk suyu basıncı sönümlenmesine paralel bir davranış gösterdikleri gözlenmektedir. Yüksek şiddette (0.40g) sarsıntı uygulanan L1-C model deneyinde oluşan su filmi yüksek artık boşluk suyu basınçları nedeni ile hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket etmiştir. Bu nedenle, bu deneyde su filmi kalınlığının zamanla değişim grafiği kayıt edilememiştir. Su filminin silt daneleri ile birlikte yüzeye doğru hareketi 0.30g şiddetinde sarsıntı uygulanan L1-B model deneyinde de gözlenmiş, fakat su filminin tamamı yüzeye doğru hareket etmediğinden silt tabakası altında kalan su tabakasının kalınlığının zamanla değişimi kaydedilebilmiştir. Su filmi kalınlığının, yüksek şiddette

sarsıntılar sırasında yüzeye doğru hızlı hareketinden dolayı tam olarak karşılaştırma yapılamamasına rağmen, sarsıntı şiddetinden etkilendiği sonucu çıkarılmaktadır. Su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden su filminin mevcudiyetinin sarsıntı bitmesinden sonra bir müddet devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.

5.5.2 L2-A, L2-B ve L2-C model deneyleri (Silt ara tabakalı % 50 rölatif sıklıkta kum kolonları)

İnce bir silt ara tabakası içeren ve %50 rölatif sıklıkta hazırlanan kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı model deneylerinde elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman, yüzey oturması-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile silt tabakası altında yer alan alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri Ekler bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.14, Şekil Ek 1.15 ve Şekil Ek 1.16'da verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı grafikleri incelendiğinde, artık boşluk suyu basınçlarında sarsıntının başlaması ile birlikte ani bir artış meydana geldiği, uygulanan titreşimler süresince devam eden artık boşluk suyu basınçlarındaki artışın bir süre sonra durduğu ve sönümlenmeye başladığı görülmektedir. Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.14, Şekil Ek 2.15 ve Şekil Ek 2.16'da sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde sarsıntılar etkisinde model deneylerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında zamanla ve derinlikle değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronları 0.23g ve 0.30g genliğinde yapılan deneylerde yüzeyden 5cm ve 20cm derinliklerde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, 35 cm derinlikte ise düşey efektif gerilme değerlerine ulaşamadığını göstermektedir. Bu durum, kum kolonunun yüzeyden itibaren en az 20cm'lik kısmının sıvılaştığını göstermektedir. Daha yüksek sarsıntı şiddeti(0.40g ivme genliğinde) uygulanan model deneyinde ise derinlik boyunca artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerini aştığı ve kum kolonunun tamamının sıvılaştığı, sarsıntı sonrasında ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaştığı görülmektedir.

Deneylerde sarsıntı sırasında silt tabakası altında oluştuğu gözlenen ince su tabakasının yüksek şiddette sarsıntı uygulanan deneylerde hızlı bir şekilde yüzeye doğru hareket ettiği

gözlenmiş ve kalınlığının zamanla değişimi tam olarak kayıt edilememiştir. Bununla birlikte, su filminin sarsıntı sona ermesine rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Deneyler sırasında ölçülen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden toplam oturmaların miktarının ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir. Silt tabakası altındaki kum tabakasının oturma-zaman değişimlerinden ise su filmi oluşumu- zaman davranışı ile alt tabakanın oturma-zaman davranışının eş zamanlı olarak geliştiği görülmektedir.

5.5.3 L3-A, L3-B ve L3-C model deneyleri (Silt ara tabakalı % 60 rölatif sıklıkta kum kolonları)

İnce bir silt tabakası içeren ve %60 rölatif sıklıkta hazırlanan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yüklemeler maruz bırakılarak, artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilmiş ve Ekler bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.17, Şekil Ek 1.18 ve Şekil Ek 1.19'da verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin genellikle diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile benzer olduğu görülmektedir. L3-A deneyinde artık boşluk suyu basınçları maksimum değerine ulaştıktan sonra ani bir şekilde azalma görülmektedir. Bu ani azalmanın kumun sarsıntı sırasında dilate olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.17, Şekil Ek 2.18 ve Şekil Ek 2.19'da sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yüklemeler uygulanan model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g genliğinde sarsıntı etkisinde, yüzeyden 5 cm derinlikte artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeye ulaştığı, daha alt seviyelerde ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerine ulaşmadığı görülmektedir. Daha şiddetli sarsıntı etkisinde (0.30g ivme genliğinde) yüzeyden 20cm derinlikte ölçülen kadar artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, daha derinlerde düşey efektif gerilme değerlerine ulaşmadığı fakat yaklaştığı görülmektedir. Sarsıntı şiddetinin en büyük olduğu (0.40g ivme genliğinde) ise, deneyde tüm zemin kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır.

Silt tabakası altında oluşan ince su tabakasının sarsıntı şiddetinin yüksek olduğu L3-C model

deneyinde hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket ettiği, deneylerde ölçülebilen su filminin sarsıntı sona ermesine rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir.

5.5.4 L4-A, L4-B ve L4-C model deneyleri(Silt ara tabakalı % 72 rölatif sıklıkta kum kolonları)

İnce bir silt ara tabakası içeren ve %72 rölatif sıklıkta hazırlanan kum kolonlarından oluşan zemin modelleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde sarsıntı şiddetlerine maruz bırakılmış ve kaydedilen artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri Ekler bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.20, Şekil Ek 1.21 ve Şekil Ek 1.22'de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimlerinin diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.23g ivme genliğinde sarsıntı uygulanan L4-A deneyinde artık boşluk suyu basıncı artışlarının sınırlı kaldığı ve sarsıntı bitmeden sönümlendiği görülmektedir. Diğer deneylerde artık boşluk suyu basınçlarının hızla maksimum değerlerine ulaştığı, sarsıntının sona ermesi ile birlikte sönümlenmenin başladığı görülmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.20, Şekil Ek 2.21 ve Şekil Ek 2.22'de sırası ile 0.23g,0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yüklemeler uygulanan L4-A, L4-B ve L4-C model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g ve 0.30g şiddetlerinde sarsıntı uygulanan deneylerde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerine ulaşamadığı, dolayısıyla kum kolonunda sıvılaşma oluşmadığı görülmektedir. Daha yüksek şiddette sarsıntı (0.40g ivme genliğinde) uygulanan deneyde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının ise yüzeyden 20cm derinlikte kadar zamanla düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, daha alt seviyelerde ise düşey efektif gerilme değerine yaklaşık olarak eşit hale geldiği görülmektedir. Sarsıntı sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaştığı görülmektedir.

%72 rölatif sıklıktaki silt ara tabakalı kum kolonunda, 0.23g ivme şiddetinde silt tabakası altında su filmi oluşmadığı görülmektedir. 0.30g ve 0.40g ivme genliğine sahip sarsıntı şiddetlerinde ise sarsıntı sırasında silt tabakası altında ince bir su tabakası oluştuğu

gözlemlenmiştir. 0.40g şiddetinde sarsıntı uygulanan deneyde silt tabakası altında oluşan su filminin hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket ettiği gözlenmiştir. Ölçülebilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden, su filminin sarsıntı sona ermesine rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Oluşan su filminin kalınlığının sarsıntı şiddeti ile arttığı, meydana gelen yüzeysel oturmaların miktarının da ivme şiddeti ile arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.

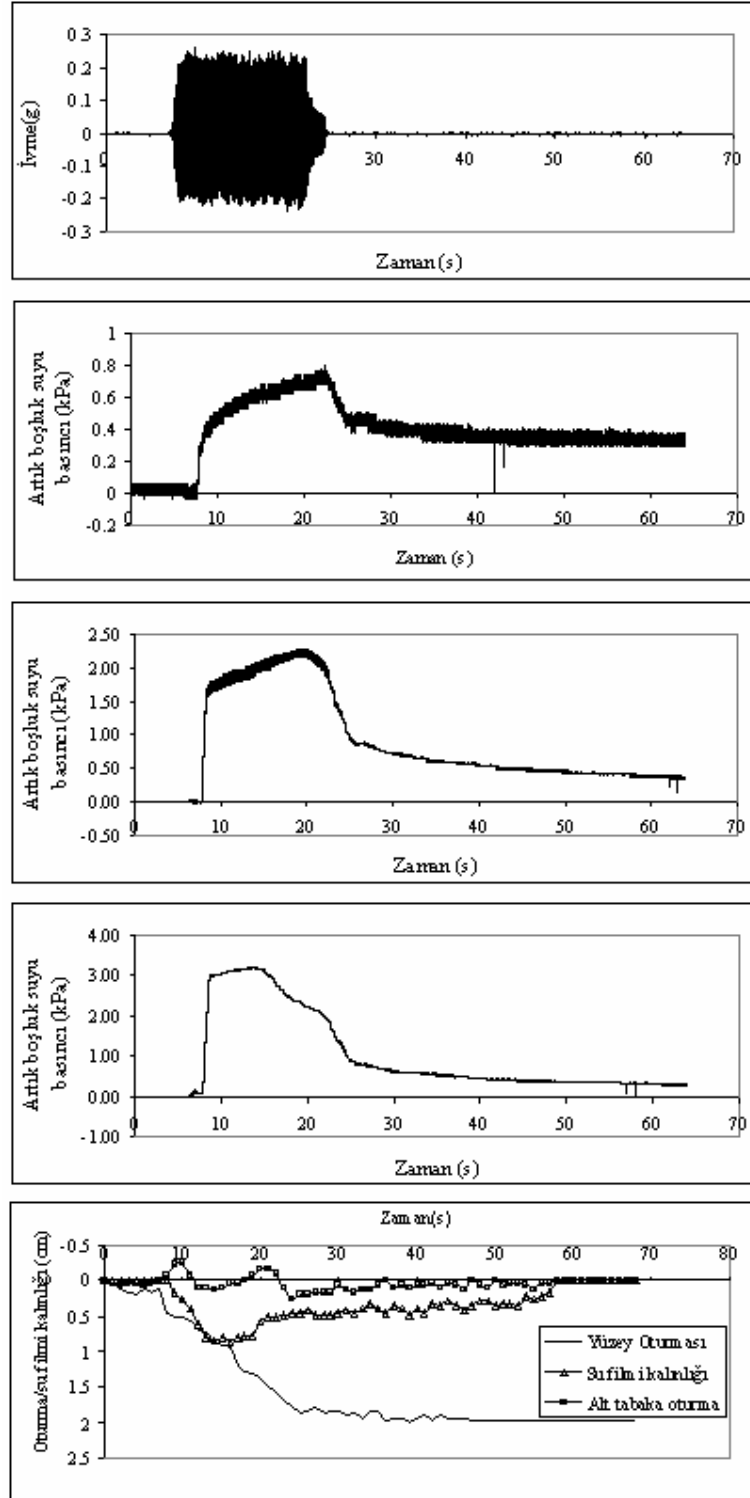
5.5.5 L5-A, L5-B ve L5-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%50 sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Silt ara tabakası altında sıklık derecesi %50 ve üstünde sıklık derecesi %40 olacak şekilde hazırlanan silt ara tabakalı kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde sarsıntılara maruz bırakılarak oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilmiştir. Şekil 5.32’de 0.23g şiddetinde sarsıntı uygulanan deney sonuçları gösterilmiş, diğer sonuçlar Ekler bölümü’nde Şekil Ek 1.23 ve Şekil Ek 1.24’de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişim grafikleri incelendiğinde, alt tabakada artık boşluk suyu basınçlarında sarsıntının başlaması ile birlikte ani bir artış meydana geldiği, üst tabakada bu artışın daha yavaş gerçekleştiği, uygulanan titreşimler süresince devam eden artık boşluk suyu basınçlarındaki artışın bir süre sonra durduğu ve sönümlenmeye başladığı görülmektedir.

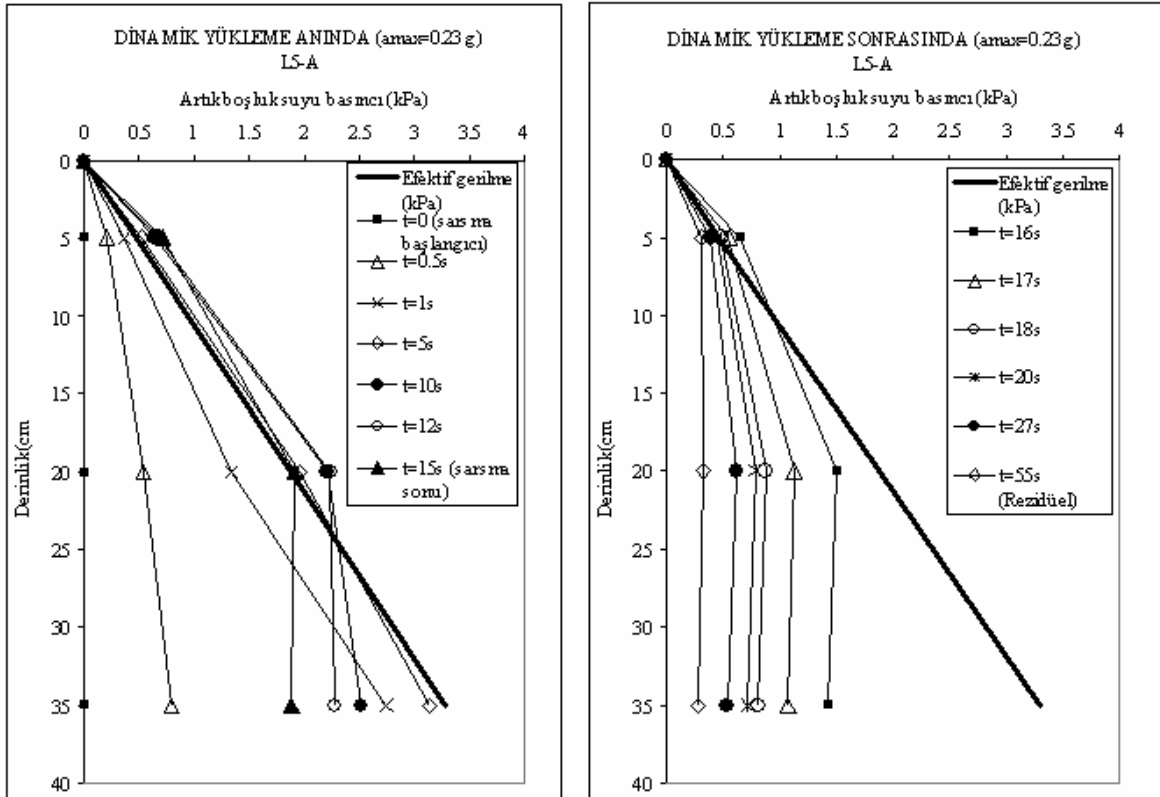
Şekil 5.33’de 0.23g ivme genliğinde dinamik yükleme uygulanan model deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve dinamik sarsıntı sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Diğer deneylere ait sonuçlar Ekler bölümü’nde Şekil Ek 2.23 ve Şekil Ek 2.24’de verilmiştir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronları, 0.23g ivme genliğinde yapılan L5-A deneyinde PPT1 ve PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçlarının zamanla düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığını, PPT3 sensöründe ise düşey efektif gerilme değerlerine yaklaştığını göstermektedir. 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde yapılan L5-B ve L5-C model deneylerinde ise PPT1 ve PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerini aştığı, PPT3 sensöründe ise düşey efektif gerilmeye eşit hale geldiği ve tüm kum kolonunun sıvılaştığı görülmektedir. Artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişim grafiklerinden, sarsıntı şiddeti arttıkça artık boşluk suyu basınçlarının da arttığı, sarsıntı sonrasında ise zamanla düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı

duruma ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.32 L5-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi

Deneyslerde sarsıntı sırasında silt tabakası altında ince bir su tabakası oluştuğu gözlemlenmiştir. Silt ara tabakası altında oluşan su filminin kalınlığının zamanla değişimi yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile birlikte incelendiğinde, oturmalar ve su filmi oluşumunun sarsıntı ile birlikte başladığı görülmektedir. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntı uygulanan deneylerde oluşan su filmi sarsıntı şiddetinin yüksek olmasından dolayı hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket etmiş, bu nedenle su tabakasının kalınlığının ölçümünde zorluklarla karşılaşmıştır. Bununla birlikte, ölçülebilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden, su filminin sarsıntı sona ermesine rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir. L5-A ve L5-B model deneylerinde ölçülen alt tabakanın oturma-zaman değişimlerinden ise alt tabakada sınırlı miktarda (su filmi kalınlığına yakın) oturma meydana geldiği ve su filmi oluşumuna paralel geliştiği görülmektedir. L5-C model deneyinde alt tabakanın oturma-zaman değişimleri ölçülememiştir.



Şekil 5.33 L5-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

5.5.6 L6-A, L6-B ve L6-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%60 sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Silt ara tabakası altında sıklık derecesi %60 ve üstünde %40 olan silt ara tabakalı kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılara maruz bırakılarak, oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilmiş ve Ekler Bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.25, Şekil Ek 1.26 ve Şekil Ek 1.27'de verilmiştir.

Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişim grafikleri incelendiğinde, artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimlerinin genel olarak L5-A, L5-B ve L5-C model deneyinde gözlenen davranışa benzer olduğu görülmektedir. L6-A model deneyinde en derinde yer alan PPT3 sensöründe ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının maksimum değerine ulaştıktan sonra aniden azaldığı gözlenmiştir. Bu ani azalmanın kumun dilate olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

L6-A, L6-B ve L6-C model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı değerlerinin derinlikle ve zamanla, dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında değişimleri Ekler Bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 2.25, Şekil Ek 2.26 ve Şekil Ek 2.27'de gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g ivme genliğinde yapılan PPT1 sensöründe artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeye eşit hale geldiği, PPT2 ve PPT3 sensöründe ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerine ulaşamadığı görülmektedir. 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde yapılan deneylerde ise PPT1 ve PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerini aştığı, PPT3 sensöründe ise düşey efektif gerilme değerine yaklaştığı görülmekte ve tüm kum kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları, artık boşluk suyu basınçlarının zamanla düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaşıldığını göstermektedir.

Deneylerde sarsıntı sırasında silt ara tabakası altında ince bir su tabakası (filmi) olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile birlikte incelendiğinde, oturmalar ve su filmi oluşumunun sarsıntı ile birlikte başladığı, 0.23g, 0.30g şiddetinde sarsıntı uygulanan model deneylerinde kaydedilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden, su filminin sarsıntı sona ermesine rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Ancak, 0.40g şiddetinde sarsıntıya maruz bırakılan L6-C model deneyinde oluşan su filmi hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket

etmiş ve bu nedenle, oluşan su filminin ve alt kum tabakasının oturmasının zamanla değişimi ölçülememiştir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların büyüklüğünün ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir. L6-A ve L6-B model deneylerinde ölçülen alt tabakanın oturma-zaman değişimlerinden ise su filmi oluşumu ile alt tabakanın oturma zaman davranışının eş zamanlı olarak geliştiği görülmektedir.

5.5.7 L7-A, L7-B ve L7-C model deneyleri (Silt ara tabakalı ve %40/%72 sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Sıklık derecesinin silt ara tabakası altında %72 ve üstünde %40 olan silt ara tabakalı kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılara maruz bırakılarak, oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilmiş, ve Ekler bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.28, Şekil Ek 1.29 ve Şekil Ek 1.30'da gösterilmiştir. Artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin genellikle diğer model deneylerde gözlenen davranış ile benzer olduğu görülmektedir.

Ekler Bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.28, Şekil Ek 2.29 ve Şekil Ek 2.30'da sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde dinamik yüklemeler uygulanan model deneylerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g ivme genliğinde yapılan L7-A model deneyinde, PPT1sensöründe artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, PPT2 ve PPT3 sensörlerinde ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerine ulaşamadığı ve sıvılaşmanın sadece üst tabakada meydana geldiği görülmektedir. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntı uygulanan L7-B ve L7-C model deneylerinde ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerini aştığı, veya yaklaşık olarak eşit hale geldiği, tüm kum kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrası artık boşluk suyu basıncı izokronları ise artık boşluk suyu basınçlarının zamanla düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönmüldüğünü ve kararlı duruma ulaştığını göstermektedir.

Silt ara tabakası altındaki kum tabakasının %72 rölatif sıklıkta olması nedeni ile, model deneylerde sarsıntı sırasında alt tabakada oluşan oturmaların ve silt tabakası altında oluşan su filmi kalınlığının çok sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir. Deneyler sırasında meydana gelen

yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden oturmaların üst tabakanın sıkışmasından kaynaklandığı ve büyüklüğünün ivme şiddeti ile birlikte arttığı, ayrıca büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.

5.5.8 İkinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi

İkinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen ve silt ara tabakası altında ve üstünde farklı sıklıkta tabakalardan oluşan kum kolonları üzerinde uygulanan model deneylerde ölçülen yüzeysel oturma miktarları hacimsal şekil değiştirme yüzdeleri (ϵ_v), üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı (r_u) ile bu seviyelerdeki düşey efektif gerilme değerleri Çizelge 5.11’de özetlenmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları, farklı derinliklerde yer alan sensörlerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncının, o derinlikteki düşey efektif gerilmeye bölünmesi ile elde edilmiştir. Ölçülen hacimsal şekil değiştirmelerin ve yüzey oturmalarının sarsıntı şiddeti arttıkça arttığı gözlenmektedir. Dinamik yüklemeler altında oluşan hacimsal şekil değiştirme ve yüzeysel oturmaların genel olarak kumun sıklık derecesi arttıkça azaldığı gözlenmekle birlikte, %40 ve %50 rölatif sıklıkta hazırlanan kum kolonlarında ölçülen değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.11 İkinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar

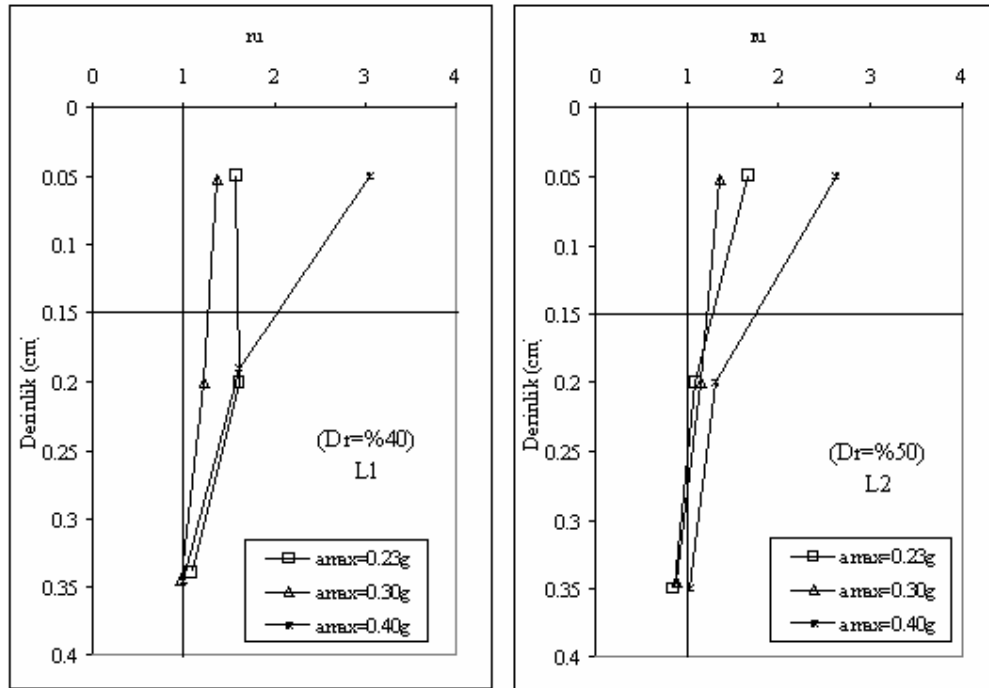
Model No.	Oturma (cm)	Hacimsal Şekil Değiştirme, ε_v (%)	Su filmi kalınlığı (cm)	Düşey efektif gerilme σ'_{vo} (kPa)			Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı $r_{u(max)} (\Delta u / \Delta \sigma'_{vo})$		
				PPT1	PPT2	PPT3	PPT1	PPT2	PPT3
L1-A	1.90	4.20	0.60	0.47	1.83	3.19	1.58	1.62	1.08
L2-A	2.40	5.30	0.90	0.48	1.92	3.35	1.67	1.10	0.86
L3-A	1.48	3.30	0.27	0.484	1.93	3.38	0.97	0.67	0.50
L4-A	0.52	1.15	-	0.498	1.978	3.47	0.64	0.16	0.09
L5-A	1.97	4.40	0.80	0.465	1.87	3.29	1.53	1.20	0.95
L6-A	1.60	3.55	0.77	0.47	1.89	3.34	1.13	0.94	0.88
L7-A	0.60	1.33	-	0.47	1.86	3.40	2.38	0.77	0.26
L1-B	2.33	5.17	0.57*	0.48	1.88	3.25	1.37	1.22	0.97
L2-B	2.31	5.13	1.31	0.48	1.92	3.35	1.35	1.14	0.89
L3-B	1.37	3.00	1.20	0.53	1.93	3.36	1.13	1.05	0.94
L4-B	0.70	1.55	0.40	0.45	1.978	3.47	0.33	0.74	0.82
L5-B	2.73	6.06	1.60*	0.465	1.87	3.29	1.78	1.33	0.98
L6-B	2.56	5.69	1.61	0.47	1.89	3.34	1.38	1.12	0.95
L7-B	1.77	3.93	0.35	0.47	1.91	3.40	1.19	1.08	0.90
L1-C	2.38	5.29	*	0.46	1.85	3.22	3.06	1.62	1.00
L2-C	2.84	6.31	0.39*	0.48	1.92	3.35	2.62	1.31	1.03
L3-C	2.30	5.11	*	0.484	1.93	3.38	2.23	1.22	0.99
L4-C	1.26	2.80	0.58*	0.498	1.978	3.47	1.00	1.10	0.97
L5-C	3.03	6.73	*	0.465	1.87	3.29	3.55	1.79	1.00
L6-C	2.70	6.00	*	0.47	1.89	3.34	3.13	1.41	1.01
L7-C	1.88	4.18	0.3*	0.47	1.91	3.40	2.02	1.12	0.97

*Su filmi silt daneleri ile birlikte kısmen veya tamamen kum yüzeyine taşınmıştır.

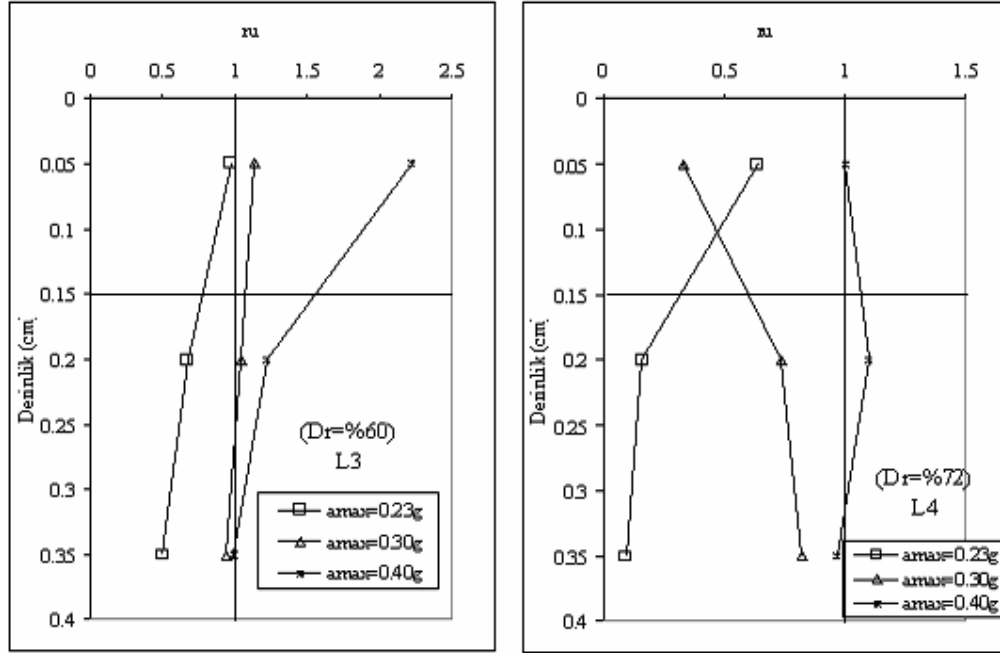
İkinci seri deneyler kapsamında yapılan silt ara tabakalı kum kolonları üzerinde yapılan model deneylerinde, kum kolonunun arasına yerleştirilen ve geçirimsizliği daha az olan bir silt tabakası altında ince bir su filmi olduğu gözlenmiştir. Çizelge 5.11’de görüldüğü gibi, alt kum tabakasının sıkılık derecesinin ve uygulanan sarsıntının şiddetinin su filmi oluşumu ve kalınlığı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Silt tabakası altındaki kumun sıkılık derecesi azaldıkça, alt tabakanın sıkışması ve su filmi oluşumu artmaktadır. Dolayısıyla, arazide su filmi oluşumunun zararlı etkilerinin, geçirimsizliği düşük tabakalar (silt, kil) altında gevşek kum tabakalarının yer aldığı sahalarda daha fazla olacağı anlaşılmaktadır (Tohumcu vd., 2006). Deneyler sırasında, 0.23g ve 0.30g ivme genliklerinde su filminin kalınlığının genel olarak sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı saptanmış, ancak yüksek ivme genliğinde (0.40g) sarsıntılar uygulanan deneylerde silt ara tabakası altında su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak zemin yüzeyine doğru hareket ettiği gözlemlenmiş ve sağlıklı ölçümler yapılamamıştır. Su filmi oluşumunda dinamik yükleme sırasında silt tabakası altındaki kum

tabakasında ulaşılan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının da etkili olduğu görülmüştür. Silt tabakası altındaki kum tabakası için hesaplanan ortalama artık boşluk suyu basıncı oranı büyüklüğünün su filmi oluşumu üzerinde etkili olduğu ve artık boşluk suyu basınçları sıvılaşma mertebelerine ulaşmadan da su filmi oluşabildiği görülmektedir.

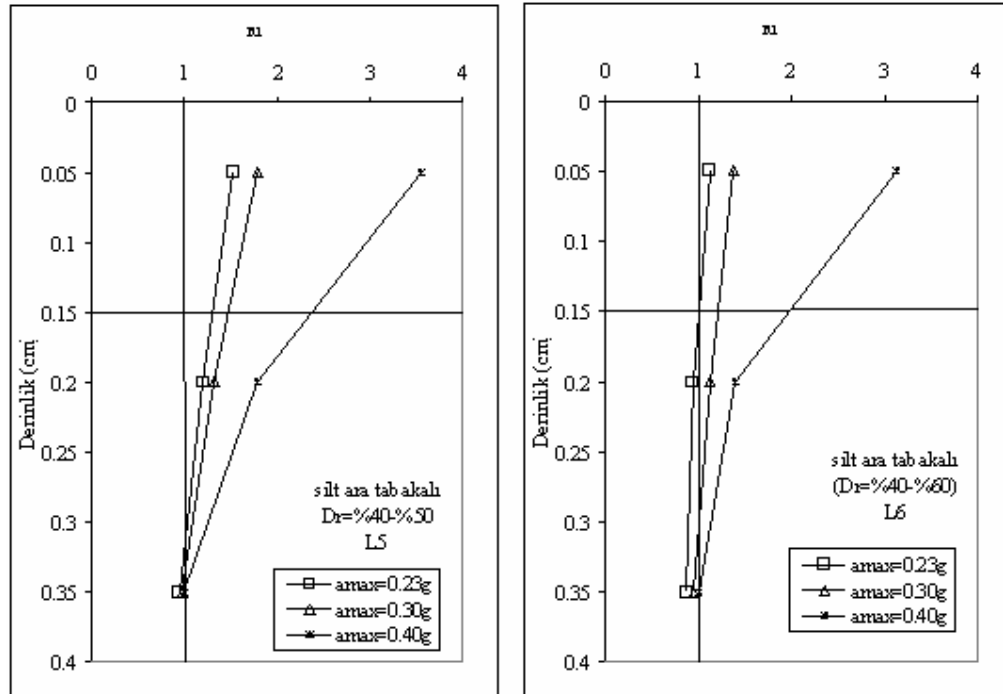
Silt ara tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının $((r_u)_{\max})$ sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri silt tabakası altında ve üstünde aynı sıklıkta kum olması durumu için Şekil 5.34'de, silt tabakası altında farklı sıklıklarda kum olması durumları için ise Şekil 5.35'de gösterilmiştir. Bu şekillerde gösterilen grafiklerden, aynı rölatif sıklıktaki silt ara tabakalı kum kolonlarında artık boşluk suyu basıncı oranlarının artan ivme genliği ile birlikte genel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, genel olarak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle birlikte azaldığı görülmekte ve dolayısıyla yüzeye yakın kesimlerde sıvılaşma olasılığının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



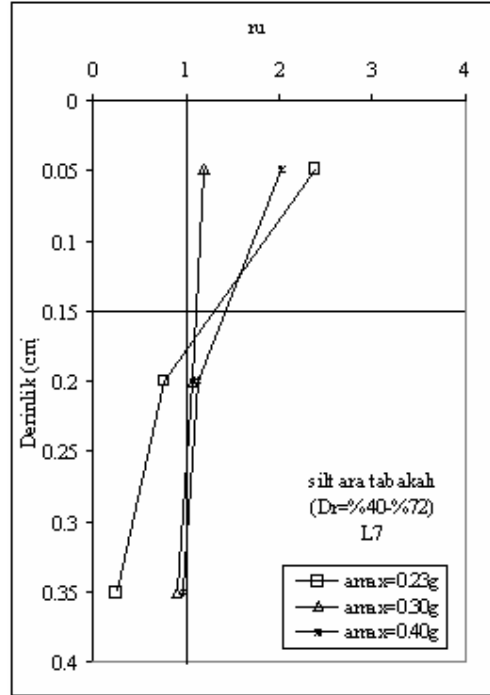
Şekil 5.34a Silt ara tabakalı üniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının farklı sarsıntı şiddeti etkisinde derinlikle değişimi ($D_r=40\%$ ve $D_r=50\%$)



Şekil 5.34b. Silt ara tabakalı üniform kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi ($D_r=\%60$ ve $D_r=\%72$)



Şekil 5.35a. Silt ara tabakası içeren tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L5 ve L6 model deneyleri)



Şekil 5.35b. Silt ara tabakası içeren tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L7 model deneyi)

5.6 Üçüncü Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında yapılan üçüncü seri deneylerde, gevşek bir kum tabakası altında daha sıkı bir kum tabakasının yer aldığı durumları modellemek için “Tabakalı kum” kolonlarının dinamik yükleme altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla özellikleri Çizelge 5.6’da verilen tabakalı kum kolonları üzerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanmış ve boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi davranışı yanında, kum kolonunda meydana gelen oturmaların zamanla değişimi incelenmiştir. Üçüncü seri deneyler kapsamında yapılan 9 adet model deneyden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

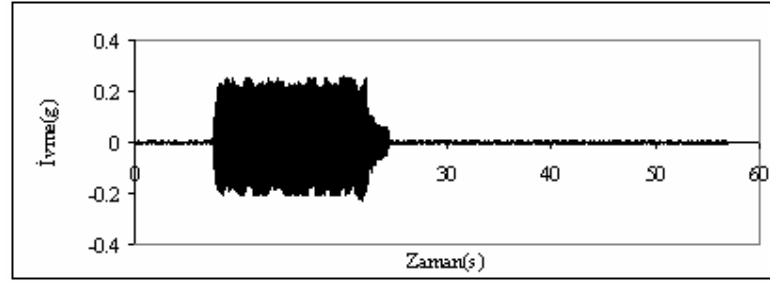
5.6.1 L8-A, L8-B ve L8-C model deneyleri (%40/%50 rölatif sıkılıkta tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıkılığı %40 olan bir tabaka altında %50 sıkılıkta bir tabakadan oluşan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g maksimum ivme genliklerinde sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeyel oturma-zaman değişimleri kaydedilmiştir. Şekil 5.36’da 0.23g şiddetinde sarsıntı uygulanan deney sonuçları gösterilmiş, diğer sonuçlar Ekler

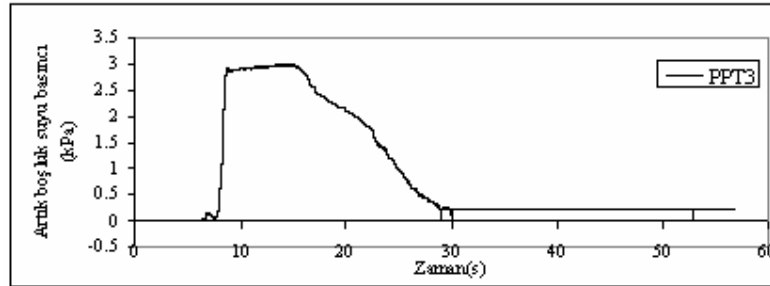
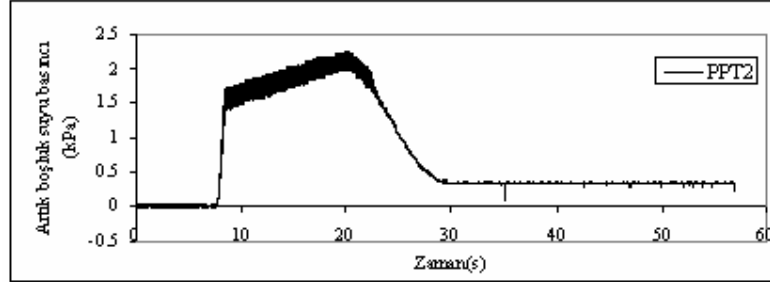
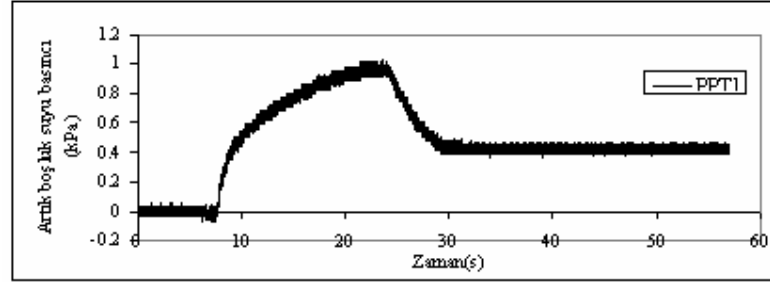
bölümü'nde Şekil Ek 1.31 ve Şekil Ek 1.32'de verilmiştir. Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin genellikle diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile benzer olduğu görülmektedir.

Şekil 5.37'de 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler uygulanan model deneylerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde yapılan deneylere ait sonuçlar ise Ekler bölümü'nde Şekil Ek 2.31 ve Şekil Ek 2.32'de verilmiştir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g şiddetinde sarsıntı uygulanan L8-A modelinde PPT1, PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçları düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaşırken, PPT3 sensöründe artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerine ulaşamadığı ve kum kolonunda sıvılaşmanın ilk 25cm'de etkili olduğu görülmektedir. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılara maruz bırakılan modellerde ise PPT1 ve PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerini aştığı, PPT3 sensöründe ise düşey efektif gerilme değerine eşit hale geldiği ve tüm kum kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrası artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaşıldığı görülmektedir.

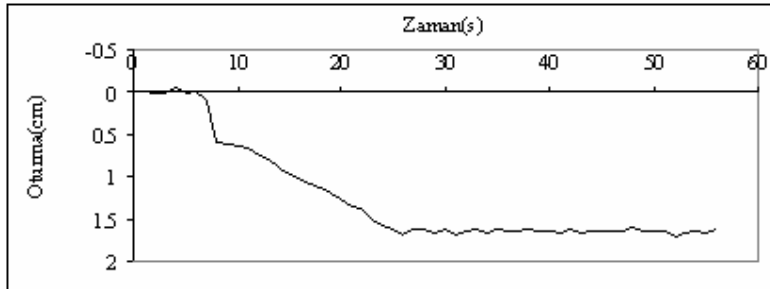
Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir.



(a)

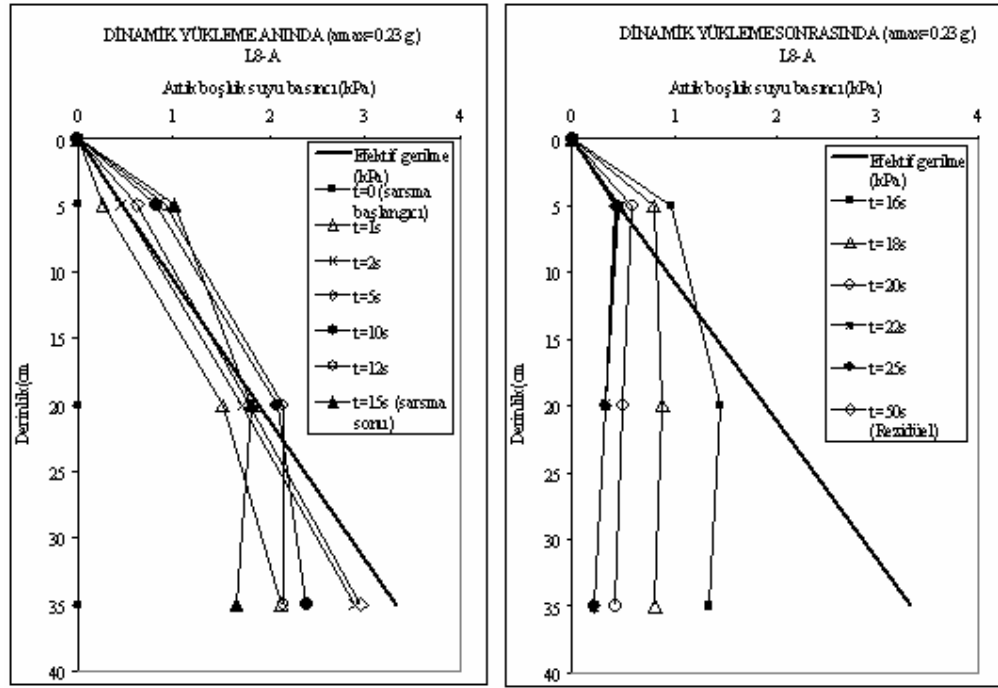


(b)



(c)

Şekil 5.36 L8-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



Şekil 5.37 L8-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları (a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

5.6.2 L9-A, L9-B ve L9-C model deneyleri (%40/%60 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka altında %60 sıklıkta bir tabakadan oluşan kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.4g şiddetinde sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşacak artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma-zaman değişimleri kaydedilerek Ekler bölümü'nde sırası ile, Şekil Ek 1.33, Şekil Ek 1.34 ve Şekil Ek 1.35'de verilmiştir.

Oluşan artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin genellikle diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile benzer olduğu, basınçlardaki artışın bir süre sonra durduğu ve sönümlenmeye başladığı görülmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.33, Şekil Ek 2.34 ve Şekil Ek 2.35'de sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılara maruz bırakılan model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının zamanla değişiminden, 0.23g ve 0.30g şiddetinde sarsıntı etkisinde, PPT1 ve PPT2 sensörlerinde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmelere eşit veya daha büyük değerlere ulaştığı, PPT3 sensöründe ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme

değerine ulaşamadığı görülmekte, sıvılaşmanın yüzeyden itibaren 25cm derinliğe kadar olduğu anlaşılmaktadır. 0.40g şiddetinde sarsıntı etkisinde ise bütün sensörlerde artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmelere eşit veya daha büyük değerlere ulaştığı, ve tüm kum tabakasının sıvılaştığı görülmektedir. Sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronlarından artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaşıldığı görülmektedir.

Deneyler sırasında ölçülen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir.

5.6.3 L10-A, L10-B ve L10-C model deneyleri (%40/%72 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka altında %72 sıklıkta bir tabakadan oluşan kum kolonları üzerinde uygulanan 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma-zaman değişimleri, Ekler Bölümü'nde sırası ile Şekil Ek 1.36, Şekil Ek 1.37 ve Şekil Ek 1.38'de verilmiştir.

0.23g şiddetinde sarsıntı uygulanan L10-A deneyinde, alttaki sıkı kum içerisine yerleştirilmiş, PPT2 ve PPT3 sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının maksimum değerine ulaştıktan sonra sarsıntı henüz devam ederken hızla azalmaya başladığı görülmektedir. Benzer davranış 0.30g sarsıntıya maruz bırakılan L10-B deneyinde de görülmekte, bunun alt kum tabakasının dilate olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının maksimum değerlerinde genel olarak artan ivme şiddeti ile birlikte bir artış olduğu, artışın bir süre sonra durduğu ve sönümlenmeye başladığı görülmektedir.

Gevşek kum tabakası altında yer alan kum tabakasının sıklık derecesinin artık boşluk suyu basınçlarının oluşum ve sönümlenme davranışında bazı farklılıklara yol açtığı gözlenmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.36, Şekil Ek 2.37 ve Şekil Ek 2.38'de sırası ile, 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, 0.23g ve 0.30g şiddetinde sarsıntılar etkisinde sadece üst gevşek tabakada artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeye eşit hale geldiği, alt sıkı tabakada ise düşey efektif gerilme

değerlerine ulaşamadığı, kum kolonunda sadece üst gevşek tabakada sıvılaşma olduğu görülmektedir. 0.40g şiddetinde sarsıntı etkisinde ise derinlik boyunca artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmeye eşit veya daha büyük hale geldiği ve tüm kum kolonunda sıvılaşma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronlarından artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiği ve kararlı duruma ulaşıldığı, meydana gelen yüzeysel oturmaların ise ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir.

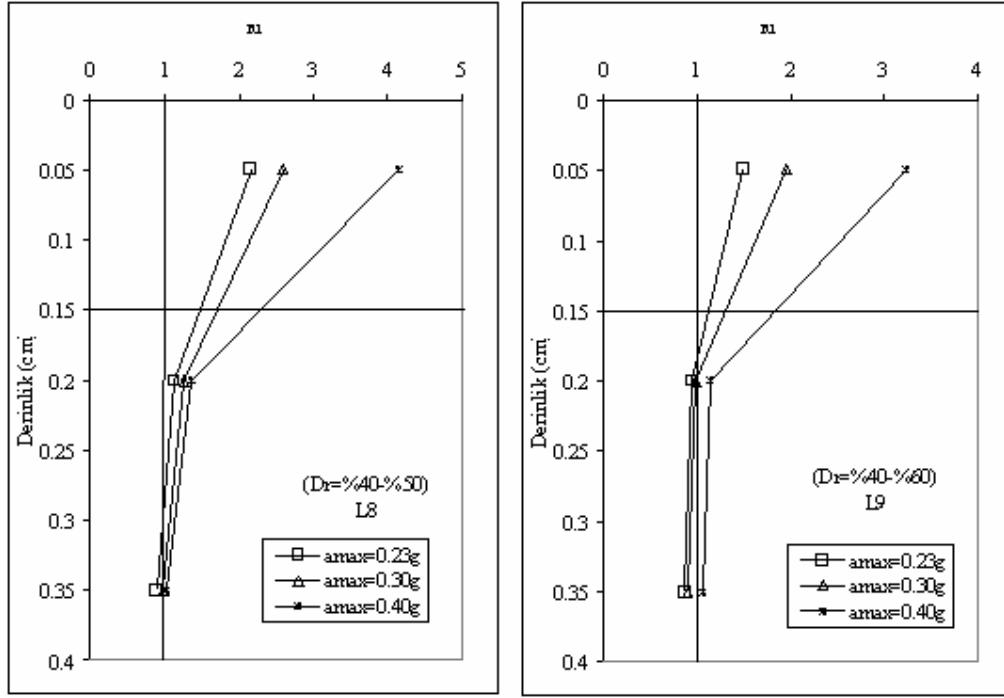
5.6.4 Üçüncü seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası altında daha sıkı kum çökellerinin yer aldığı durumları modellemek için üçüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen model deneylerinde ölçülen yüzeysel oturma miktarları, hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri(ϵ_v), farklı derinliklerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları (r_u) ve bu seviyelerdeki düşey efektif gerilme değerleri Çizelge 5.12’de özetlenmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları, farklı derinliklerde yer alan sensörlerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncının, o derinlikteki düşey efektif gerilmeye bölünmesi ile elde edilmiştir. Çizelge 5.12’de görüldüğü gibi hacimsel şekil değiştirmeler ve yüzeysel oturmalar artan ivme şiddeti ile birlikte artmaktadır. Oturmalar ve hacimsel şekil değiştirmeler üzerinde alt tabakanın etkisinin daha az belirgin olduğu gözlenmektedir.

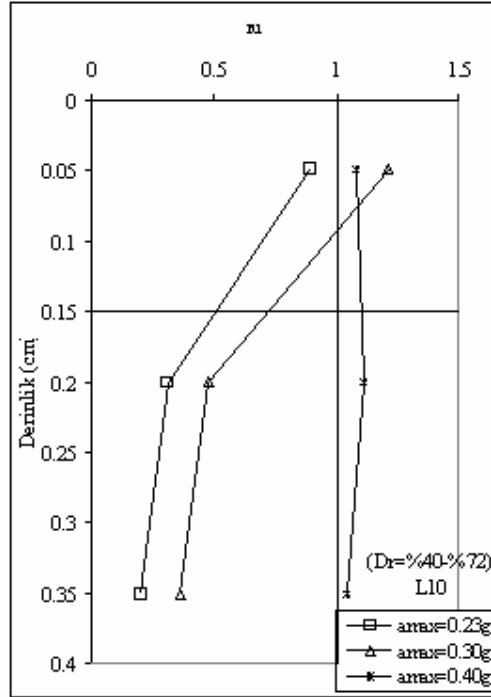
Çizelge 5.12 Üçüncü seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar

Model No.	Oturma (cm)	Hacimsel Şekil Değiştirme, ϵ_v (%)	Düşey efektif gerilme σ_{vo}' (kPa)			Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı $r_{u(max)} (\Delta u / \Delta \sigma_{vo}')$		
			PPT1	PPT2	PPT3	PPT1	PPT2	PPT3
L8-A	1.62	3.60	0.47	1.89	3.33	2.15	1.14	0.89
L9-A	1.03	2.30	0.47	1.895	3.35	1.49	0.96	0.87
L10-A	1.04	2.31	0.47	1.91	3.40	0.89	0.31	0.20
L8-B	1.96	4.35	0.47	1.89	3.33	2.59	1.25	0.98
L9-B	1.83	4.06	0.47	1.895	3.35	1.96	0.98	0.90
L10-B	1.44	3.20	0.47	1.96	3.40	1.21	0.48	0.36
L8-C	2.10	4.67	0.47	1.89	3.33	4.14	1.36	1.02
L9-C	2.20	4.89	0.376	1.80	3.25	3.24	1.14	1.05
L10-C	1.50	3.33	0.47	1.96	3.40	0.96	1.11	1.04

Gevşek bir kum tabakası altında daha sıkı bir kum tabakasının yer aldığı “Tabakalı Kum” kolonlarında dinamik yüklemeler etkisinde oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının(r_u) maksimum değerlerinin uygulanan ivme genlikleri ve derinlikle değişimleri Şekil 5.38’de gösterilmiştir. Üstteki %40 rölatif sıkılık derecesine sahip tabaka altında %50 ve %60 sıkılıkta tabakaların yer aldığı deneylerde, üst tabakada oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının artan ivme genliği ile birlikte arttığı, ancak alt tabakada sarsıntı şiddetinin etkisinin çok belirgin olmadığı görülmektedir. Üst tabakanın %40, alt tabakanın ise %72 sıkılıkta olduğu model deneyinde ise artık boşluk suyu basıncı oranlarının artan ivme şiddeti ile genel olarak arttığı ancak gerek üst gerekse alt tabakada ulaştığı maksimum değerlerin daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.38a Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L8 ve L9 model deneyleri)



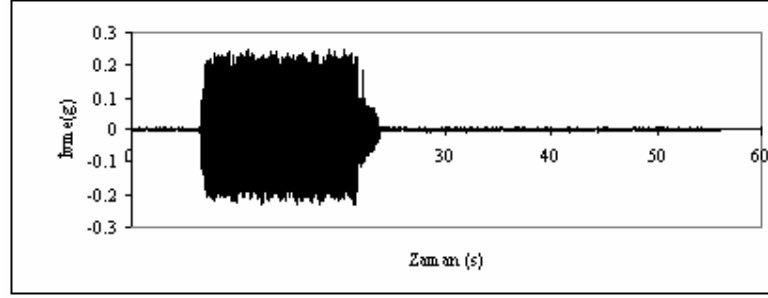
Şekil 5.38b Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L10 model deneyi)

5.7 Dördüncü Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

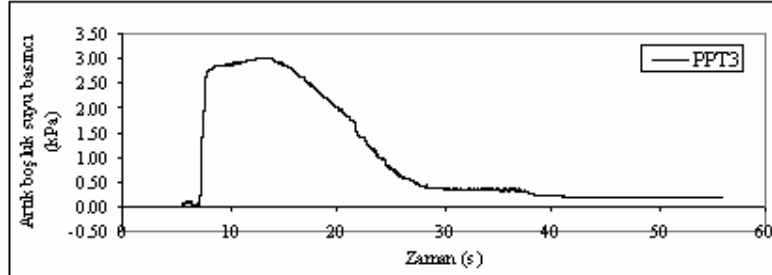
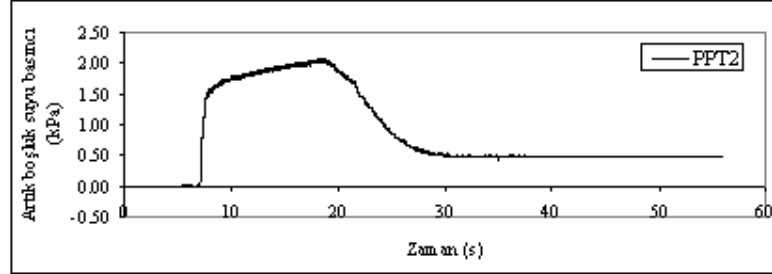
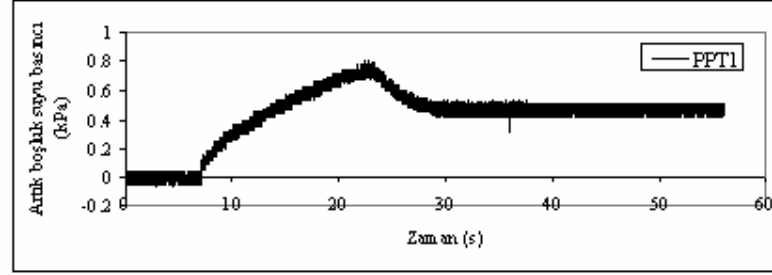
Bu tez çalışması kapsamında yapılan dördüncü seri deneylerde, gevşek bir kum tabakası üzerinde, daha sıkı kum tabakalarının yer aldığı durumların modellenmesi için “Tabakalı Kum” kolonlarının dinamik yükleme altındaki davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla özellikleri Çizelge 5.7’de verilen tabakalı kum kolonları üzerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanmış ve boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi davranışı yanında, meydana gelen oturmaların zamanla değişimi incelenmiştir. Dördüncü seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen 9 adet model deneyden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.7.1 L11-A, L11-B ve L11-C model deneyleri (%50/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları)

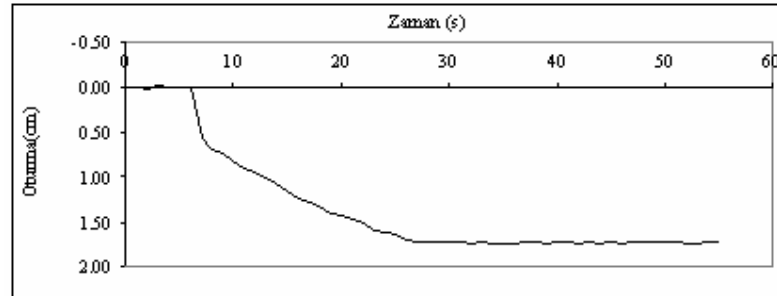
Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka üzerinde %50 sıklıkta bir tabakadan oluşan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma-zaman değişimleri kaydedilerek, 0.23g ivme genliğinde yapılan model deneyi için Şekil 5.39’da, 0.30g ve 0.40 ivme genliklerindeki model deneyler için ise Ekler bölümü’nde, sırası ile Şekil Ek 1.39 ve Şekil Ek 1.40’da verilmiştir.



(a)



(b)

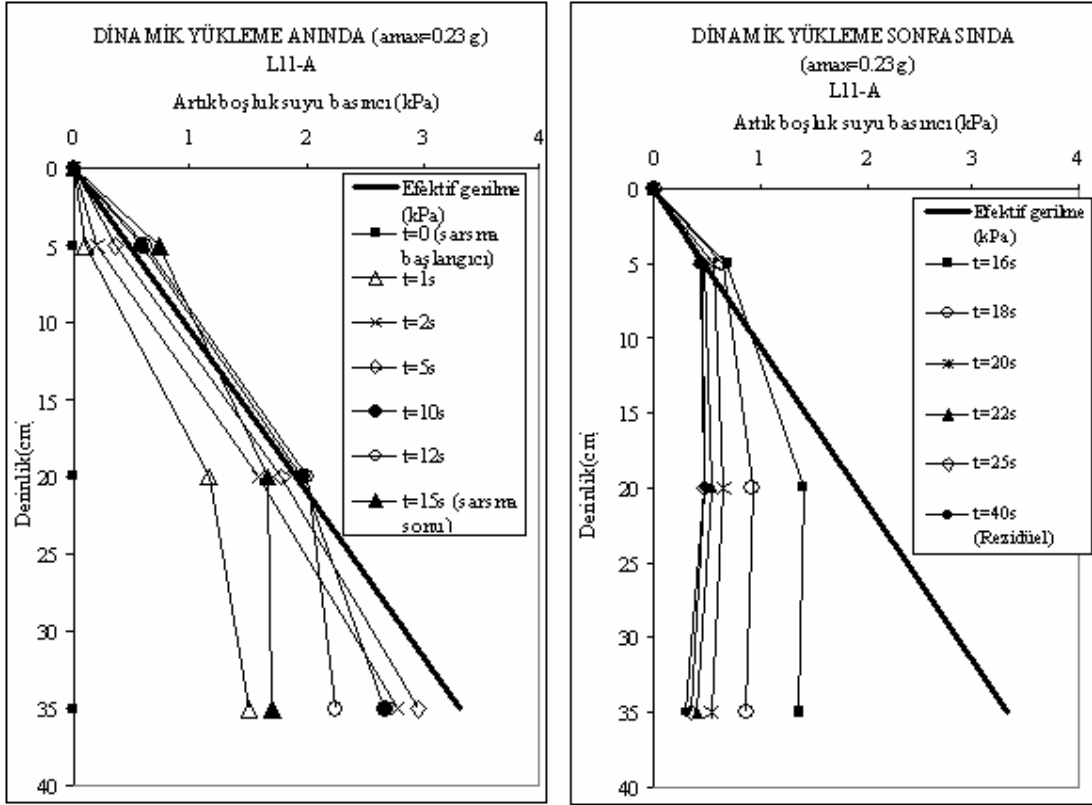


Şekil 5.39 L11-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin daha önceki modeller üzerinde yapılan deneylerde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılarda, farklı derinliklerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerlerinde artan ivme şiddeti ile birlikte bir artış olduğu görülmektedir.

Şekil 5.40'da 0.23g ivme genliğinde dinamik yükleme uygulanan model deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve dinamik sarsıntı sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Diğer deneylere ait sonuçlar Ekler bölümü'nde Şekil Ek 2.39 ve Şekil Ek 2.40'da verilmiştir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, 0.23g sarsıntı etkisinde, en üstte yer alan PPT1 ve orta kısımda yer alan PPT2 sensörlerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerini aştığı, PPT3 sensöründe düşey efektif gerilme değerine ulaşmadığı görülmekte, dolayısı ile sıvılaşmanın zemin yüzeyinden itibaren 25cm derinliğe kadar meydana geldiği anlaşılmaktadır. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilmelere yakın veya daha büyük değerlere ulaştığı görülmekte ve tüm zemin kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. Sarsıntı sonrası artık boşluk suyu basıncı izokronları artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden giderek uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaşıldığını göstermektedir.

Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.40 L11-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

5.7.2 L12-A, L12-B ve L12-C model deneyleri (%60/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka üzerinde %60 rölatif sıklıkta bir tabakadan oluşan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma-zaman değişimleri kaydedilerek, Ekler bölümü'nde, sırası ile Şekil Ek 1.41, Şekil Ek 1.42 ve Şekil Ek 1.43'de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin genel olarak diğer modeller üzerinde yapılan deneylerde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir.

0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde, üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerlerinde, artık boşluk suyu basınçlarında artan ivme şiddeti ile birlikte bir artış olduğu görülmekle birlikte, 0.30 şiddetinde sarsıntı uygulanan deneyde üst sensörde ölçülen artık boşluk suyu basıncında bir uyumsuzluk olduğu görülmektedir.

Ekler Bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.41, Şekil Ek 2.42 ve Şekil Ek 2.43'de sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde model deneylerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri

gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, 0.23g şiddetinde sarsıntı etkisinde üst iki sensörde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerini aştığı, en alttaki sensörde ise düşey efektif gerilme değerine ulaşmadığı görülmekte ve yüzeyden itibaren ilk 25 cm'lik kısmında sıvılaşma olduğu anlaşılmaktadır. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ise (deneysel uyumsuzluk gözlenen L12-A deneyi PPT1 sensörü okuması hariç) boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerlerine eşit hale geldiği veya aştığı ve tüm kum kolonunun sıvılaştığı görülmektedir. Sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaşıldığını göstermektedir.

Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu görülmektedir.

5.7.3 L13-A, L13-B ve L13-C model deneyleri(%72/%40 rölatif sıklıkta tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka üzerinde,%72 rölatif sıklıkta bir tabakadan oluşan kum kolonları 0.23g, 0.30g ve 0.40g genliklerinde sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman ve yüzeysel oturma-zaman değişimleri kaydedilerek Ekler bölümü'nde, sırası ile, Şekil Ek 1.44, Şekil Ek 1.45 ve Şekil Ek 1.46'da verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin diğer model deneylerde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde, üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerleri, artık boşluk suyu basınçlarının artan ivme şiddeti ile birlikte arttığını göstermektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.44, Şekil Ek 2.45 ve Şekil Ek 2.46'da sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g sarsıntılar etkisinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, 0.23g şiddetinde sarsıntı etkisinde üstteki iki sensörde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerini aştığı, en alttaki sensörde düşey efektif gerilme değerine yaklaştığı görülmekte, yüzeyden 25cm derinliğe kadar kum kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ise, artık boşluk suyu basınçları düşey efektif gerilme değerini

aştığı veya yaklaşık olarak eşit hale geldiği görülmekte, tüm kolonunun sıvılaştığı anlaşılmaktadır.

Gevşek bir kum tabakası üzerinde yer alan daha sıkı kum tabakalarından oluşan kum kolonları üzerinde uygulanan model deneylerinde ölçülen bazı artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerini aşmasının alttaki gevşek kum tabakasında oluşan yüksek su basınçlarının yol açtığı yukarı doğru su hareketinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Özellikle, üst kum tabakasının sıklık derecesinin %72 olduğu L13 deneyinde, gevşek olan alt kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının suyun yukarı yönlü hareketi sırasında üstte yer alan sıkı kumdaki boşluk suyu basınçlarını artırarak, bu tabakada sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasına yol açtığı düşünülmektedir.

Sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaştığını göstermektedir.

Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.

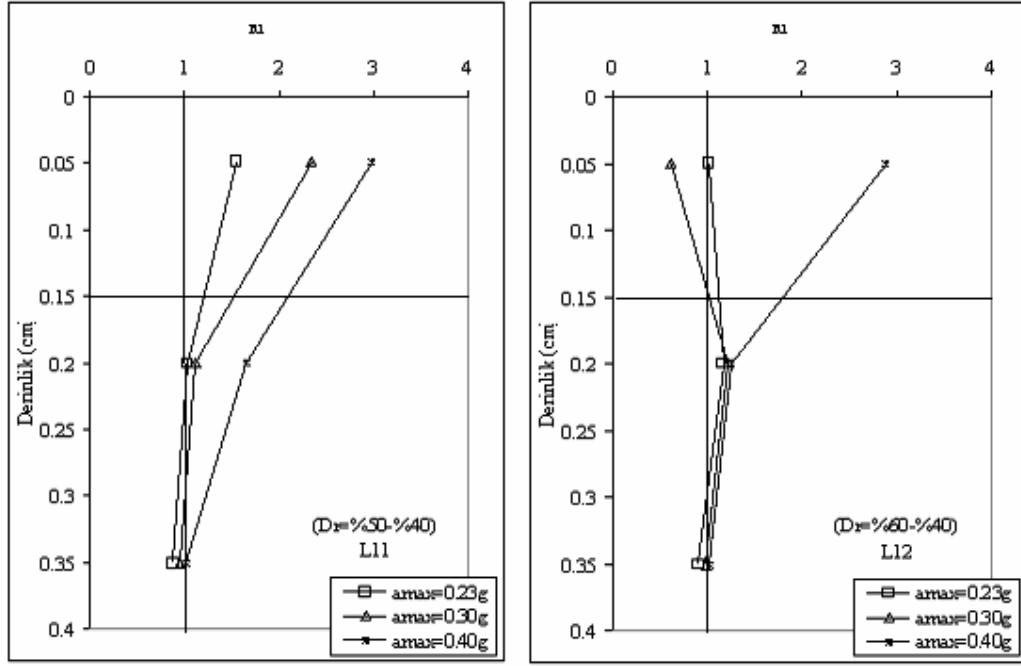
5.7.4 Dördüncü seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı kum tabakalarının yer aldığı durumların dinamik yükleme sırasındaki davranışlarının araştırılması amacı ile gerçekleştirilen dördüncü seri deneylerde ölçülen yüzeysel oturma miktarları, hacimsal şekil değiştirme yüzdeleri(ϵ_v), farklı derinliklerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları, $(r_u)_{max}$, ve bu seviyelerdeki düşey efektif gerilme değerleri Çizelge 5.13’de özetlenmiştir. Çizelge 5.13’den oluşan hacimsal şekil değiştirmelerin ve yüzey oturmalarının artan sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı görülmektedir.

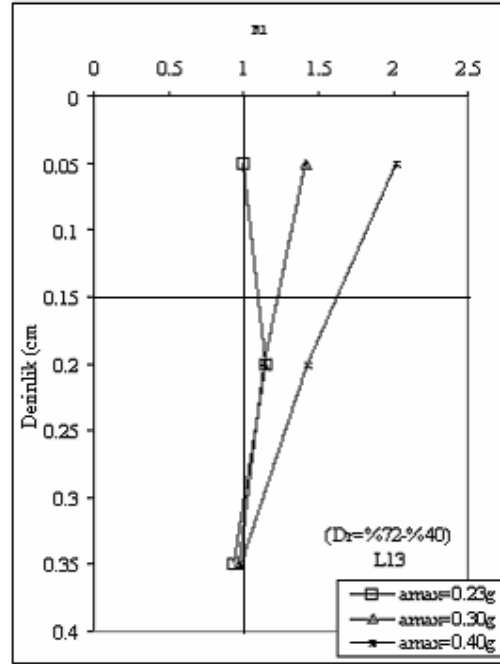
Çizelge 5.13 Dördüncü seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar

Model No.	Oturma (cm)	Hacimsel Şekil Değişirme, ε_v (%)	Düşey efektif gerilme σ_{vo}' (kPa)			Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı $r_{u(max)} (\Delta u / \Delta \sigma_{vo}')$		
			PPT1	PPT2	PPT3	PPT1	PPT2	PPT3
L11-A	1.72	3.80	0.48	1.91	3.32	1.56	1.03	0.88
L12-A	1.81	4.00	0.484	1.92	3.33	1.03	1.17	0.90
L13-A	1.20	2.67	0.498	1.96	3.37	1.00	1.15	0.94
L11-B	1.83	4.00	0.48	1.91	3.32	2.35	1.12	0.95
L12-B	1.95	4.30	0.484	1.92	3.33	0.62	1.23	0.99
L13-B	1.63	3.66	0.498	1.96	3.37	1.42	1.14	0.97
L11-C	2.21	4.95	0.48	1.91	3.32	2.98	1.65	1.02
L12-C	2.05	4.60	0.484	1.92	3.33	2.89	1.26	1.03
L13-C	1.84	4.13	0.498	1.96	3.37	2.02	1.43	0.98

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı tabakaların yer aldığı “Tabakalı Kum” kolonlarında oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının maksimum değerinin ($r_{u(max)}$) ivme genlikleri ve derinlikle değişimleri Şekil 5.41’de gösterilmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları, deneylerde farklı derinliklerde yer alan sensörlerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncının, o derinlikteki düşey efektif gerilmeye bölünmesi ile elde edilmiştir. Aynı derinliklerdeki maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının ivme şiddeti değişimleri, sarsıntı şiddeti arttıkça artık boşluk suyu basıncı oranlarının genel olarak arttığını göstermektedir. Üstte yer alan tabakanın sıklık derecesinin artması oluşan artık boşluk suyu basınçlarında bir miktar azalmaya yol açmakla birlikte, alt tabakada oluşan boşluk suyu basınçları üzerindeki etkisinin çok belirgin olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 5.41a Tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L11 ve L12 model deneyleri)



Şekil 5.41b Tabakalı kum kolonlarında artık boşluk suyu basıncı oranının farklı sarsıntı şiddeti etkisinde derinlikle değişimi (L13 model deneyi)

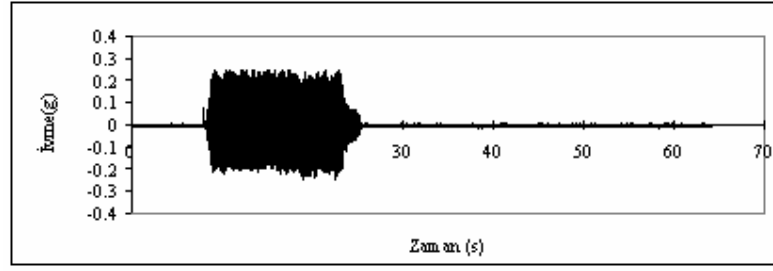
5.8 Beşinci Seri Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen beşinci seri deneylerde, gevşek bir kum tabakası ile üzerindeki daha sıkı kum çökelleri arasında ince bir silt tabakası olan durumları modellemek için silt ara tabakası içeren tabakalı kum kolonları hazırlanarak 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanmış ve boşluk suyu basıncı oluşumu ve sönümlenmesi davranışı yanında, kum kolonunda meydana gelen oturmaların ve silt ara tabakası altında su filminin oluşumunun incelenmesi amaçlanmıştır. Beşinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen ve özellikleri Çizelge 5.8’de verilen 9 adet model deneyden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

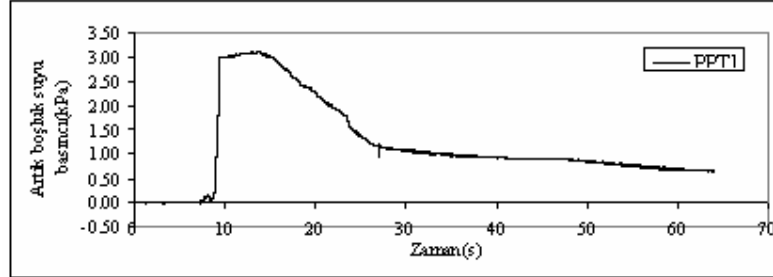
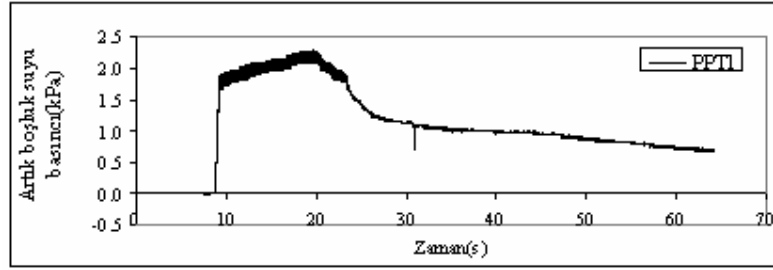
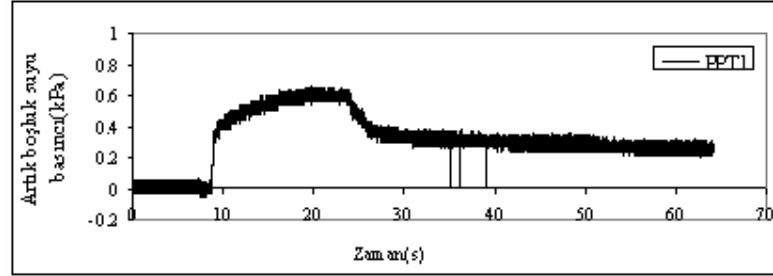
5.8.1 L14-A, L14-B ve L14-C model deneyleri (%50/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka ve üzerindeki %50 sıklıkta tabaka ile arasında ince bir silt tabakası olan kum kolonları ivme genlikleri 0.23g, 0.30g ve 0.40g olan sarsıntılara maruz bırakılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilerek 0.23g ivme genliğinde yapılan model deneyi için Şekil 5.42’de, 0.30g ve 0.40 ivme genliklerindeki model deneyler için ise Ekler bölümü’nde, sırası ile Şekil Ek 1.47 ve Şekil Ek 1.48’de verilmiştir. Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerlerinden artan ivme şiddeti ile birlikte bir artış olduğu görülmektedir.

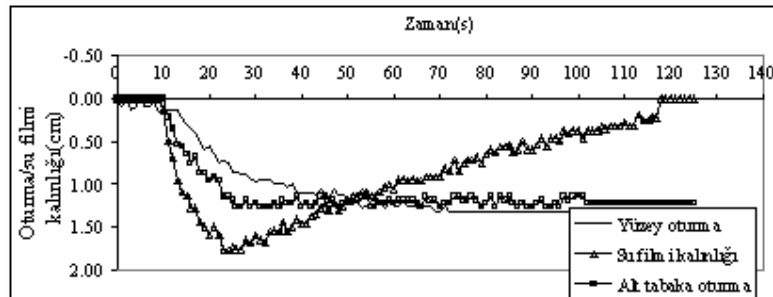
Şekil 5.43’de 0.23g ivme genliğinde dinamik yükleme uygulanan model deneyinde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve dinamik sarsıntı sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Diğer deneylere ait sonuçlar Ekler bölümü’nde Şekil Ek 2.47 ve Şekil Ek 2.48’de verilmiştir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, artık boşluk suyu basınçlarının 0.23g ve 0.30g şiddetinde sarsıntılar etkisinde 25cm derinliğe kadar, 0.40g şiddetinde sarsıntı etkisinde ise tüm derinlik boyunca düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı ve bu derinliklere kadar sıvılaşma durumunun olduğu görülmektedir. Kamera görüntülerinde, oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçlarından dolayı boşluklardaki suyun zemin yüzeyine doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir.



(a)



(b)

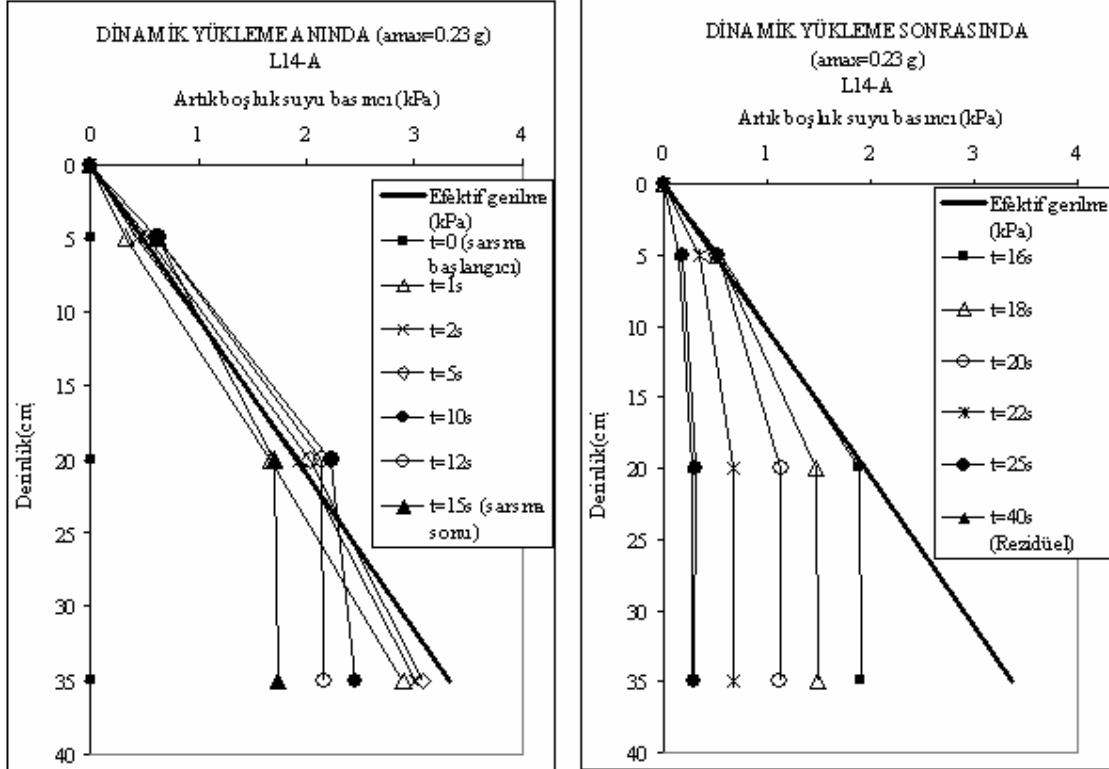


(c)

Şekil 5.42 L14-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı zaman değişimleri

Şekil 5.43, Şekil Ek 2.47 ve Şekil Ek 2.48’de gösterilen sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaşıldığını göstermektedir.

Silt ara tabakası içeren bu model deneylerin sarsıntı sırasında kum tabakasına göre geçirirliiliği daha düşük olan silt tabakası altında ince bir su tabakası(filmi) oluştuğu, oluşan bu su filmi kalınlığının zamanla değişiminin yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan su filmi sızıntı kuvvetlerini de içeren yüksek artık boşluk suyu basınçları nedeni ile hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket etmiş, bu nedenle oluşan su filmi kalınlığı tam olarak ölçülememiştir. Ölçülebilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden su filminin mevcudiyetinin sarsıntının sona ermesinden sonra da rağmen devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı görülmektedir. Oluşan su filminin kalınlığı üzerinde sarsıntı şiddetinin etkisi olduğu görülmektedir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu ve oturmaların daha çok alt tabakanın sıkışmasından kaynaklandığı görülmektedir.



Şekil 5.43 L14-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

5.8.2 L15-A, L15-B ve L15-C model deneyleri (%60/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka ve üzerindeki %60 sıklıkta tabaka arasında ince bir silt tabakası içeren kum kolonları üzerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar uygulanan model deneyleri yapılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilerek Ekler bölümü'nde, sırası ile Şekil Ek 1.49, Şekil Ek 1.50 ve Şekil Ek 1.51'de verilmiştir.

Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin diğer model deneylerinde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir. 0.23g, 0.30g ve 0.40g sarsıntı şiddetlerinde, üç farklı derinlikte ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı değerleri, artık boşluk suyu basınçlarının artan ivme şiddeti ile birlikte bir arttığını göstermektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.49, Şekil Ek 2.50 ve Şekil Ek 2.51'de sırası ile 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, 0.23g şiddetinde sarsıntı etkisinde, artık boşluk suyu basınçlarının yüzeyden 25cm derinliğe kadar düşey efektif gerilmeden daha büyük değerlere ulaştığı, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde ise tüm derinlik boyunca düşey efektif gerilme değerlerine yakın veya daha büyük oldukları görülmekte ve zemin yüzeyinden bu derinliklere kadar sıvılaşma olduğu anlaşılmaktadır. Oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçları ve bundan kaynaklanan hidrolik yük farkından dolayı zemin suyu yüzeye doğru hareket etmekte, bu davranış deneyler sırasında kaydedilen kamera görüntülerinde de görülmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.49, Şekil Ek 2.50 ve Şekil Ek 2.51'de gösterilen sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaştığını göstermektedir.

Silt ara tabakası içeren bu model deneylerinde sarsıntı sırasında kum tabakasına göre geçirirliiliği daha düşük olan silt tabakası altında ince bir su tabakası(filmi) olduğu, oluşan bu su filminin kalınlığının zamanla değişiminin yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Fakat, 0.40g şiddetinde sarsıntı uygulanan model deneyinde oluşan su filmi, yüksek artık boşluk suyu basınçları nedeni ile hızlı bir şekilde silt danelerini

de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket etmiş, su tabakasının kalınlığı sağlıklı olarak ölçülememiştir. Ölçülebilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden su filminin mevcudiyetinin sarsıntının sona ermesinden sonra da devam ettiği ve sönümlenmesinin zaman aldığı, ayrıca, sarsıntı şiddetinin oluşan su filminin kalınlığı üzerinde etksi olduğu görülmektedir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında olduğu ve oturmaların büyük oranda alt tabakanın sıkışmasından kaynaklandığı görülmektedir.

5.8.3 L16-A, L16-B ve L16-C model deneyleri (%72/%40 rölatif sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonları)

Rölatif sıklığı %40 olan bir tabaka ve üzerindeki %72 sıklıkta tabaka ile arasında ince bir silt tabakası içeren kum kolonları üzerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar uygulanan model deneyleri yapılmış ve oluşan artık boşluk suyu basıncı-zaman, oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri ile alt kum tabakasının oturma-zaman değişimleri kaydedilerek Ekler bölümü'nde, sırası ile, Şekil Ek 1.52, Şekil Ek 1.53 ve Şekil Ek 1.54'de verilmiştir. Ölçülen artık boşluk suyu basıncı değişimlerinin diğer model deneylerde gözlenen davranış ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.52, Şekil Ek 2.53 ve Şekil Ek 2.54'de sırası ile, 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının dinamik sarsıntı sırasında ve sonrasında derinlikle ve zamanla değişimleri gösterilmektedir. Sarsıntı sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı izokronlarının değişiminden, her üç sarsıntı şiddeti etkisinde derinlik boyunca artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme değerine eşit veya daha büyük değerlere ulaştığı ve dolayısı ile tüm kum kolonunun sıvılaştığı görülmektedir. Her üç deneyde de bazı yüksek boşluk suyu basınçlarının oluşması nedeni ile zemin suyunun yüzeye doğru hareket ettiği ve üstte yer alan sıkı kum tabakasında da bu etkiden dolayı sıvılaşma durumu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yüksek artık boşluk suyu basıncından kaynaklanan büyük hidrolik yük farkından dolayı suyun yüzeye doğru hareket etmesi deneyler sırasında kaydedilen kamera görüntülerinde de gözlemlenmiştir.

Ekler bölümü'nde verilen Şekil Ek 2.52, Şekil Ek 2.53 ve Şekil Ek 2.54'de gösterilen sarsıntı sonrasındaki artık boşluk suyu basıncı izokronları ise artık boşluk suyu basınçlarının düşey efektif gerilme çizgisinden uzaklaşarak sönümlendiğini ve kararlı duruma ulaştığını göstermektedir.

Silt ara tabakası içeren bu model deneylerinde sarsıntı sırasında silt tabakası altında ince bir su tabakası(filmi) oluştuğu, oluşan su filmi kalınlığının zamanla değişiminin yüzeysel oturma-zaman değişimleri ile uyumlu görülmektedir. Fakat, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar uygulanan L16-B ve L16-C model deneylerinde oluşan su filmi yüksek artık boşluk suyu basınçları nedeni ile hızlı bir şekilde silt danelerini de taşıyarak kenarlardan yüzeye doğru hareket etmiş ve kalınlığı sağlıklı bir şekilde ölçülememiştir. Ölçülebilen su filmi kalınlığı-zaman değişimlerinden su filminin mevcudiyetinin sarsıntı sona erdikten sonra da devam ettiği ve sönümlemesinin zaman aldığı, kalınlığının sarsıntı şiddeti ile arttığı ve sarsıntı şiddetinin su filmi oluşumu üzerinde etkili olduğu gözlenmektedir. Deneyler sırasında meydana gelen yüzeysel oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların ivme şiddeti ile birlikte arttığı ve büyük bir kısmının sarsıntı sırasında oluştuğu görülmektedir.

5.8.4 Beşinci seri deneylerden elde edilen deneysel sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı bir kum tabakası ve arasında ince bir silt tabakası bulunan tabakalı kum zeminlerin dinamik yükleme sırasındaki davranışını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen beşinci seri deneylerde ölçülen yüzeysel oturma miktarları, hacimsel şekil değiştirme yüzdeleri(ϵ_v), farklı derinliklerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları (r_u) ve bu seviyelerdeki düşey efektif gerilme değerleri Çizelge 5.14’de özetlenmiştir. Çizelge 5.14’de görüldüğü gibi hacimsel şekil değiştirmeler ve yüzey oturmaları artan sarsıntı şiddeti ile birlikte artmaktadır.

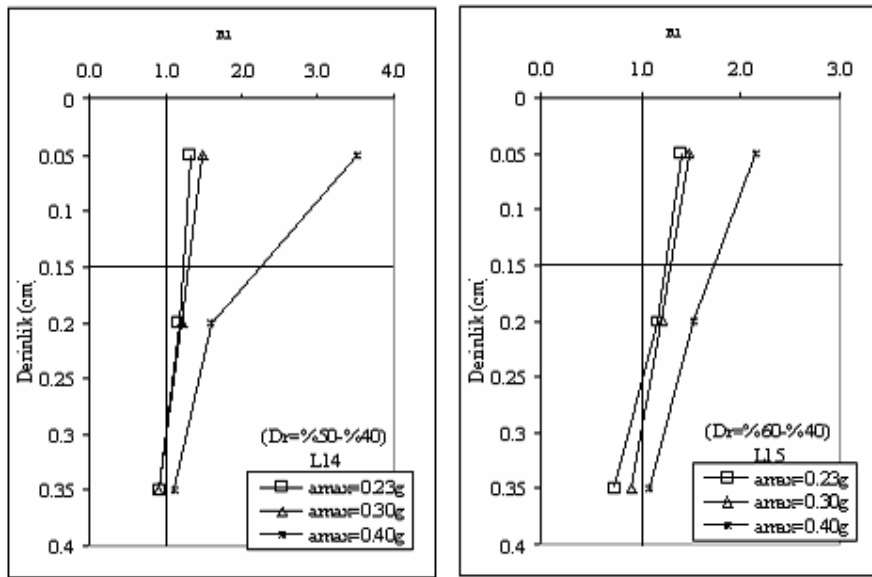
Çizelge 5.14 Beşinci seri deneyler kapsamındaki model deneylerden elde edilen sonuçlar

Model No.	Oturma (cm)	Hacimsel Şekil Değiştirme, ϵ_v (%)	Su filmi kalınlığı (cm)	Düşey efektif gerilme σ_{v0}' (kPa)			Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı $r_{u(max)} (\Delta u / \Delta \sigma_{v0}')$		
				PPT1	PPT2	PPT3	PPT1	PPT2	PPT3
L14-A	1.31	2.91	1.78	0.479	1.91	3.32	1.31	1.17	0.93
L15-A	1.69	3.75	1.28	0.484	1.92	3.33	1.40	1.17	0.73
L16-A	1.26	2.80	1.40	0.498	1.95	3.28	0.96	1.10	1.02
L14-B	1.85	4.10	2.40*	0.479	1.91	3.32	1.48	1.22	0.91
L15-B	1.82	4.04	2.50	0.484	1.92	3.33	0.80	1.23	0.97
L16-B	1.59	3.56	1.12*	0.498	1.95	3.28	1.18	1.12	1.04
L14-C	2.20	4.89	*	0.479	1.91	3.32	3.51	1.60	1.10
L15-C	2.03	4.51	0.69*	0.484	1.92	3.33	2.15	1.53	1.08
L16-C	1.33	2.95	0.77*	0.498	1.95	3.28	2.04	1.47	1.10

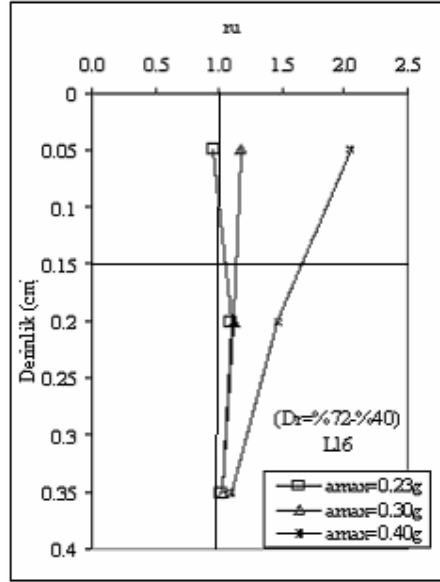
*Su filmi silt daneleri ile birlikte kum yüzeyine taşınmıştır.

Silt ara tabakası içeren bu tabakalı kum kolonu deneylerinde geçirimsizliği daha az olan silt tabakası altında bir su filmi olduğu gözlenmiştir. Çizelge 5.13'te görüldüğü gibi 0.23g ve 0.30g ivme genliklerinde sarsıntılar uygulanan deneylerde su filminin kalınlığının genel olarak sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı, daha şiddetli sarsıntılar etkisinde (0.40g) yapılan deneylerde ise silt ara tabakası altındaki kum tabakasında yüksek su basınçları nedeni ile oluşan türbülansın etkisi ile su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak zemin yüzeyine doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir.

“Silt ara tabakalı kum” kolonlarında oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının maksimum değerinin ($r_{u(max)}$) uygulanan sarsıntının ivme genliği ve derinlikle değişimleri Şekil 5.44'de gösterilmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basıncı oranları, farklı derinliklerde yer alan sensörlerde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncının, o derinlikteki düşey efektif gerilmeye bölünmesi ile elde edilmiştir. Aynı derinliklerdeki maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının ivme şiddeti ile değişimleri, sarsıntı şiddeti arttıkça artık boşluk suyu basıncı oranlarının genel olarak arttığını göstermektedir. Üstte yer alan tabakanın sıkılık derecesinin artmasının oluşan artık boşluk suyu basınçlarında bir miktar azalmaya neden olduğu, ancak alt tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerindeki etkisinin çok belirgin olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 5.44a Silt ara tabakalı kum kolonlarında maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi (L14 ve L15 model deneyleri)



Şekil 5.44b Silt ara tabakalı kum kolonunda maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

5.9 DeneySEL Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu tez çalışması kapsamında suya doymuş tabakalı kum zeminlerin sıvılaşma davranışının araştırılması amacı ile bir deney düzeneği kurulmuş ve farklı sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıkta tabakalardan oluşan kum kolonları üzerinde üç farklı ivme genliğine sahip sarsıntılar uygulanan deneyler yapılmıştır. Deneyler sırasında üç farklı derinliğe yerleştirilmiş artık boşluk suyu basıncı sensörleri ile dinamik yükleme sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi ve bir dijital kamera yardımı ile de kum kolonlarında oluşan yüzeysel oturmalar ölçülmüştür. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ve sonuçları ayrıntılı olarak yukarıda verilen deneysel sonuçların genel değerlendirmesi aşağıda sunulmaktadır.

DeneySEL çalışmalar sırasında dijital kamera yardımı ile kum tabakasında ölçülen yüzeysel oturmalar ve hacimsel şekil değiştirmelerin beklenildiği gibi sıklık derecesi arttıkça azaldığı ve sarsıntı şiddeti arttıkça arttığı görülmüştür (Şekil 5.26). Farklı derinliklere yerleştirilmiş olan boşluk suyu basıncı sensörleri yardımı ile ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının ise sarsıntı şiddeti ile arttığı gözlenmiştir. Maksimum artık boşluk suyu basınçlarının, ölçülen derinlikteki düşey efektif gerilmeye (σ_{vo}') bölünmesi ile elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının da beklenildiği gibi artan sarsıntı şiddeti ile arttığı ve derinlikle azaldığı görülmektedir. Genel olarak dinamik yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu

basıncı oranlarının, VELACS(1993) deneysel araştırma projesi kapsamında yapılan santrifüj deneylerinde ve Tabaoda(1995) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda görüldüğü gibi, yüze yakın kesimlerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Deneyler sırasında gevşek ($Dr=40\%$) ve orta sıkı kum kolonlarında ($Dr=50\%$ ve 60%) 0.23g ve 0.30g şiddetinde sarsıntılar etkisinde genel olarak kum kolonunun yüzeyinden itibaren 25cm derinliğe kadar olan kesiminin sıvılaştığı, 0.40g şiddetine sahip dinamik yükleme altında yapılan deneylerde ise tüm kum kolonunun sıvılaştığı gözlemlenmiştir. Artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle ve zamanla değişimini gösteren artık boşluk suyu basıncı izokronları, dinamik yükleme sırasında düşey efektif gerilme değerini aşan artık boşluk suyu basınçlarının oluştuğunu göstermektedir. Oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçları, kumun bu derinliklerde efektif gerilmesinin ve dolayısı ile taşıma gücünün tamamen kaybolmasına neden olmuştur. Özellikle, sıkı bir kum tabakası altında gevşek kum çökellerinin yer aldığı model deneylerinde, gevşek alt kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının yol açtığı yukarı yönlü su hareketi sırasında üstte yer alan sıkı kumdaki boşluk suyu basınçlarını artırarak, bu tabakanın da sıvılaşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Düşey efektif gerilmeyi aşan artık boşluk suyu basınçları Fiegel ve Kutter (1994) ve Teymur (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda da görülmüştür.

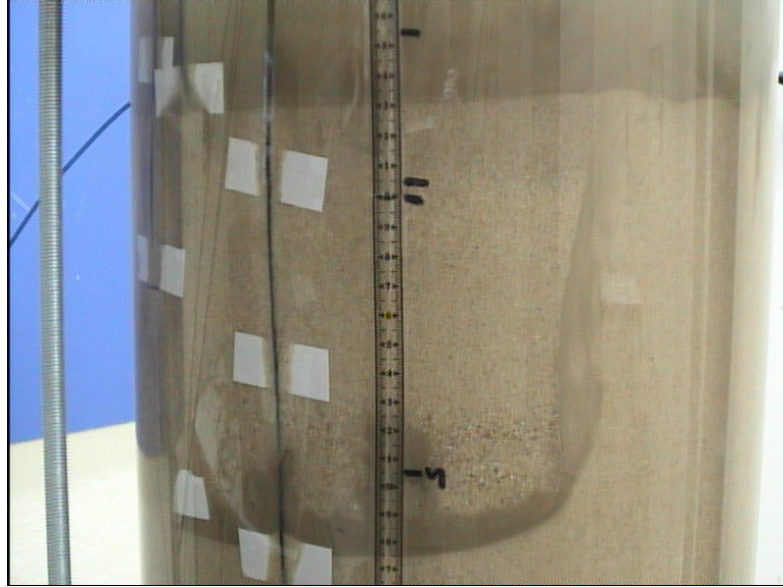
5.10 Silt Ara Tabakalı Kumların Dinamik Davranışı

Bu tez çalışmasında, arazide kum tabakaları içinde rastlanabilecek daha az geçirgen ara tabakaların kum tabakasının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile, silt ara tabakalı kum kolonlarından oluşan modeller hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Silt ara tabakalı kum kolonu deneylerinde, kum kolonu içerisinde yer alan geçirimsizliği daha az ince bir silt ara tabakası altında, Şekil 5.45’de gösterildiği gibi bir su filmi oluştuğu gözlenmiş ve alt kum tabakasının sıklık derecesinin ve sarsıntı şiddetinin su filmi oluşumunda etkili olduğu görülmüştür. Silt tabakası altındaki kumun sıklık derecesi azaldıkça oluşan su filmi kalınlığının arttığı, dolayısıyla arazide geçirimsizliği düşük tabakalar (silt, kil) altında gevşek kum tabakaları yer alması durumunda su filmi oluşumunun zararlı etkilerinin daha fazla olacağı anlaşılmaktadır. Deneyler sırasında, 0.23g ve 0.30g ivme genliklerinde sarsıntılar etkisinde su filmi kalınlığının genel olarak sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı görülmektedir. Yüksek ivme genliğinde (0.40g) yapılan deneylerde ise, silt ara tabakası altındaki kum tabakasında oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçlarının meydana getirdiği türbülansın etkisi ile Şekil 5.46’da görüldüğü gibi su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak

zemin yüzeyine doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Bu durum Fiegel ve Kutter (1994) ve Elgamal vd. (1989) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiştir.

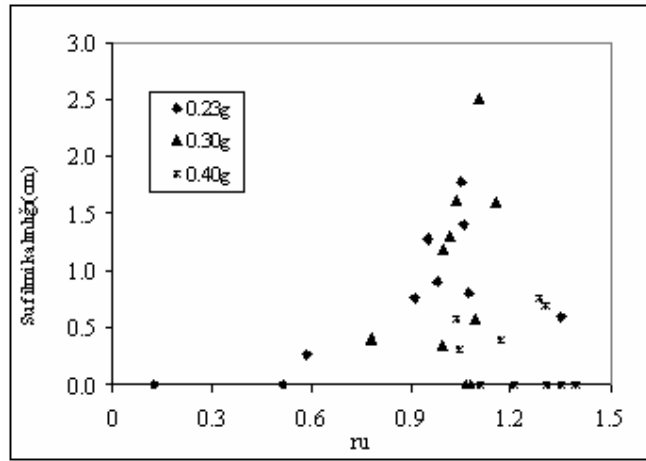


Şekil 5.45 Geçirimliliği daha düşük silt tabakası altında oluşan su filmi



Şekil 5.46 Su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak zemin yüzeyine hareket etmesi

Oluşan su filminin kalınlığının sarsıntı şiddeti ile birlikte artması ve çok şiddetli sarsıntılarda zemin yüzeyine doğru hareket etmesi, sarsıntı şiddetinin su filmi oluşumu üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Silt ara tabakalı kum kolonu deneylerinde, su filmi oluşumunda dinamik yükleme sırasında silt tabakası altındaki kum tabakasında ulaşılan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının ($r_{u(maks)}$) da etkili olduğu görülmüştür. Silt tabakası altındaki kum tabakasında hesaplanan ortalama artık boşluk suyu basıncı oranları ile ölçülebilen su filmi kalınlıkları arasındaki değişim Şekil 5.47’de gösterilmiştir. Şekil 5.47’den görüldüğü gibi, su filmi oluşumu $r_u=0.60$ değerini aştıktan sonra başlamakta ve artık boşluk suyu basınçları başlangıç sıvılaşması ($r_u=1$) mertebelerine ulaşmadan da su filmi oluşabilmektedir. $r_u=1.20$ değerini aştıktan sonra ise su filminin yüzeye doğru hareket etmesinden dolayı deneysel olarak ölçümü sağlıklı bir şekilde yapılamamaktadır.



Şekil 5.47 Artık boşluk suyu basıncı oranları ile su filmi kalınlıkları arasındaki değişim

Kum tabakası içerisinde, kuma göre geçirimsizliği daha az olan bir silt tabakası bulunması durumunda, dinamik yüklemeler sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sönmelenmesini sağlayacak zemin yüzeyine doğru su hareketleri için gerekli süre silt tabakasının mevcudiyeti nedeni ile uzayacaktır. Bu durumu incelemek için aynı sıklıkta silt ara tabakası içermeyen (uniform) ve silt ara tabakalı kum kolonlarında, zemin yüzünden 20cm ve 35 cm derinliklere yerleştirilmiş PPT2 ve PPT3 sensörlerinin bulunduğu derinliklerde ölçülmüş artık boşluk suyu basınçlarının sönmelenme süreleri (t_s) Çizelge 5.15’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

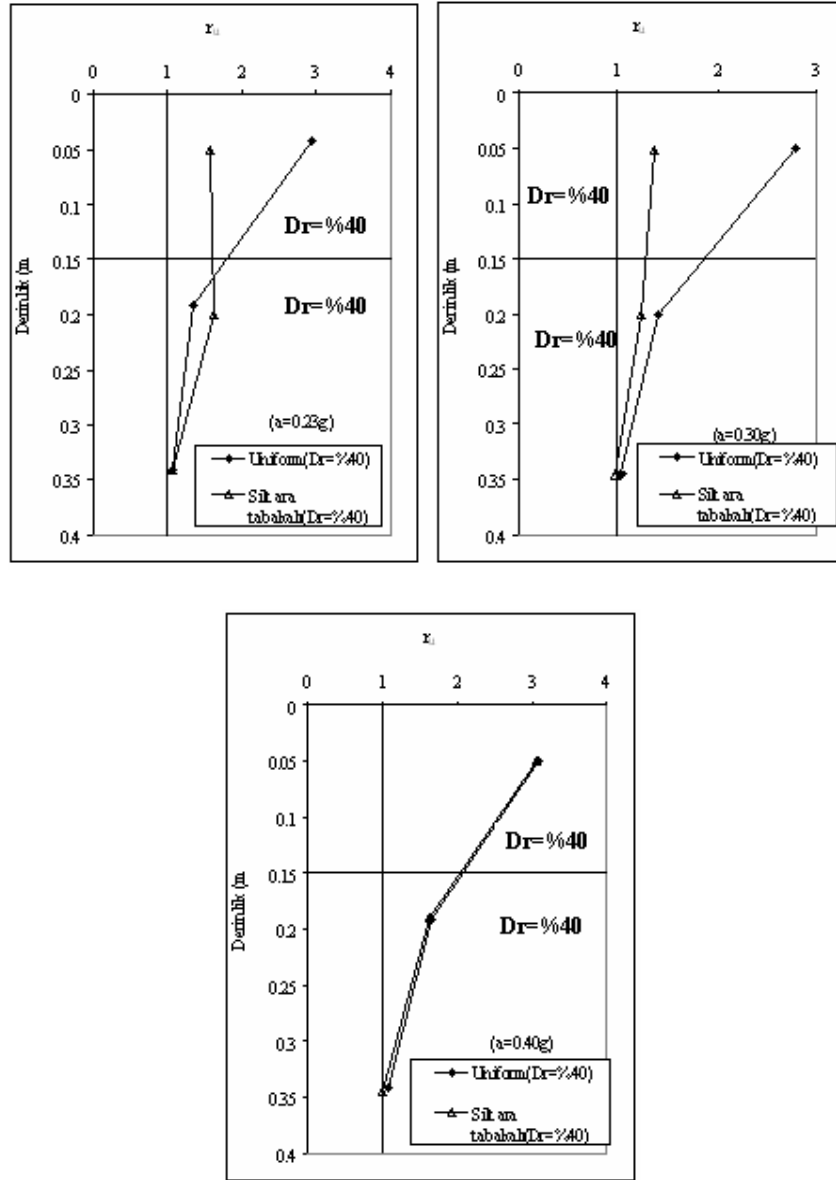
Çizelge 5.15 Silt ara tabakalı ve silt ara tabakası içermeyen kum kolonlarında artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme sürelerinin karşılaştırılması

Uniform kum kolonu			Silt ara tabakalı kum kolonu		
Model No.	Sönümlenme süresi, t_s (s)		Model No.	Sönümlenme süresi, t_s (s)	
	PPT2	PPT3		PPT2	PPT3
U1-A	14.97	14.56	L1-A	17.71	22.16
U2-A	6.58	12.42	L2-A	24.10	24.38
U3-A	14.42	14.94	L3-A	13.86	14.12
U4-A	5.51	6.34	L4-A	3.34	4.33
U1-B	12.17	17.06	L1-B	19.2	28.45
U2-B	11.49	13.23	L2-B	21.57	29.73
U3-B	9.13	12.35	L3-B	37.0	27.0
U4-B	6.17	9.15	L4-B	37.0	37.40
U1-C	11.46	11.02	L1-C	12.14	12.74
U2-C	10.61	11.11	L2-C	11.42	12.09
U3-C	10.07	10.98	L3-C	11.62	13.10
U4-C	7.28	10.0	L4-C	15.77	19.86

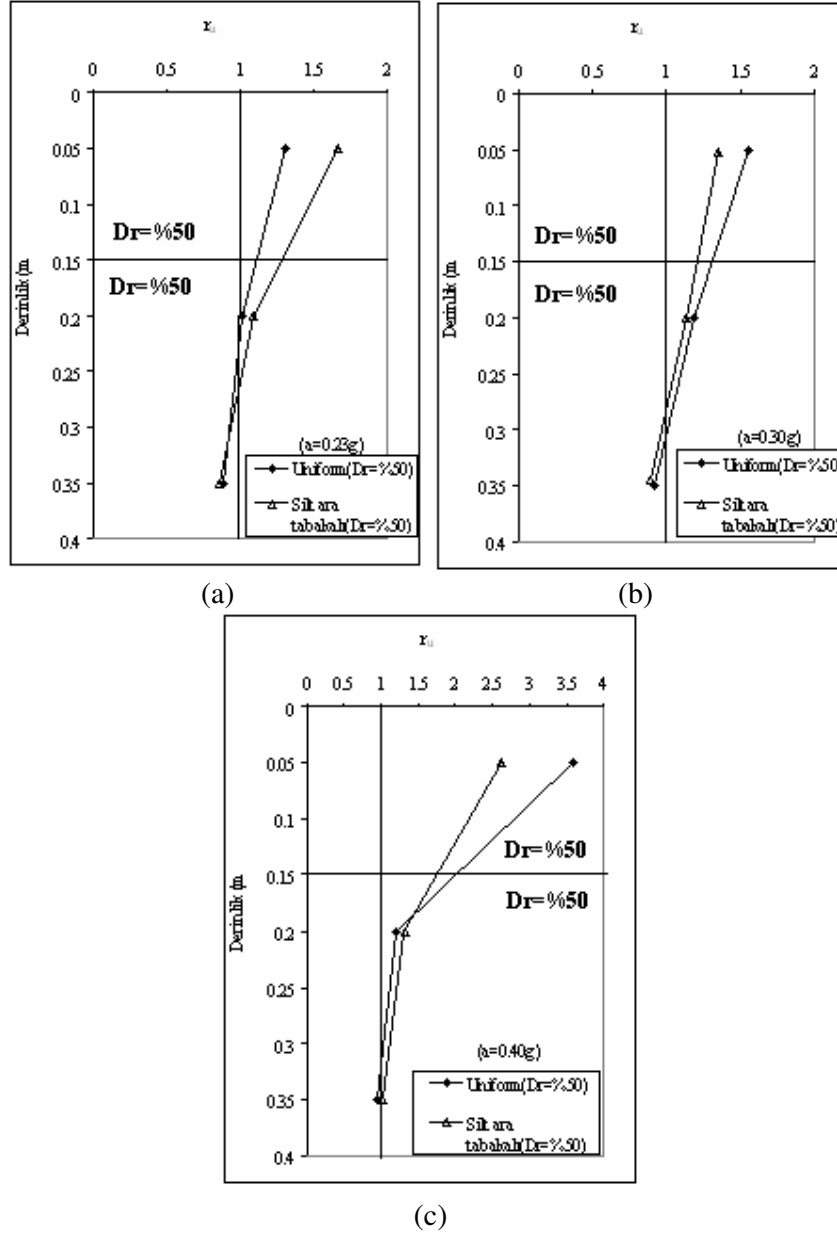
Çizelge 5.15'te yapılan karşılaştırmadan görüldüğü gibi, kum tabakası içerisinde silt tabakası bulunması durumunda, dinamik yükleme sırasında silt tabakası altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme süresi, diğer bir deyişle drenaj için gerekli süre genel olarak uzamaktadır. Dolayısı ile silt tabakasının varlığı kum tabakasının sıvılaşma sonrası davranışını da etkilemektedir. Bu etkinin arazide çok daha fazla olması ve drenaj için gerekli sürenin arazide daha da uzaması beklenilebilir. Ayrıca, silt tabakası altında oluşan su filminin uzun süre sönümlenmeden kalması, özellikle şevlerde çok ciddi problemlerin çıkmasına sebep olabilmektedir.

Kum tabakaları içinde silt ara tabakaları bulunmasının kum tabakalarının dinamik davranışı üzerindeki etkilerini daha iyi inceleyebilmek amacı ile üniform sıklıkta ve farklı iki sıklıkta tabakalardan oluşan silt ara tabakalı kum kolonları üzerinde model deneyler yapılmıştır. Üniform sıklıktaki silt ara tabakalı kum kolonlarında ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri ile silt ara tabakası olmayan üniform kum modellerinde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri üç farklı sarsıntı şiddeti (0.23g, 0.30g ve 0.40g) için karşılaştırılmıştır. Şekil 5. 48'de %40 rölatif sıklık derecesine sahip ve 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetlerinde sarsıntı uygulanan üniform kum model deneylerinden (U1-A, U1-B ve U1-C) elde edilen ve aynı sıklık derecesine sahip silt ara tabakalı (L1-A, L1-B ve L1-C) model deneylerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranı -derinlik değişimleri gösterilmektedir. Üniform

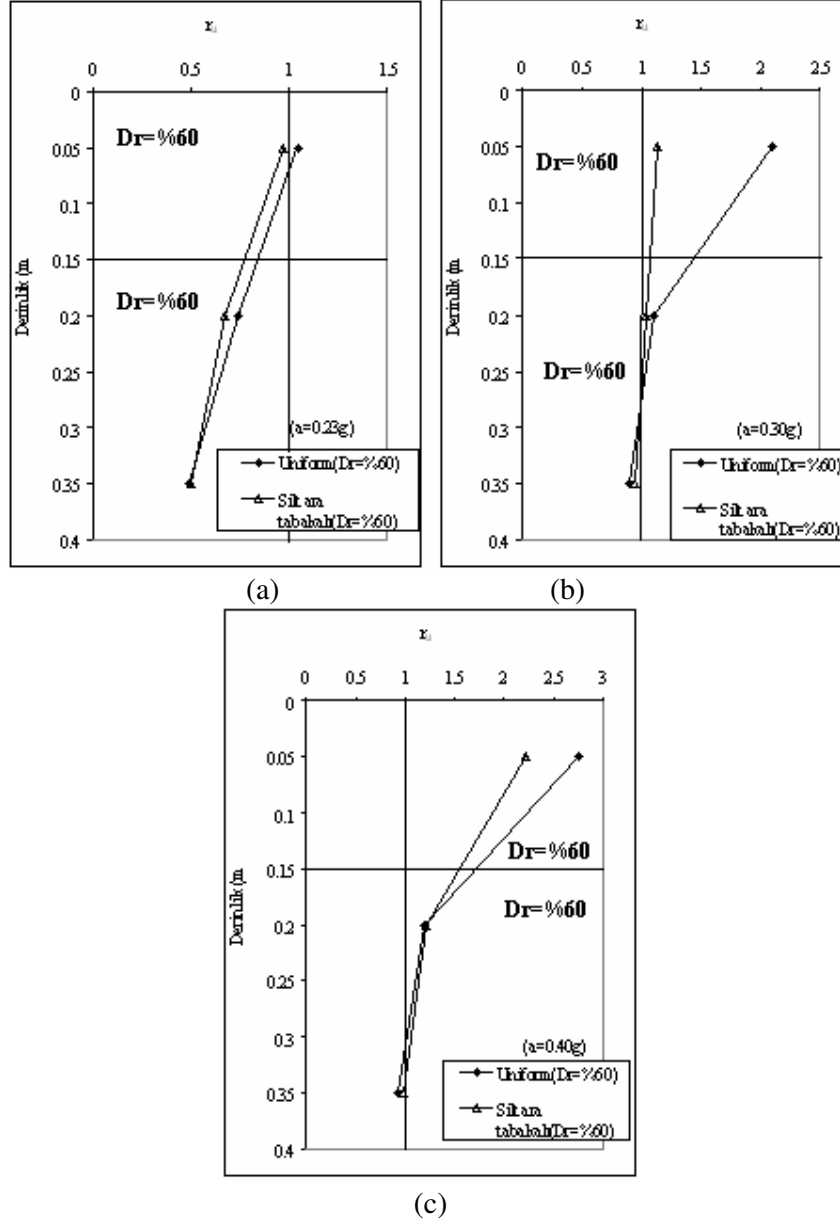
kum modelleri ile silt ara tabakalı modellerde farklı sıklıklar ve farklı sarsıntı şiddetleri için yapılan benzer karşılaştırmalar ise %50, %60 ve %72 rölatif sıklılık derecelerine sahip model deneyler için sırası ile Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de gösterilmektedir.



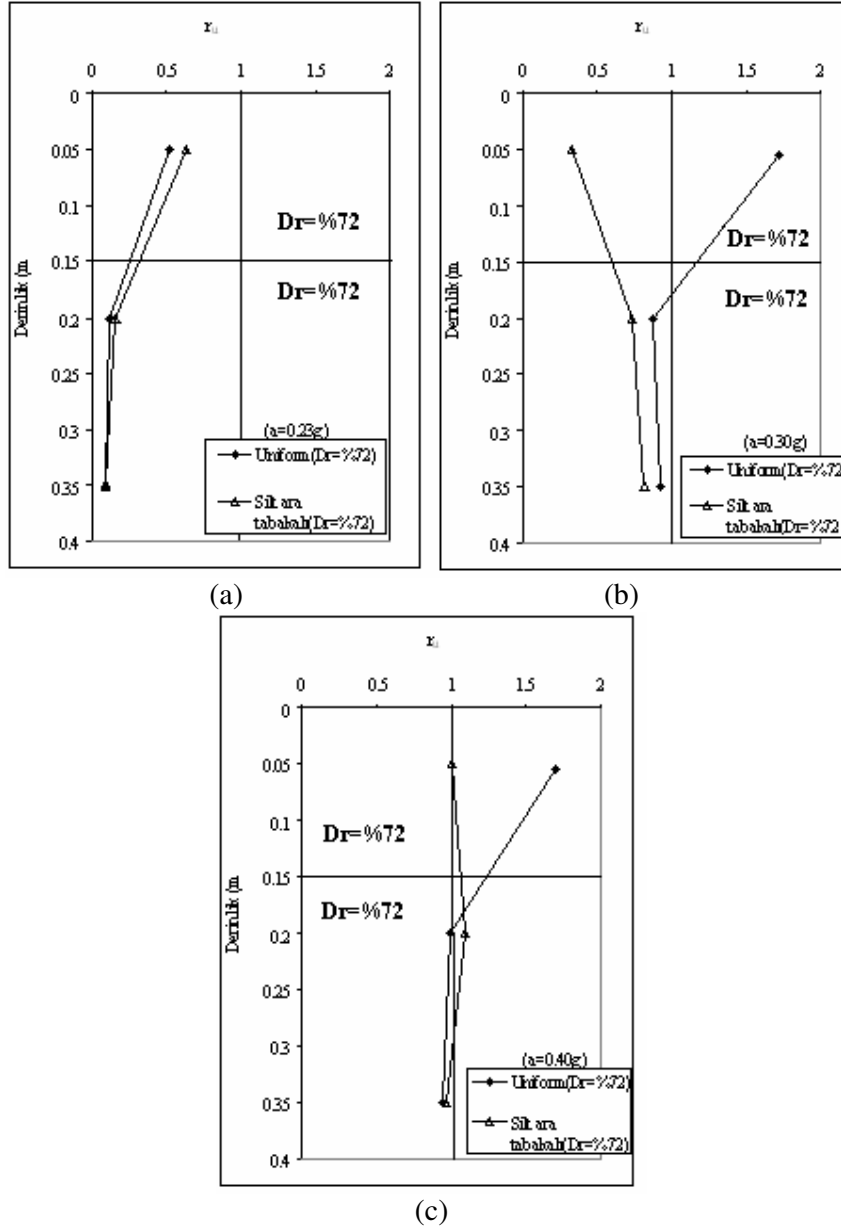
Şekil 5.48 $Dr=40\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 5.49 $Dr=50\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 5.50 $Dr=60\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

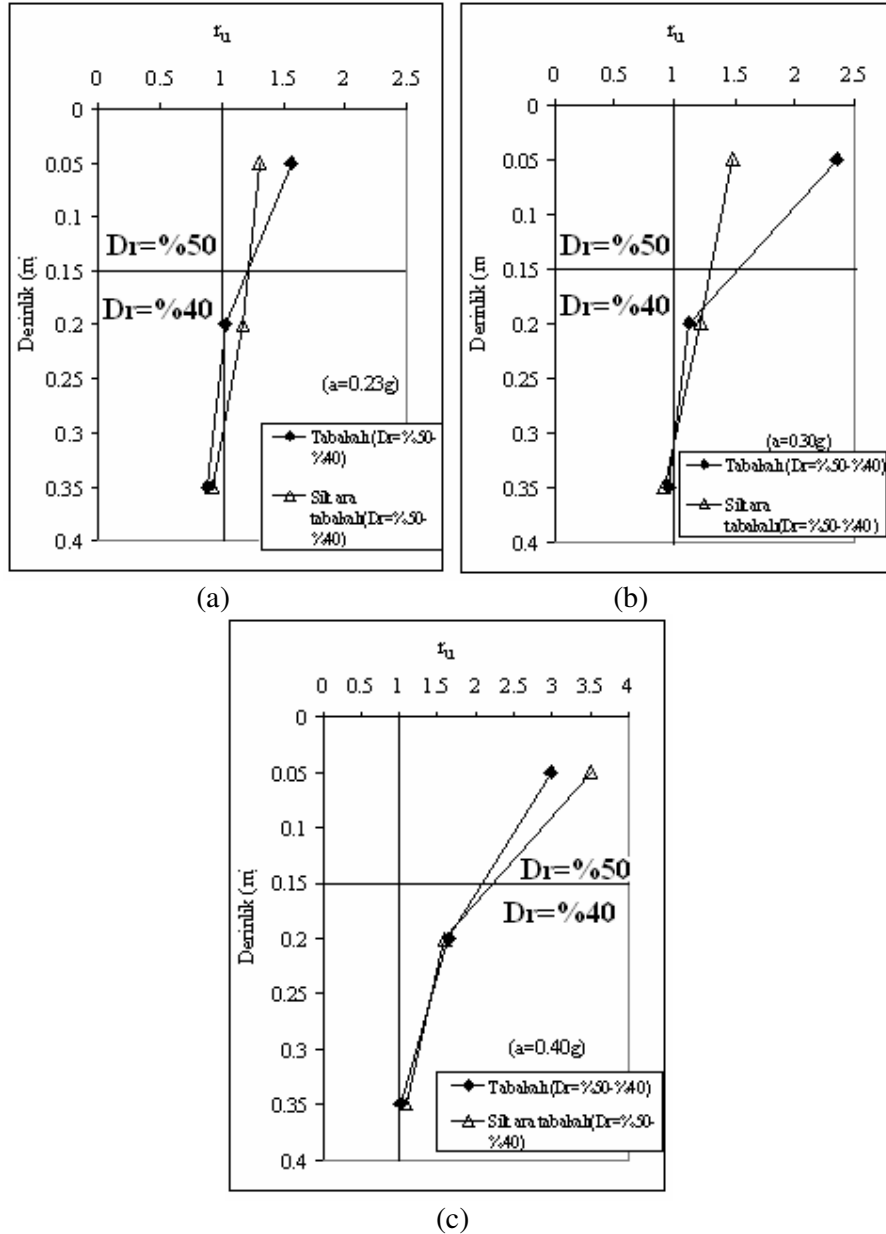


Şekil 5.51 $Dr=72\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

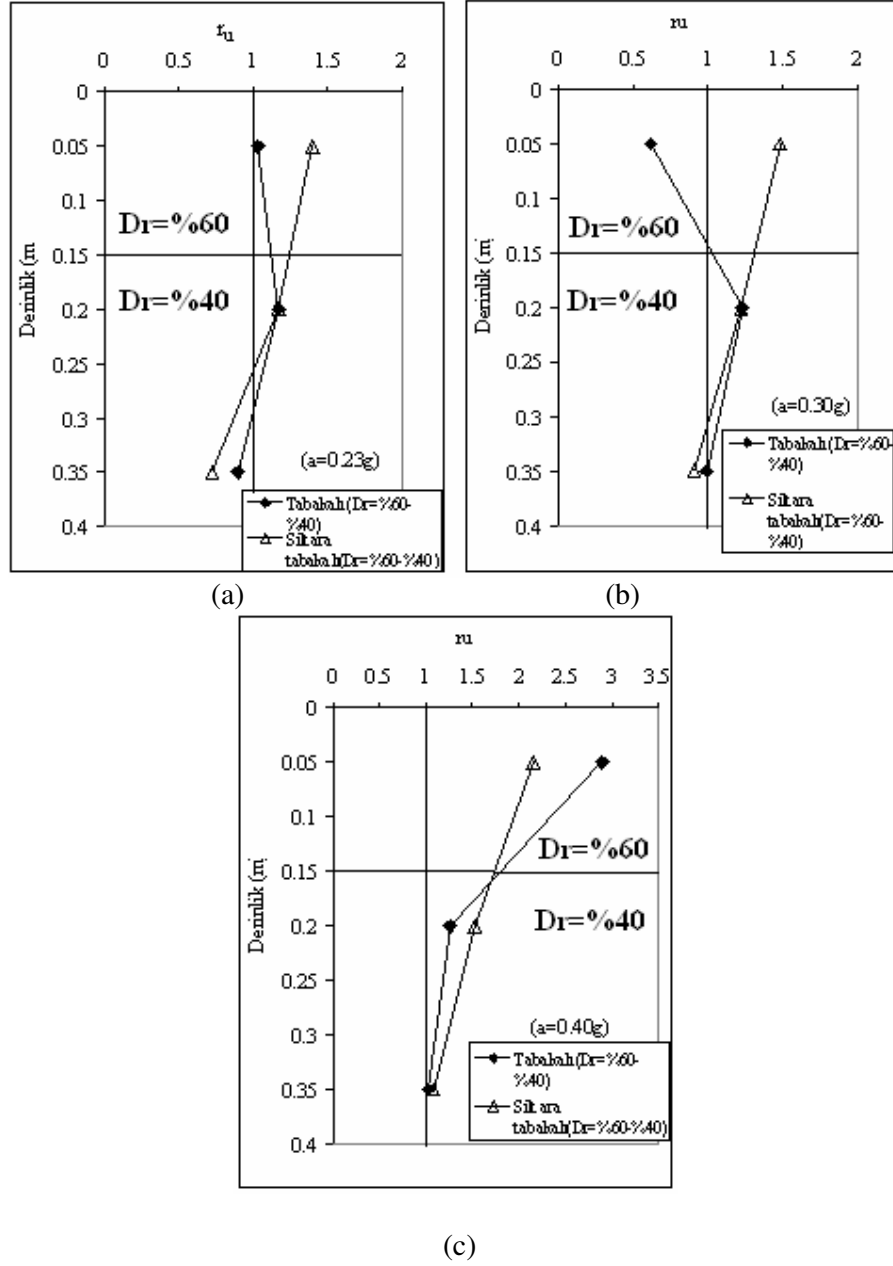
Aynı sıklık derecesine sahip silt ara tabakası bulunan ve bulunmayan üniform sıklıkta kum kolonlarından elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimlerinden, tüm sıklık derecelerinde genel olarak silt ara tabakası altında ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile üniform kum kolonunda aynı derinliklerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının birbirine yakın büyüklükte olduğu ve silt tabakasının etkisinin belirgin olmadığı görülmektedir. Silt ara tabakası üzerinde yer alan tabakalarda oluşan artık boşluk suyu basınçlarının ise üniform kum kolonunda ölçülenlerden daha az olduğu ve dolayısı ile silt tabakasının mevcudiyetinin üstteki tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde

azaltıcı bir etkisi olduğu gözlenmektedir.

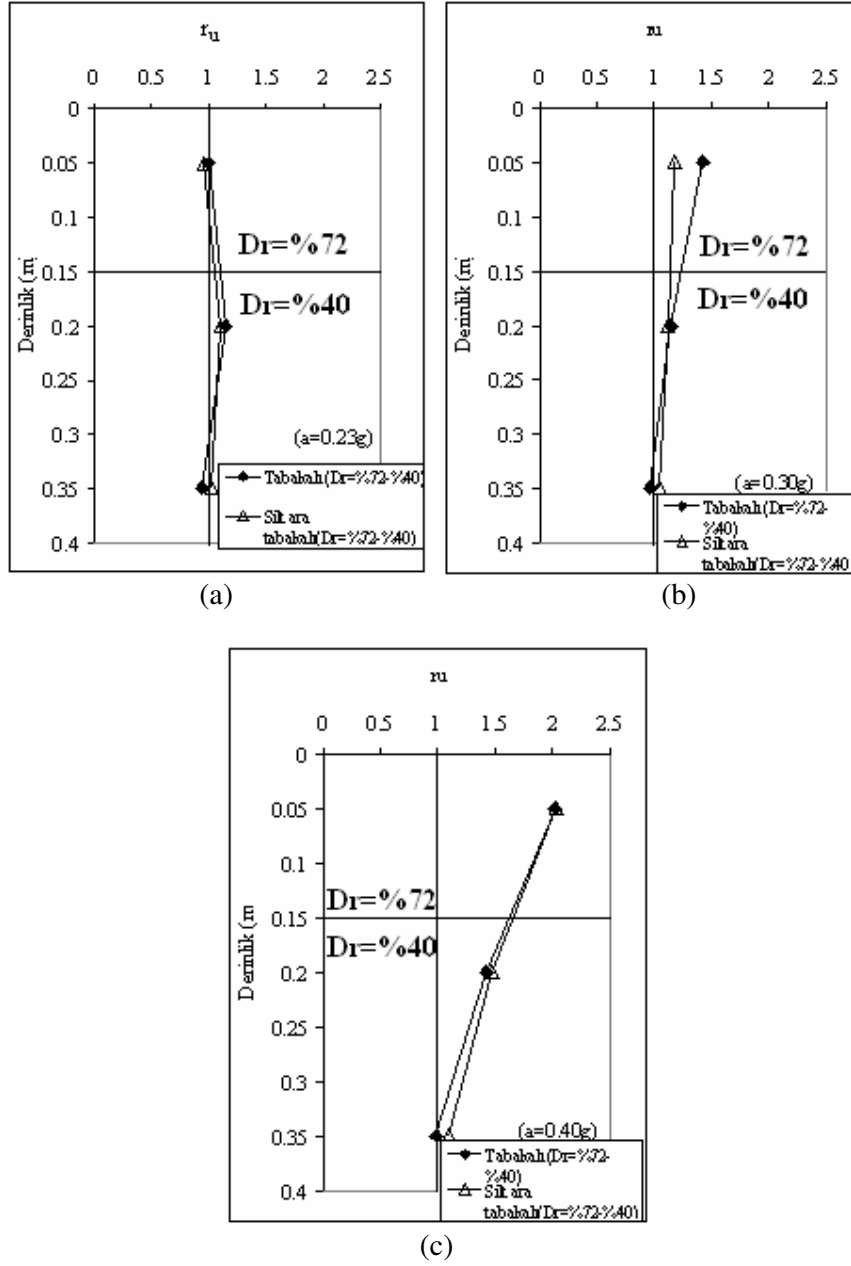
Gevşek bir kum tabakası ($D_r=\%40$) üzerinde daha sıkı bir kum tabakası ($D_r=\%50$, $D_r=\%60$ ve $D_r=\%72$) ve arasında ince bir silt tabakası bulunan silt ara tabakalı kum kolonları (L14, L15 ve L16) ile gevşek bir kum tabakası üzerinde ($D_r=\%40$), daha sıkı kum tabakalarının ($D_r=\%50$, $D_r=\%60$ ve $D_r=\%72$) yer aldığı silt ara tabakası içermeyen tabakalı kum kolonlarında (L11, L12 ve L13) ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.52, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54'de gösterilmiştir.



Şekil 5.52 Farklı sıkılıkta ($D_r=\%50/D_r=\%40$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 5.53 Farklı sıkılıkta ($Dr=\%60/Dr=\%40$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 5.54 Farklı sıkılıkta ($D_r=\%72/D_r=\%40$) ve silt ara tabakalı kum kolonları için artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

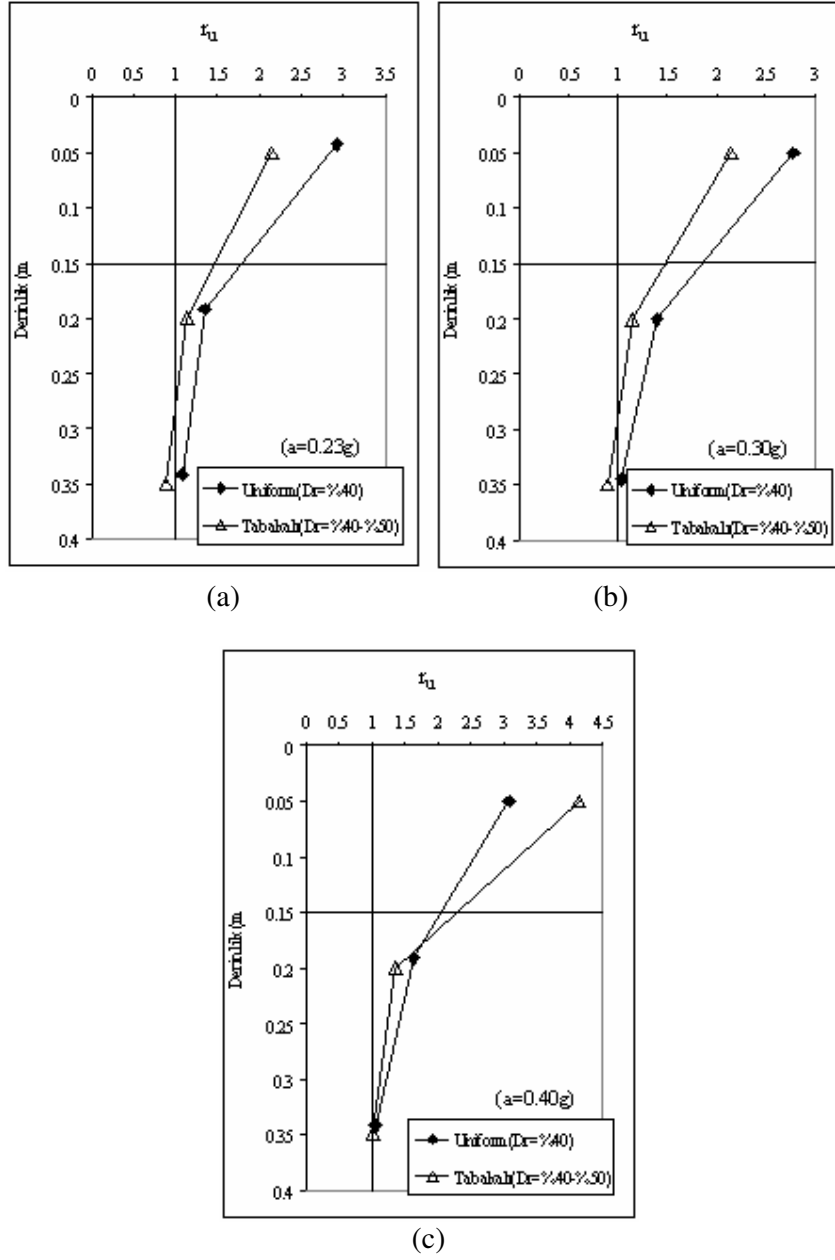
Şekil 5.52, Şekil 5.53 ve Şekil 5.54’de verilen grafiklerden de görüleceği gibi, silt ara tabakası altındaki tabakanın daha gevşek, üstündeki tabakanın ise daha sıkı kum tabakasından oluştuğu modellerde silt tabakası altında ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile, aynı derinlikte silt ara tabakası bulunmayan tabakalı modellerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının tüm ivme genliklerinde birbirine yakın büyüklüklerde olduğu görülmektedir. Silt tabakası üzerindeki orta sıkı kum tabakalarında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının üst tabakanın sıkılık derecesi ve sarsıntı şiddetine bağlı olarak silt tabakasının mevcudiyetinden olumlu veya

olumsuz yönde etkilenebileceği gözlenirken, üst tabakanın sıkı yerleşimli olduğu tabakalı kum kolonlarında ise bütün derinlik boyunca ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının silt ara tabakası bulunmayan kum kolonunda ölçülen artık boşluk suyu basınçlarına yakın büyüklüklerde olduğu görülmekte ve silt tabakasının mevcudiyetinin etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.

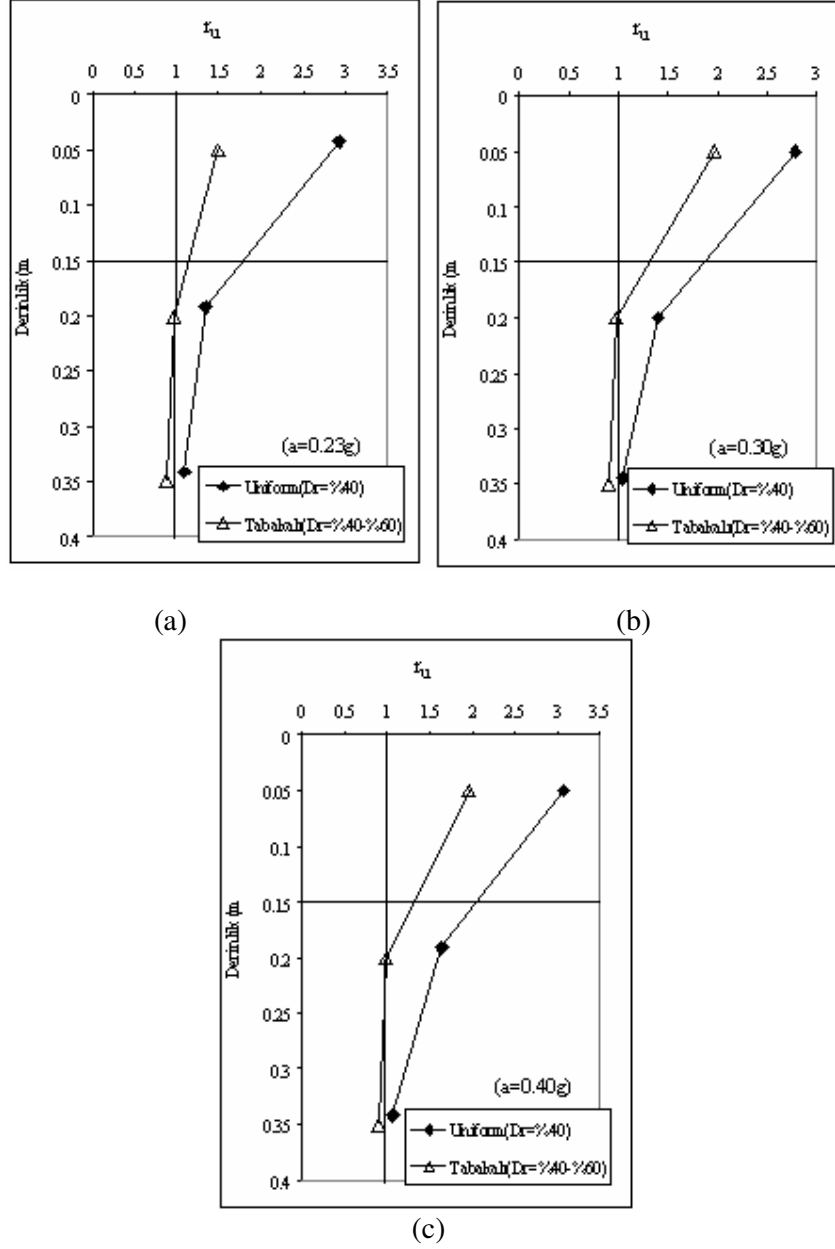
5.11 Tabakalı Kumların Dinamik Davranışı

Farklı sıklıklarda tabakalardan oluşan kum çökellerinin dinamik davranışını incelemek için, üst tabakanın altındaki tabakadan daha gevşek veya daha sıkı olduğu durumları modelleyen deneyler yapılmıştır.

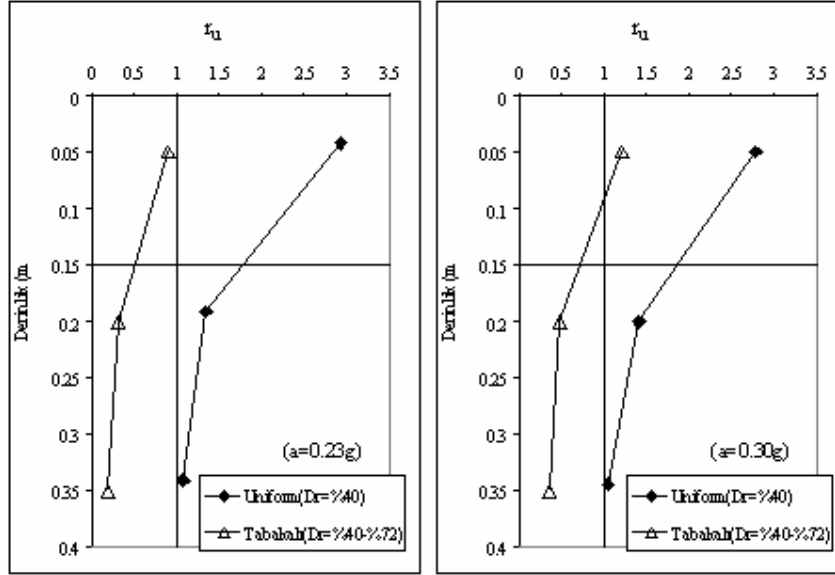
Sıkı bir kum tabakası üzerinde ($Dr=50$, $Dr=60$ ve $Dr=72$) gevşek kum tabakalarının ($Dr=40$) yer aldığı tabakalı kum zeminleri modellemek için gerçekleştirilen model deneylerinde (L8, L9 ve L10) ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri, %40 rölatif sıklığa sahip gevşek uniform kum tabakasından oluşan model deney sonuçları Şekil 5.55, Şekil 5.56 ve Şekil 5.57’de farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırılarak gösterilmiştir. Grafiklerde verilen değişimlerden, üstte yer alan %40 rölatif sıklıktaki tabakada oluşan artık boşluk suyu basıncı artışlarının alt tabakanın sıklık derecesinden oldukça fazla etkilendiği ve bu etkinin alt tabakanın sıklık derecesi arttıkça daha belirgin olduğu görülmektedir. Alt tabakanın sıklık derecesinin $Dr=50$ ve $Dr=60$ olduğu tabakalı kum kolonlarında ve uniform kum kolonunda ($Dr=40$) tüm sarsıntı şiddetlerinde (0.23g, 0.30g ve 0.40g) artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşma oluşturan mertebelerde olduğu ve artık boşluk suyu basınçlarının artan ivme genliği ile genel olarak artan bir eğilimde olduğu da gözlenmektedir. Alt tabakanın sıkı kumdan ($Dr=72$) ve üst tabakanın gevşek kum tabakasından oluştuğu tabakalı kum kolonlarında ise 0.23g sarsıntı şiddetinde artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşma oluşturacak mertebelerde olmadığı, 0.30g sarsıntı şiddetinde yalnızca gevşek kum tabakasından oluşan üst tabakada sıvılaşma mertebelerinde olduğu, 0.40g sarsıntı şiddetinde ise tüm kum kolonunda artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşma durumu oluşturacak mertebelere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.55 Tabakalı ($Dr=40\%/Dr=50\%$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

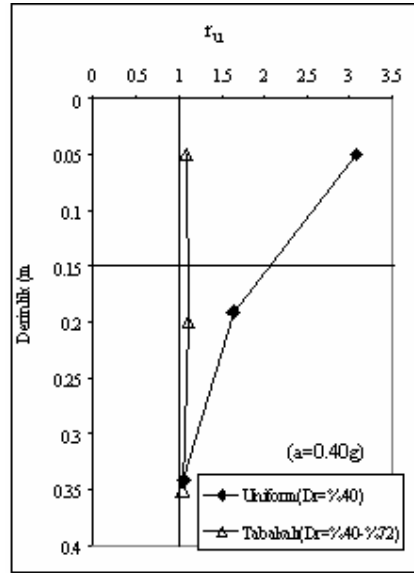


Şekil 5.56 Tabakalı ($Dr=40\%/Dr=60\%$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



(a)

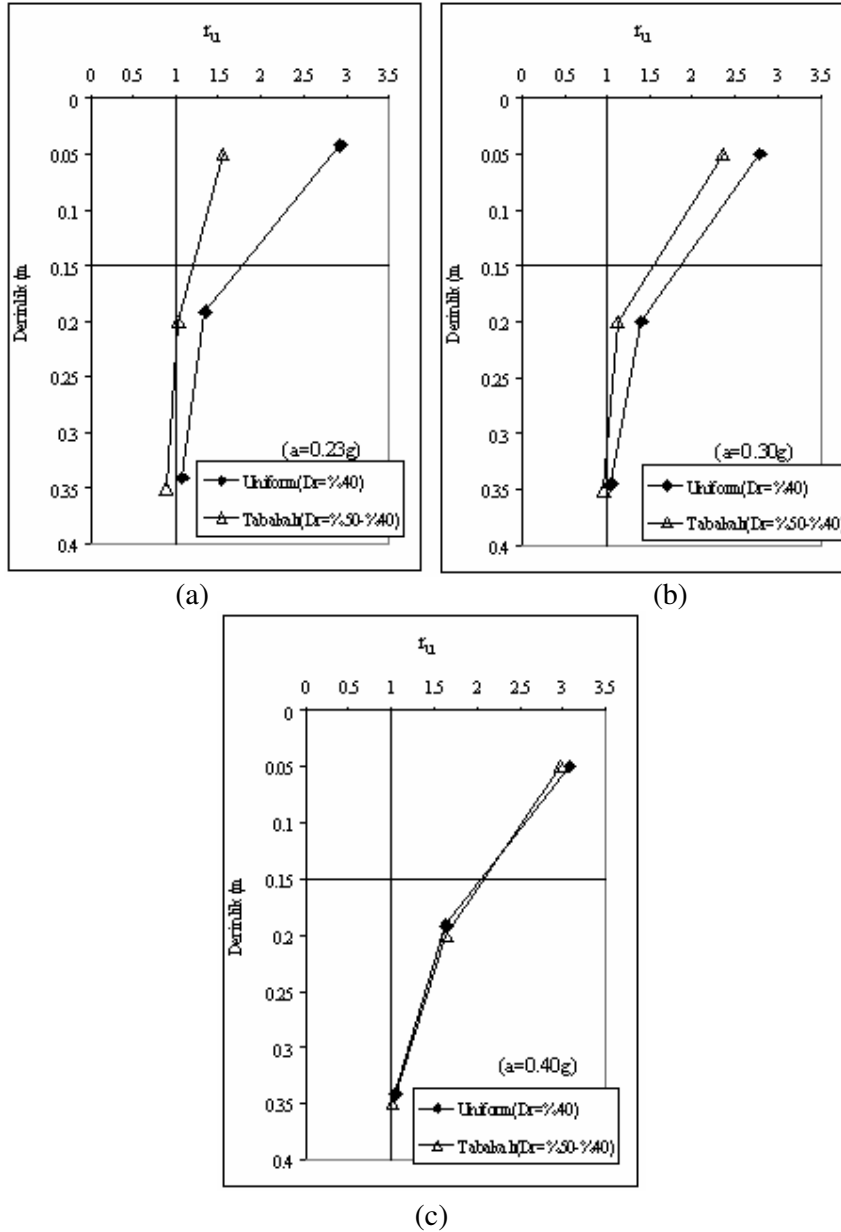
(b)



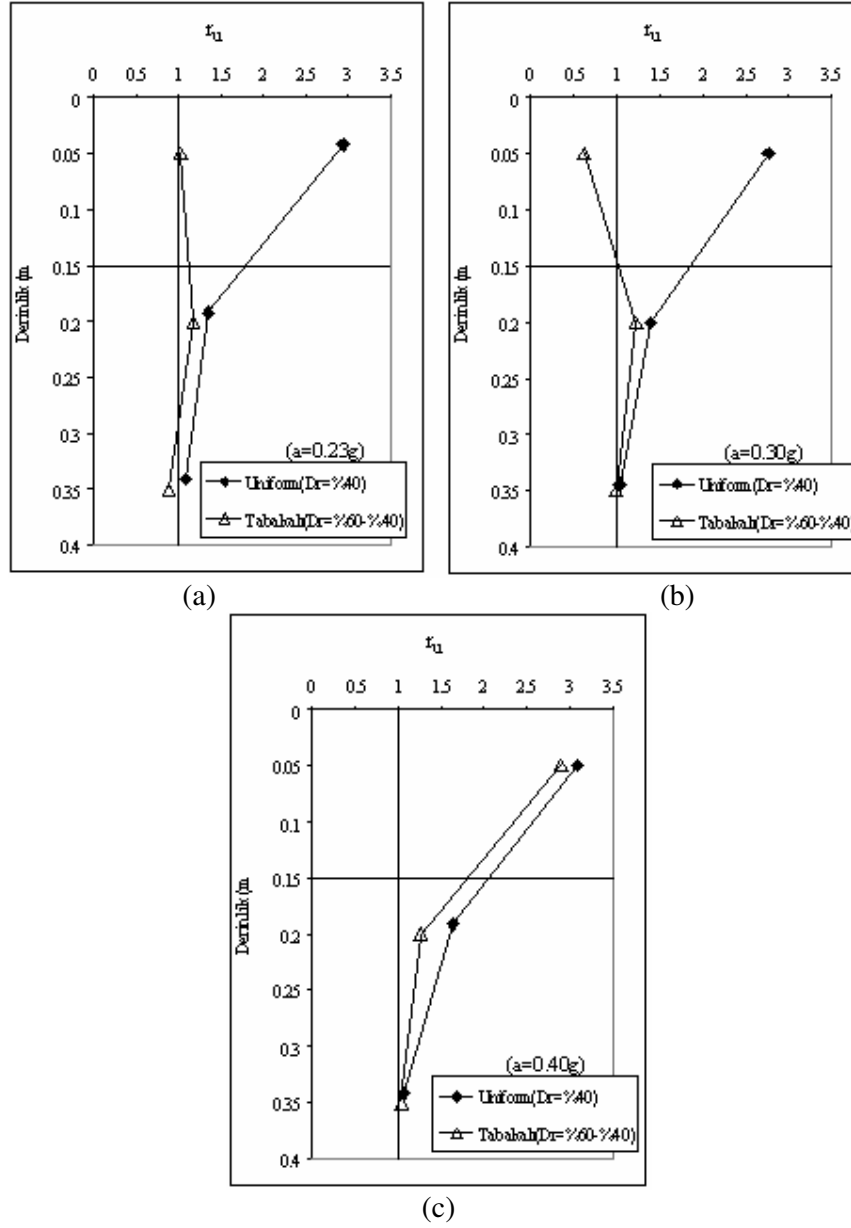
(c)

Şekil 5.57 Tabakalı ($Dr=\%40/Dr=\%72$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

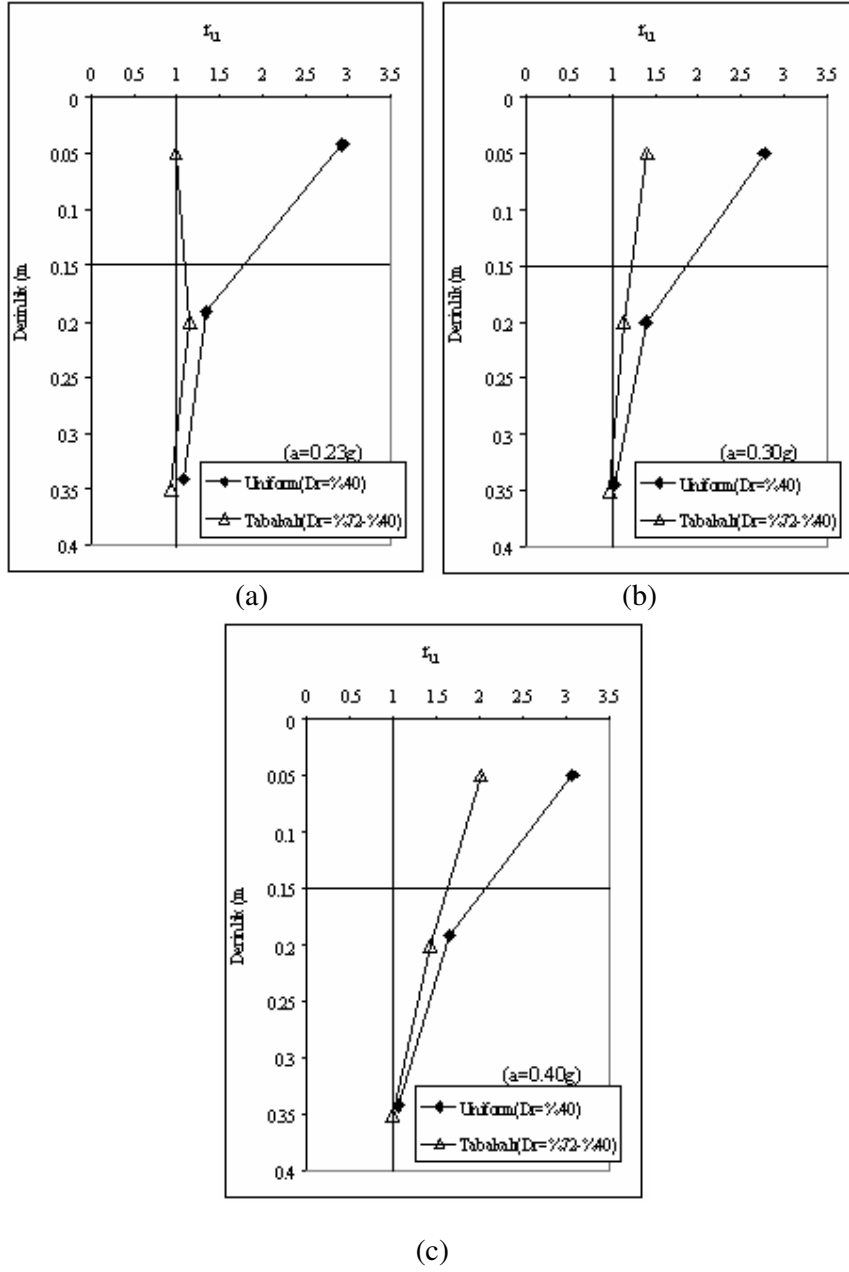
Gevşek bir kum tabakası ($Dr=40\%$) üzerinde, daha sıkı kum tabakalarının ($Dr=50\%$, $Dr=60\%$, $Dr=72\%$) yer aldığı durumların modellenmesi için gerçekleştirilen “Tabakalı kum” model deneylerinden (L11, L12 ve L13) elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri, 40% rölatif sıkılığa sahip gevşek uniform kum tabakasından oluşan model deney(U1) sonuçları Şekil 5.58, Şekil 5.59 ve Şekil 5.60’da farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırılarak gösterilmiştir.



Şekil 5.58 Tabakalı ($Dr=50\%/Dr=40\%$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



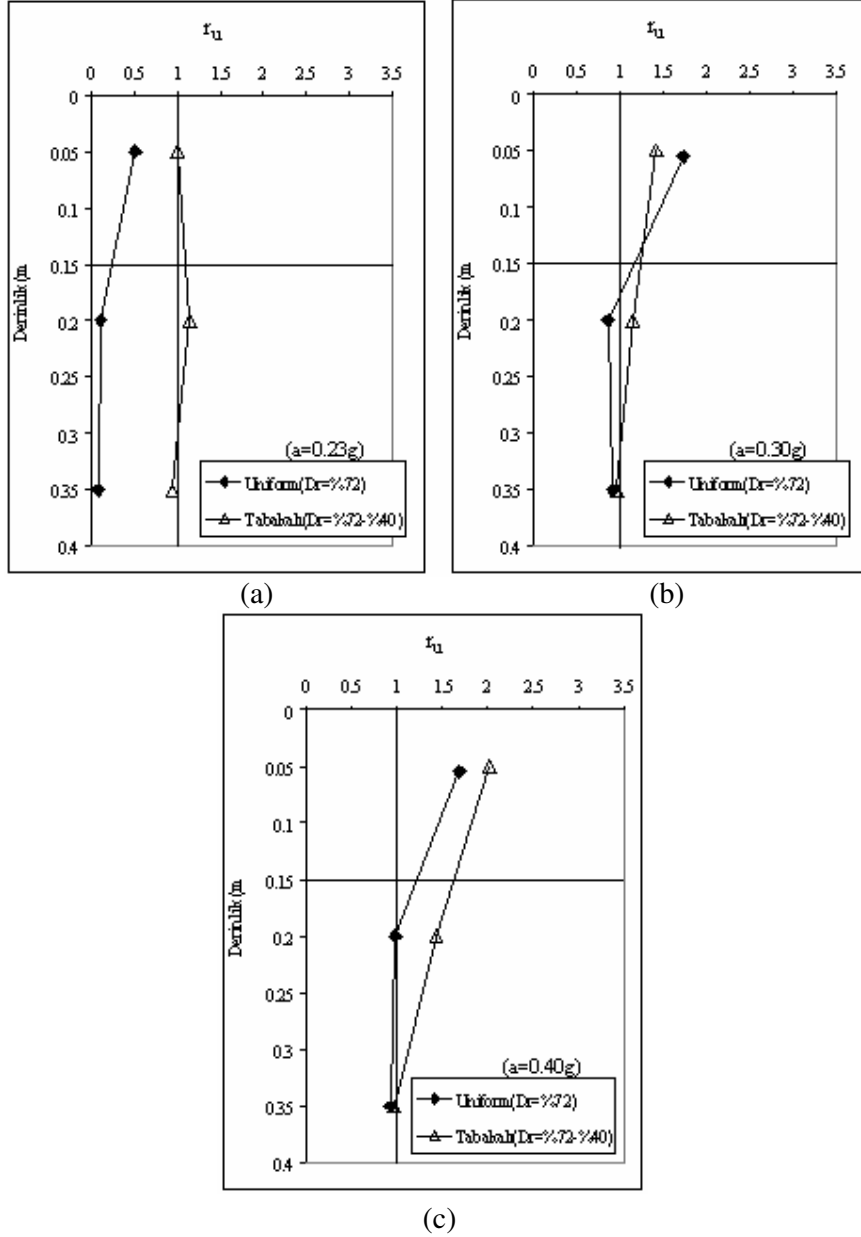
Şekil 5.59 Tabakalı ($Dr=\%60/Dr=\%40$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 5.60 Tabakalı ($Dr=72\%/Dr=40\%$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=40\%$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Şekil 5.58, Şekil 5.59 ve Şekil 5.60'da gösterilen grafiklerden, altta yer alan gevşek kum tabakasında ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının, üstte yer alan sıkı tabakanın mevcudiyetinden fazla etkilenmediği görülmektedir. Ancak, alttaki gevşek tabakanın üstünde yer alan sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırıcı yönde etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu etkiyi daha iyi görebilmek amacı ile alt tabakanın gevşek ($Dr=40\%$), üst tabakanın ise alt tabakaya göre daha sıkı ($Dr=72\%$) olduğu tabakalı kum kolonları (L13)

ile %72 rölaf sıklık derecesine sahip uniform kum kolonlarının davranışı (U4) farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırılarak Şekil 5.61’de sunulmuştur. Şekilde gösterilen grafiklerden tüm ivme genliklerinde altta yer alan gevşek kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının üstteki sıkı tum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarını arttırarak, bu tabakanın sıvılaşmasına yol açan r_u mertebelerine ulaştırdığı görülmektedir.



Şekil 5.61 Tabakalı (Dr=%72/Dr=%40) ve üniform sıklıkta (Dr=%72) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Uniform ve tabakalı kum kolonlarında üzerinde gerçekleştirilen model deney sonuçları gerilme seviyesinin de sıvılaşma ve sonrası davranış üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Deneylerde kum kolonlarının sadece 45cm yüksekliğinde olması ve tüm kum kolonu boyunca düşük düşey efektif gerilmelerin etkimesi nedeni ile, gevşek ve orta sıkı kum kolonları üzerinde yapılan deneylerde uygulanan tüm sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşma meydana geldiği, 0.40g ivme genliğine sahip kuvvetli sarsıntı etkisinde ise sıkı kum kolonunda bile sıvılaşma durumu oluştuğu gözlemlenmiştir. Arazide, derinlikle artan düşey efektif gerilmeler nedeni ile kumun sıklık derecesine bağlı olarak sıvılaşma durumu ortaya çıkabilmesi için daha yüksek dinamik gerilmeler gerektiği açıktır. Bununla birlikte, gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen sonuçların ve fiziksel gözlemlerin tabakalı kumlarda dinamik yüklemeler etkisinde boşluk suyu basıncı artışları ve sıvılaşmanın oluşum mekanizmasının anlaşılması bakımından oldukça yol gösterici olduğu düşünülmektedir.

6. UNİFORM VE TABAKALI KUMLARIN SIVILAŞMA DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE NÜMERİK ANALİZİ

6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sıvılaşma Analizi

Bu tez çalışması kapsamında model deneylerde gözlemlenen davranışı nümerik olarak modelleyebilmek için dinamik analiz yapabilen DIANA programından faydalanılmıştır. Bu bölümde öncelikle nümerik analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan DIANA sonlu elemanlar programında sıvılaşma davranışının modellenmesi için kullanılan Towhata-Iai bünye modeli hakkında özet bilgiler verilmektedir. Daha sonra bünye modelinde yer alan malzeme parametrelerinin değişim aralıkları ile boşluk suyu basıncı oluşumundaki etkilerini, kumun sıkılık derecesine bağlı olarak belirleyebilmek amacı ile yapılan parametrik çalışma sonuçları sunulmaktadır. Gerçekleştirilen laboratuvar model deneylerin DIANA ile yapılan nümerik analizleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler ve sonuçları ise Bölüm 7’de verilmiştir.

6.1.1 Towhata-Iai Bünye Modeli

Towhata-Iai bünye modeli iki boyutlu ve drenajsız zemin koşullarındaki sıvılaşma analizleri için geliştirilmiş bir bünye modeli olup zeminde sıvılaşma sırasında kayma deformasyonlarının ve hacimsal deformasyonların birlikte oluştuğunu varsaymaktadır. Bu nonlinear model, plastisite teorisine dayalı olup laboratuvar kumların drenajsız dinamik deneylerde gözlemlenen davranışı sonucunda geliştirilmiştir. Modelde esas olarak asal gerilme eksen rotasyonunun efektif gerilmeler üzerindeki etkisinin, anizotropik konsolidasyon etkisinin ve zeminin yüklenme tarihçesinin dikkate alınabilmesi amaçlanmaktadır. Bu üç faktörün etkisini bünye modelinde göz önüne alabilmek için iki kavram geliştirilmiştir. Bunlar “basit kayma mekanizması (virtual simple shear mechanism)” ve “sıvılaşma yüzeyi (liquefaction front)” kavramlarıdır. Bu iki kavram birleştirilerek kumların sıvılaşma davranışını tarif eden bünye denklemi oluşturulmuştur. Bu bünye modelinin drenajlı koşullarda ve üç boyutlu modellerde uygulanması mümkün değildir.

Towhata- Iai bünye modelinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki eşitlikle tanımlanmaktadır:

$$\begin{pmatrix} \sigma'_{xx} \\ \sigma'_{yy} \\ \sigma'_{xy} \end{pmatrix} = -B \left[\varepsilon_p - (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \right]^2 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^I Q_i(\gamma_i) \Delta \theta_i \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ -\cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

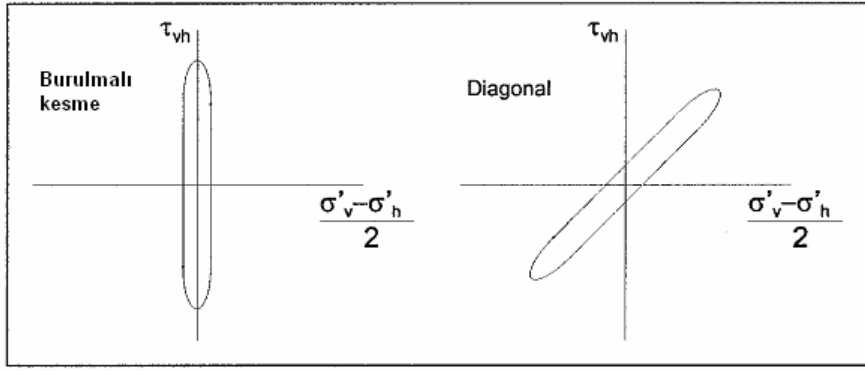
$$B = (0.5K_{ref})^2 / |\sigma_{ref}'| \quad (6.2)$$

Burada; σ_{xx} , σ_{yy} ve σ_{xy} toplam gerilmeler, ε toplam şekil değiştirme, ε_p ise plastik hacimsal şekil değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Gerilme bileşenleri ise iki kısımda toplanmaktadır. İlk terim izotropik bileşen ya da hacimsal mekanizma olarak tanımlanmakta, B hacim bileşenine rijitliğin katkısını temsil etmektedir. (6.2) eşitliğindeki K_{ref} zeminin referans efektif gerilme (σ_{ref}') değerindeki hacimsal modülüdür. Hacim bileşeni zemindeki dilatasyonu da dikkate almaktadır. Hacimsal bileşen boşluk suyu basıncındaki şekil değiştirmeleri göz önünde bulundurarak, efektif gerilmelerden hacimsal şekil değiştirmelere geçişi sağlayan ilişkiyi sağlamaktadır. Hacimsal şekil değiştirmeyi elde edebilmek için ise zeminin porozitesine (n), zeminin hacim modülüne (K_{ref}), suyun hacim modülüne (K_f) ve ortalama efektif normal gerilmeye (σ_m') ihtiyaç duyulmaktadır. Ortalama efektif gerilme sıvılaşma yüzeyi kavramı ile modellenen gerilme izinden elde edilmektedir.

(6.1) eşitliğindeki ikinci bileşen ise deviatorik bileşen olarak isimlendirilmektedir. İkinci terimde geçen Q_i , γ_i ve θ_i sırası ile kayma gerilmesini, kayma şekil değiştirmesini ve asal gerilme eksen rotasyonunu dikkate alabilmek için farklı kayma mekanizmasının göz önüne alındığı açığı temsil etmektedir.

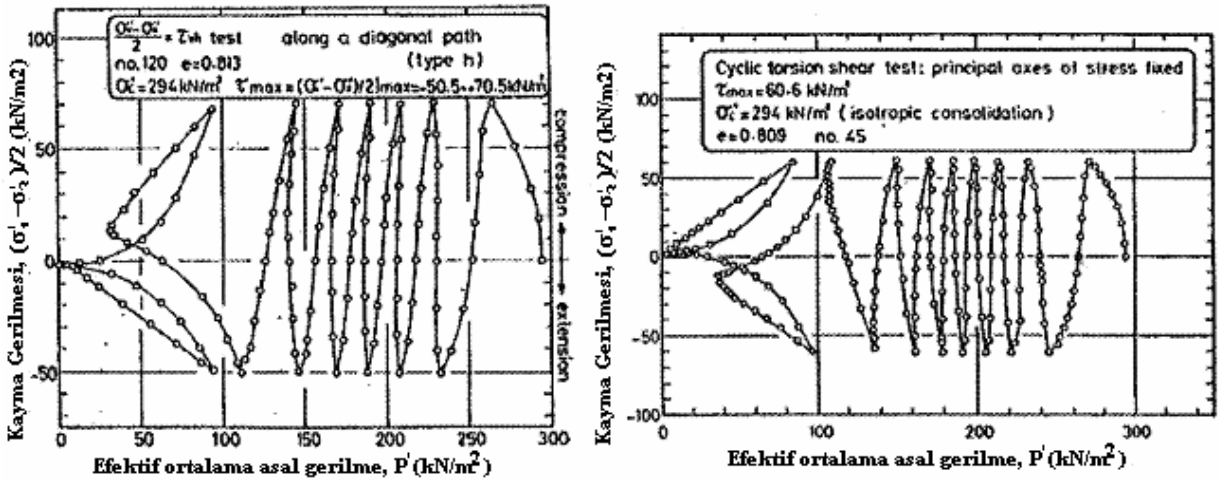
6.1.1.1 Sıvılaşma yüzeyi

Sıvılaşma yüzeyi, gerilme uzayında kayma şekil değiştirmeleri tarafından yapılan işin eşit olduğu noktalarının oluşturduğu zarf olarak tanımlanmaktadır. Towhata ve Ishiara (1985a) drenajsız tekrarlı yüklemeler sırasında oluşan artık boşluk suyu basıncı ile kayma şekil değiştirmesi işi arasındaki ilişkiyi araştırmak için ilk defa böyle bir kavram geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada farklı yükleme şekilleri uygulanan (farklı kayma gerilmesi genliği ve farklı asal eksen rotasyonu) silindirik numuneler üzerinde bir seri laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1'de uygulanan farklı yükleme koşullarından örnekler gösterilmektedir. Tekrarlı burulmalı kesme olarak uygulanan yükleme şekillerinden birinde zemin numunesine sadece burulmalı kesme kuvveti, diğerinde ise burulmalı kesme ve eksenel gerilme uygulanmıştır.

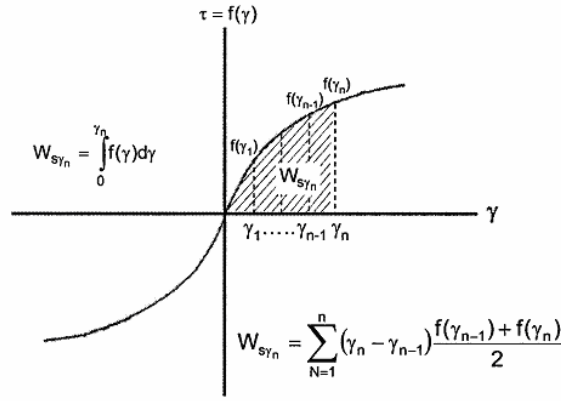


Şekil 6.1 Tekrarlı burulmalı kesme deneyinde kullanılan farklı yükleme şekilleri (Towhata ve Ishiara, 1985)

Şekil 6.1’de verilen yükleme durumları için deneylerden elde edilen gerilme izleri(kayma gerilmesi, τ - ortalama efektif asal gerilme, p') Şekil 6.2’de gösterilmektedir. Örneğin, burulmalı kesme deneyindeki yüklemede başlangıç efektif çevre basıncı 294 kPa’dır. Bu deneyde, artık boşluk suyu basınçları her bir yarım döngüde, yani kayma gerilmesi, $\tau = 0$ olduğunda ölçülmüştür. $p'=240$ kPa olduğunda , artık boşluk suyu basıncındaki artış 54 kN/m^2 ($294-240=54 \text{ kN/m}^2$) olacaktır. Aynı zamanda, biriken kayma şekil değiştirmesi işi de tüm yükleme sürecinde aynı gerilme durumu için gerilme-şekil değiştirme verileri kullanılarak Şekil 6.3’de verilen trapezoid kuralı yardımı ile hesaplanmıştır.

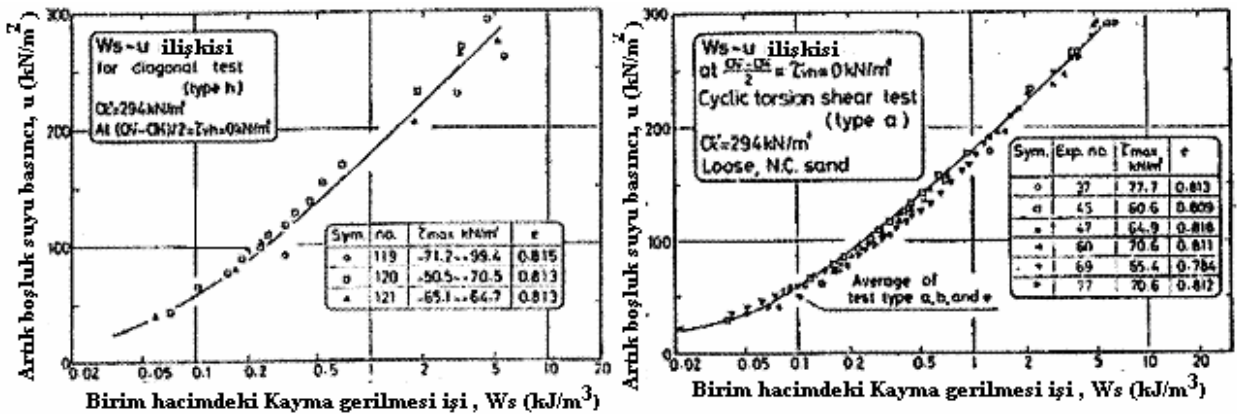


Şekil 6.2 Farklı yükleme şekillerinde dinamik burulmalı kesme deneyinden elde edilen gerilme izleri (Towhata ve Ishiara, 1985)

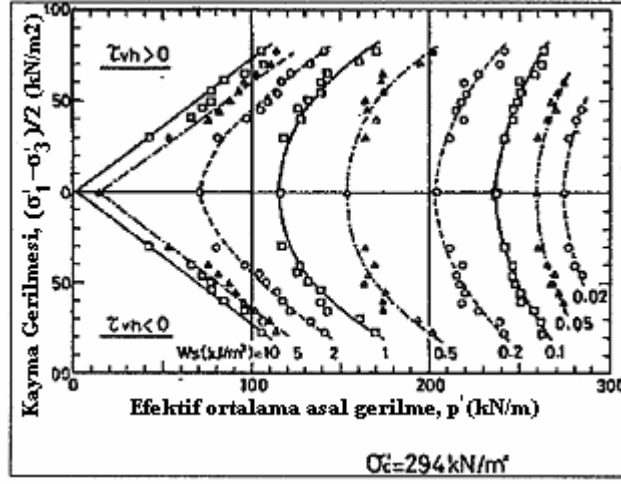


Şekil 6.3 Gerilme-şekil değiştirme verilerinden kayma şekil değiştirmesi işinin trapezoid kuralı ile hesaplanması

Aynı gerilme hali için, farklı yükleme koşulları ve deney sonuçları için artık boşluk suyu basıncı ile birikmiş kayma şekil değiştirmesi işi arasında Şekil 6.4'deki gibi bir ilişki elde edilmiştir. Şekil 6.4'te gösterilen deneysel veriler diğer yüklemelerle elde edilenlerden daha düşük artık boşluk suyu basınçlarının gözlemlendiği dinamik üç eksenli deney sonuçları dışında, genel eğilimde bir farklılık olmadığını göstermektedir. Farklı yükleme şekillerinden elde edilen deneysel sonuçlardan (dinamik üç eksenli deney sonuçları hariç tutulduğunda), araştırmacılar kayma şekil değiştirmesi işi ile artık boşluk suyu basıncı arasındaki ilişkinin tekil olduğu ve gerilme izinden, kayma gerilmesi genliğinden ve asal gerilme eksen rotasyonundan bağımsız olduğu sonucuna varmıştır. Artık boşluk suyu basıncı ile kayma şekil değiştirmesi işi arasında türetilen ilişki gerilme uzayında farklı kayma gerilmesi genliklerinde eşit kayma şekil değiştirmesi işi noktalarının oluşturduğu kontür çizgilerini vermektedir (Şekil 6.5) Bu ilişki ile Ishiara ve Towahata (1985a) kayma gerilmesi genliği, gerilme izi ve asal gerilme eksen rotasyonunun artık boşluk suyu basıncı oluşumuna etkisini birlikte dikkate alabilmiştir.



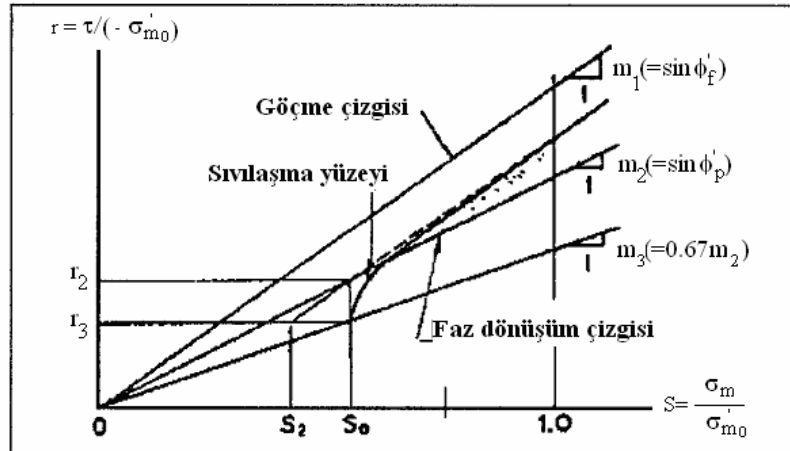
Şekil 6.4 Farklı yükleme koşulları ve farklı deney sonuçları için artık boşluk suyu basıncı ile kümülatif kayma şekil değiştirmesi işi arasındaki ilişki (Towhata ve Ishiara, 1985)



Şekil 6.5 Eşit kayma şekil değiştirmesi işi seviyelerinde gerilme izi kontürleri (Towhata ve Ishiara, 1985)

6.1.1.2 İzotropik bileşen

Iai vd.(1992) tarafından çevrimsel yüklemeler sırasında oluşan efektif gerilme izini modelleyebilmek için, artık boşluk suyu basıncı ile kayma şekil değiştirmesi işi arasında bir ilişki kurulmuştur. Bunun için, gerilme uzayını (6.2) eşitliğindeki gibi başlangıç ortalama normal efektif gerilme değerleri ile normalize ederek, sıvılaşma yüzeyini tarif eden bir fonksiyon üretilmiştir. Sıvılaşma yüzeyi kavramına ek olarak, Iai vd.(1992) faz dönüşüm çizgisi olarak isimlendirilen ve genleşme zonu ile sıkışma zonunu birbirinden ayıran doğrusal bir çizgi tarif etmiştir (Şekil 6.6). Tekrarlı gerilmeler sırasında drenajsız gerilme izi bu çizgiye ulaştığında artık boşluk suyu basınçları ve plastik şekil değiştirmeler iyice büyümektedir. Bu çizginin yatayla yaptığı açı faz dönüşüm açısı olarak isimlendirilmektedir ve ϕ_p ile gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Normalize gerilme uzayında Sıvılaşma yüzeyi, göçme çizgisi ve faz dönüşüm çizgisi (Iai vd., 1992)

Gerilme uzayı normalize edildiğinde, efektif ortalama normal gerilme oranı S ve deviatorik gerilme oranı r aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$S = \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m.o}} \quad r = \frac{\tau}{-\sigma'_{m.o}} \quad (6.3)$$

Normalize edilmiş gerilme uzayında, sıvılaşma yüzeyini iki kısım ile tanımlamaktadır. Bunlar, sıkışma zonundaki düşey kısım ve genleşme zonunda göçme çizgisine paralel olan kısımdır. Bu kısımlar ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Eğer } r < \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0 \text{ ise} \quad S &= S_0 \\ \text{Eğer } r > \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0 \text{ ise} \quad S &= \frac{\sin \phi_r - \frac{1}{3} \sin \phi_p}{\sin \phi_f} S_0 + \sqrt{\left(\frac{\frac{1}{3} \sin \phi_p}{\sin \phi_f} S_0 \right)^2 + \left(\frac{r - \frac{2}{3} \sin \phi_p S_0}{\sin \phi_f} \right)^2} \end{aligned} \quad (6.4)$$

6.3 ve 6.4 eşitlikleri ile verilen yukarıdaki ifadeler göçme anındaki içsel sürtünme açısı (ϕ_f) ve faz dönüşüm açısı (ϕ_p) tarafından yönetilmektedir. S_0 , kayma gerilmelerinin yaptığı işin bir fonksiyonu tarafından tanımlanan bir parametredir.

$$S_0 = 1.0 - 0.6 \left(\frac{w}{W_1} \right)^{p_1} \quad (\text{Eğer } w < W_1) \quad (6.5a)$$

$$S_0 = (0.4 - S_1) \left(\frac{w}{W_1} \right)^{p_2} + S_1 \quad (\text{Eğer } w > W_1) \quad (6.5b)$$

Yukarıdaki ifadelerde geçen ve kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşma davranışını tanımlayan malzeme parametreleri olan S_1 , W_1 , P_1 ve P_2 deney sonuçlarından elde edilebilmekte, w malzeme parametresi ise normalize plastik kayma şekil değiştirmesi işi olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$w = \left(\frac{W_s}{W_n} \right) = \frac{W_s}{\frac{(-\sigma'_{m.o} \sin \phi_r)^2}{2G_0}} \quad (6.6)$$

(6.6) eşitliğindeki 0 alt indisi başlangıç koşullarını göstermektedir. Kayma modülü ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$G = G_{ref} \sqrt{\left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m.ref}} \right)} \quad (6.7)$$

Kayma modülü G , $\sigma_{m.ref}$ gerilmesindeki referans kayma modülüne bağlıdır. Kayma şekil değiştirmesi işi artımı ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

$$dW_s = \left(\left(\frac{\sigma'_{ww} - \sigma'_{yy}}{2} \right) d(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}) + \tau_{xy} d\gamma_{xy} \right) - c_1 \left| \frac{\tau}{G_m} \right| \quad (6.8)$$

(6.8) eşitliğindeki birinci terim toplam kayma şekil değiştirmesi işini temsil etmekte, ikinci terim ise elastik iş artımını ifade etmektedir. Elastik şekil değiştirmelerin artık boşluk suyu basıncı oluşturmayacağı varsayımı ile, toplam kayma şekil değiştirmesi işinden elastik şekil değiştirmelerin yaptığı iş çıkarılmakta ve böylece sadece plastik kayma şekil değiştirmeleri tarafından yapılan iş dikkate alınmaktadır. Burada geçen c_1 parametresi bir malzeme parametresidir ve bünye modelinde sadece plastik şekil değiştirmelerden dolayı artık boşluk suyu basınçlarının oluşmasını sağlayan bir sınır değer olarak dikkate alınmaktadır.

Modelde elastik gerilmeye bağımlı izotropik rijitliğin katkısı da dikkate alınmaktadır.

$$B = \frac{(0.5K_{ref})^2}{|\sigma'_{m.ref}|} \quad (6.9)$$

Burada geçen K_{ref} , $\sigma_{m.ref}$ gerilmesindeki hacim modülü değeridir.

6.1.1.3 Deviatorik bileşen

Towhata-Iai bünye modelinin ikinci gerilme bileşenini oluşturan deviatorik bileşen çeşitli kayma mekanizmalarından oluşan yaylar tarafından temsil edilmektedir. Yaylardan her biri kayma gerilmesi bileşenlerine katkı sağlamaktadır. Bu katkı her i yayındaki normalize kayma şekil değiştirmesi (ξ) ve normalize kayma gerilmesi (η) ile aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\xi_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_v} \quad ve \quad \eta_i = \frac{Q_i}{Q_v} \quad (6.10)$$

Diğer bir deyişle, kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmeleri arasındaki ilişkiyi sağlamak için Masing kuralı ile hiperbolik model kullanılmakta ve histeresis ilmeği oluşturulmaktadır.

(6.10) eşitliğinde geçen normalizasyon parametreleri ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$Q_v = \frac{\tau_m}{2} \quad ve \quad \gamma_v = \pi \frac{Q_v}{G} \quad (6.11)$$

Kayma gerilmesi τ_m ve kayma modülü G ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned}
S_0 > 0.4 \text{ ise} & \quad S_0 < 0.4 \text{ ise} \\
\tau_m = (-\sigma'_{m,0} \sin \phi_f) S & \quad \tau_m = (-\sigma'_{m,0} \sin \phi_f) S + \Delta \tau_m \\
G = \frac{\tau_m}{\gamma_{m,0}} & \quad G_m = \frac{\tau_m}{\gamma_m} \\
\gamma_m = \gamma_{m,0} & \quad \gamma_m = \frac{\gamma_{m,0}}{\left(\frac{S}{0.4} \right)}
\end{aligned} \tag{6.12}$$

(6.12) eşitliğindeki $\gamma_{m,0}$ ve $\Delta \tau_m$ değerleri aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned}
\gamma_{m,0} &= \frac{-\sigma'_{m,0} \sin \phi_f}{G_0} \\
\Delta \tau_m &= (\sin \phi_f - \sin \phi_p)(0.4 - S)(-\sigma_{m,0})
\end{aligned} \tag{6.13}$$

(6.13) eşitliği, normalizasyonun sıvılaşma süreci ilerledikçe sürece değiştiğini göstermektedir.

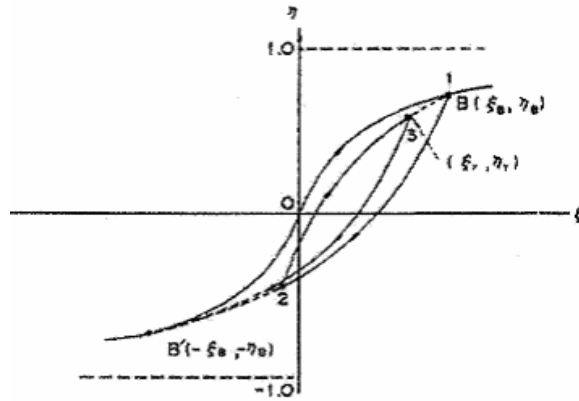
Yüklemenin durumuna göre normalize kayma gerilmesi (η) ile kayma şekil değiştirmesi (γ_i) arasındaki ilişki aşağıdaki ifade ile verilmektedir;

$$\gamma_i = \cos \theta_i (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}) + \sin \theta_i \gamma_{xy} \tag{6.14}$$

6.1.1.4 Başlangıç yüklemesi

Şekil 6.7'de zemin iskelet eğrisi, yükleme ve boşaltma eğrileri ile birlikte gösterilmektedir. Zemin iskelet eğrisi 6.15 eşitliği ile tanımlanmakta ve orijinden başlayarak B noktasına kadar devam etmektedir. B noktasında, yani başlangıç yüklemesi anında, $|\xi| = \max(\xi)$ yani zemin iskelet eğrisindeki maksimum noktadır. Diğer bir deyişle, başlangıç yüklemesi durumunda normalize gerilmeler ve şekil değiştirmeler aşağıdaki denklemi verilmiş olan eğri ile tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{\xi}{1 + |\xi|} \tag{6.15}$$



Şekil 6.7 Zemin iskelet eğrisi

6.1.1.5 Boşaltma

Ishiara (1985) tarafından boşaltma ve yeniden yükleme koşullarında Masing kuralı'nda bir düzenleme yapılmıştır. Bu çalışmaya göre kumlarda Masing kuralı kullanılarak histeresis ilmiği belirlendiğinde, büyük bir şekil değiştirme aralığında sönüm oranı gereğinden daha az hesaplanmaktadır. Bunu telafi etmek için a ve b faktörleri kullanılarak Masing kuralı'nı tarifleyen denklemde bir düzenleme yapılmış ve boşaltma durumundaki normalize gerilmeler ve şekil değiştirmeler aşağıda denklemleri verilen eğri ile tanımlanmıştır.

$$\frac{\eta - \eta_B}{2b} = \frac{\frac{\xi - \xi_B}{2a}}{1 + \left| \frac{\xi - \xi_B}{2a} \right|} \quad (6.16)$$

Bu eşitlikte geçen (η_B, ξ_B) boşaltmanın meydana geldiği noktanın koordinatlarını temsil etmekte, a ve b parametreleri ise laboratuvar deneylerinde histeresis ilmiğinde tüketilen enerji miktarına uygun şekilde nümerik olarak belirlenmektedir. ξ 'nin işareti yükleme olduğunda pozitif ve boşaltma olduğunda ise negatif olarak alınmaktadır. Boşaltma durumu, Şekil 6.7'de B noktasından 2 noktasına olan iz tarafından temsil edilmektedir.

Yeniden yükleme evresindeki normalize gerilmeler ve şekil değiştirmeler ise aşağıdaki eğri denklemleri ile tanımlanmaktadır:

$$\frac{\eta - \eta_r}{2bc} = \frac{\frac{\xi - \xi_r}{2ac}}{1 + \left| \frac{\xi - \xi_r}{2ac} \right|} \quad (6.17)$$

Burada, c parametresi yeniden yüklemenin dönüş noktasına en yakın noktaya, ya da iskelet eğri veya başlangıç yükleme eğrisindeki simetriğine ulaşmasını sağlayan parametre olarak tanımlanmakta, (ξ_r, η_r) ise en yakın dönüş noktasının koordinatları olmaktadır. Yeniden yükleme Şekil 6.7'de 2 noktasından 3 noktasına kadar olan iz ile, yeniden boşaltma ise 3 noktasından 2 noktasına olan iz ile temsil edilmektedir.

6.2 Parametrik Çalışma

Kullanılan Towhata-Iai bünye modeline ait malzeme parametrelerinin değişim aralıkları ile bunların boşluk suyu basıncı oluşumundaki etkilerini, kumun sıklık derecesine bağlı olarak belirleyebilmek için DIANA ile parametrik analizler yapılmıştır. Yapılan parametrik analiz çalışmasında, laboratuvar model deneylerinde 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik

yüklemeler uygulanan gevşek uniform kum kolonu modelleri (U1-A, U1-B ve U1-C) nümerik olarak modellenmiş ve her seferinde diğer parametreler sabit tutulurken sadece bir parametre değiştirilerek, söz konusu parametrenin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi, deneysel gözlemlerle karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Parametrik çalışma sonucunda elde edilen bilgiler ışığında, kumun sıkılık derecesine göre seçilen malzeme parametreleri kullanılarak, farklı sıkılık derecelerine sahip diğer laboratuvar model deneyleri için nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca parametrik analizler ışığında, sıkılık derecesine bağlı olarak seçilen malzeme parametreleri kullanılarak, bir test sahasında Superstition Hill (1987) depreminde gözlenen arazi davranışı ve VELACS projesi kapsamında bir gevşek kum tabakası üzerinde gerçekleştirilen santrifüj model deneyi DIANA sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir.

6.2.1 Zemin malzeme özellikleri

Towhata-Iai bünye modeli kullanılarak yapılan nümerik analizler için gerekli olan zemin malzeme özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Elastisite modülü (E)
2. Referans efektif gerilme değeri (P'_{ref})
3. Başlangıç kayma modülü (G_{ref})
4. Hacim modülü (K_{ref})
5. Suyun hacim modülü (K_f)
6. Poisson oranı (ν)
7. Su altında birim hacim ağırlık (γ)
8. Porozite (n)
9. İçsel sürtünme açısı (ϕ_f)
10. Faz dönüşüm açısı (ϕ_p)
11. Sıvılaşma parametreleri S_1 , W_1 , P_1 , P_2 ve C_1

6.2.2 Zemin özelliklerinin belirlenmesi

Bünye modelinde yeralan ve zeminin rijitlik parametreleri olarak bilinen kayma modülü (G_{ref}), hacim modülü (K_{ref}) ve elastisite modülü (E) değerleri derinlikle değişimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Başlangıç kayma modülü (G_{ref}) ve hacim modülü (K_{ref}) aşağıda verilen formüller ile hesaplanmıştır (Ishiara, 1992).

$$G_{ref} = 700 \frac{(2.17 - e)^2}{(1 + e)} \sqrt{p'_{ref}} \quad (6.18)$$

$$K_{ref} = \frac{2G_{ref}(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \quad (6.19)$$

(6.18) eşitliğindeki referans efektif gerilme değeri (p'_{ref}), göz önüne alınan derinlikteki düşey efektif gerilme değeri olarak, (6.19) eşitliğindeki poisson oranı (ν) için ise 0.30 değeri kullanılmıştır.

Elastisite modülü aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (6.20)$$

Zeminin su altında birim hacim ağırlığı (γ') ve doymun birim hacim ağırlığı (γ_d), farklı sıklık dereceleri için kumun boşluk oranı(e) ve danelerin özgül yoğunluğu (G_s) dikkate alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\gamma_d = \frac{(G_s + e)\gamma_w}{1 + e} \quad (6.21)$$

$$\gamma' = \gamma_d - \gamma_w \quad (6.22)$$

Kumun porozitesi , n , boşluk oranına bağlı aşağıdaki ilişki ile belirlenmiş

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (6.23)$$

içsel sürtünme açısı (ϕ_f), farklı boşluk oranı değerleri için Meyerhof (1969) tarafından önerilen aşağıdaki bağıntıdan faydalanılarak seçilmiştir.

$$\phi_f = 28 + 0.15D_r \quad (6.24)$$

Faz dönüşüm açısı (ϕ_p) ise Ishiara ve Towhata (1982) tarafından önerilen aşağıdaki ilişki ile hesaplanmıştır.

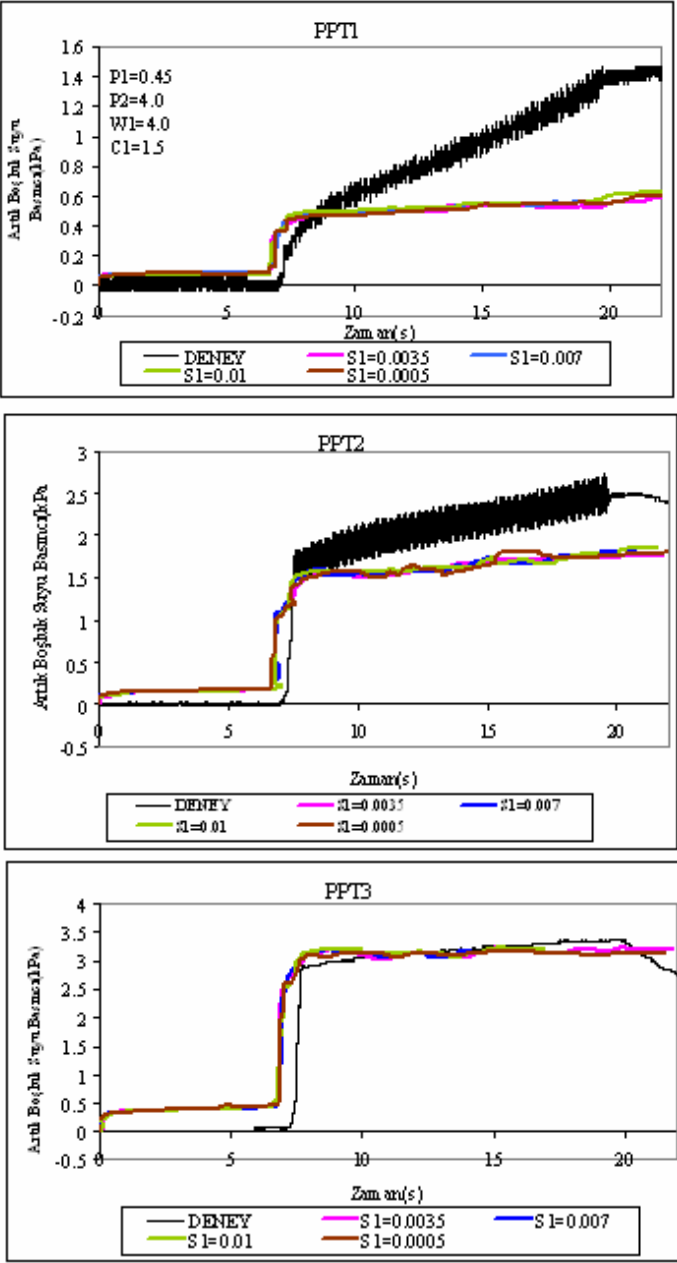
$$\phi_p = \tan^{-1}(0.875 \tan \phi_f) \quad (6.25)$$

6.2.3 Parametrik çalışma için gerçekleştirilen nümerik analizler

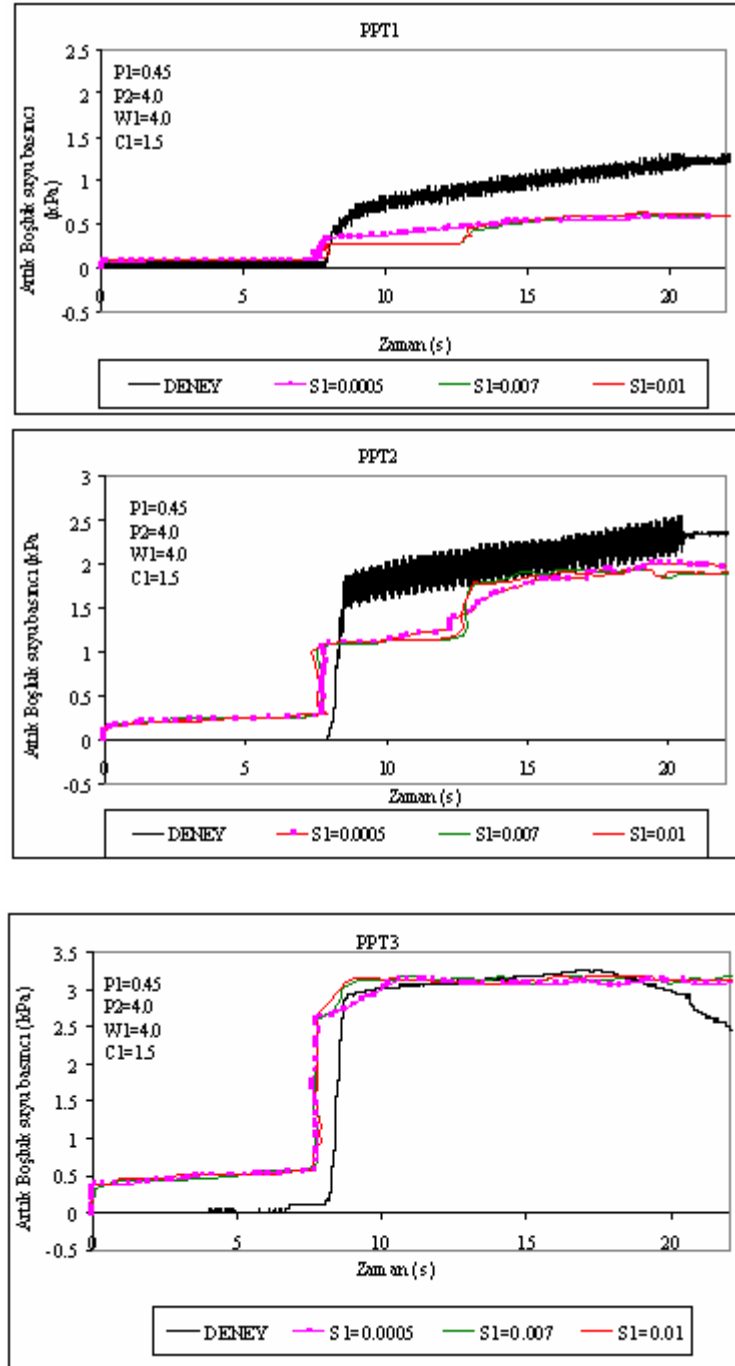
Towhata-Iai bünye modelinde kullanılan sıvılaşma parametrelerinin (S_1 , W_1 , P_1 , P_2 , C_1) değerlerini ve değişim aralıklarını belirlemek için bir seri nümerik analiz gerçekleştirilmiştir.

6.2.3.1 S_1 parametresinin etkisi

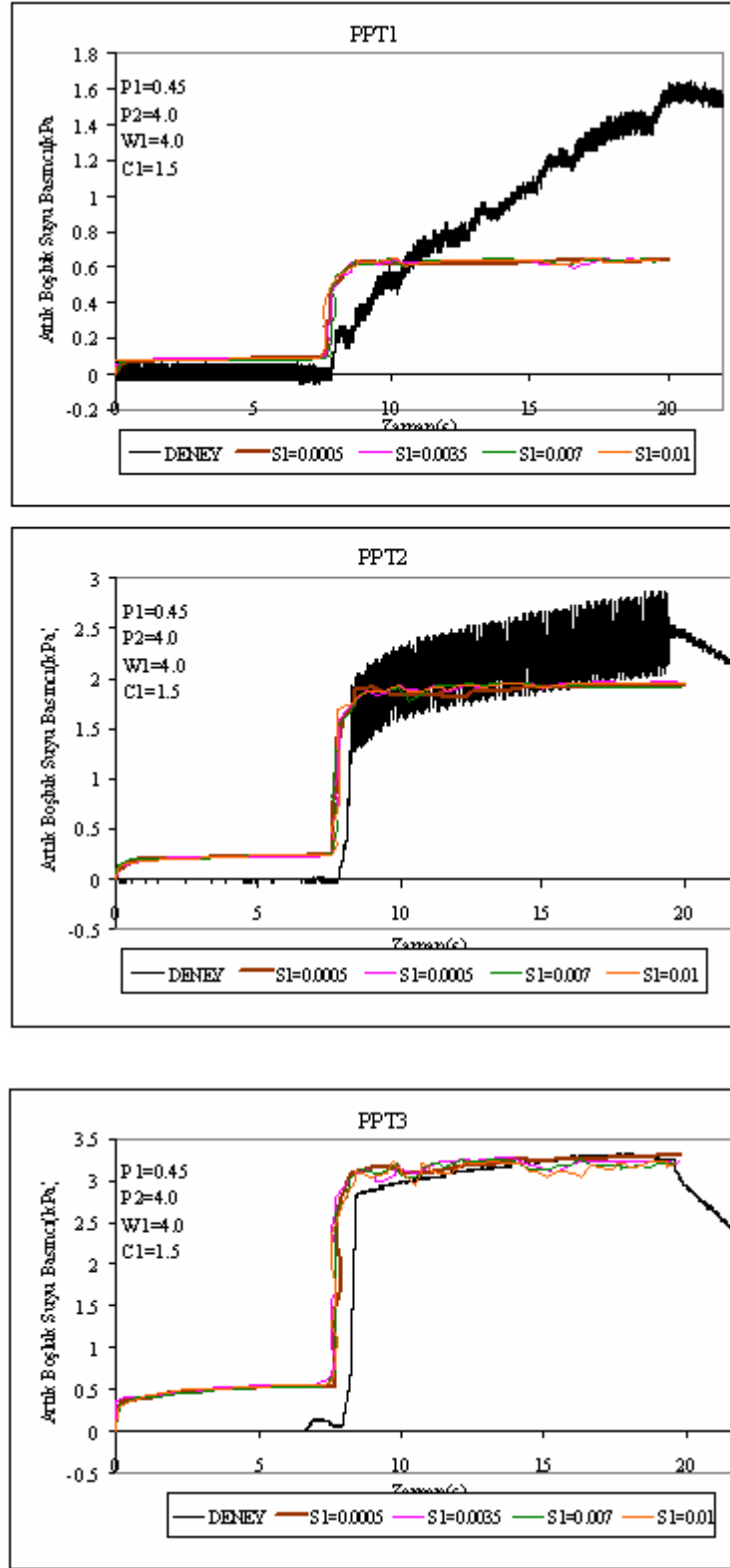
S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için Iai vd. (1992)'de ve DIANA programı el kitaplarında verilen örneklerde kullanılan değer aralıklarından yararlanılmıştır. S_1 değeri için önerilen değerler 0.0035-0.005 arasında olmakla beraber, bu parametrenin etkisini daha iyi bir şekilde görebilmek için $S_1=0.0005$, $S_1=0.0035$ ve $S_1=0.007$ ve $S_1=0.01$ değerleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıntıları Bölüm 5'de verilmiş olan 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğinde sarsıntılar uygulanarak gerçekleştirilmiş U1-A, U1-B ve U1-C laboratuvar model deneyleri için yapılan parametrik analiz çalışmalarında, S_1 parametresinin farklı değerleri için elde edilen artık boşluk suyu basıncı oluşumu eğrileri ölçüm sonuçları ile birlikte Şekil 6.8 , Şekil 6.9, Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.8. U1-A model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



Şekil 6.9. U1-B model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



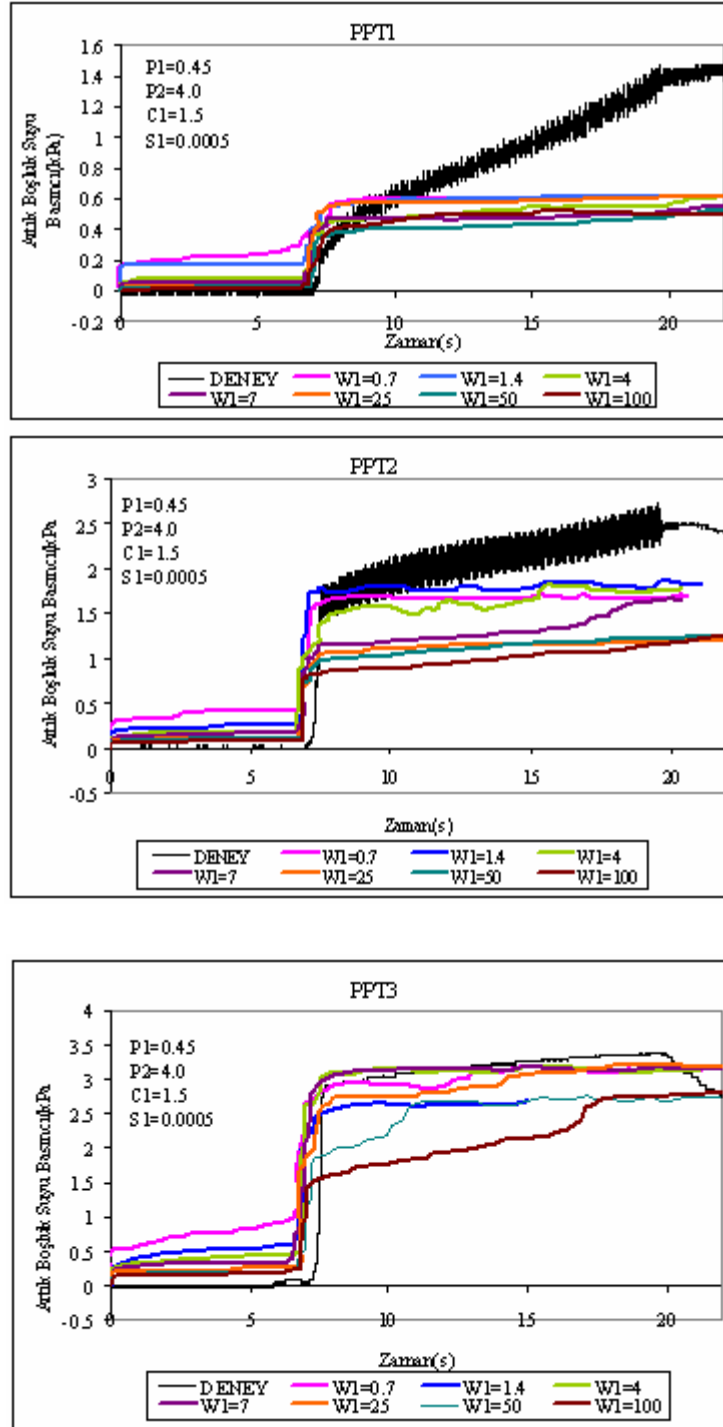
Şekil 6.10 U1-C model deneyinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'dan görüldüğü gibi, her üç ivme genliğinde de incelenen değişim aralığı içinde S_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinde çok belirgin bir etkisi bulunmamaktadır.

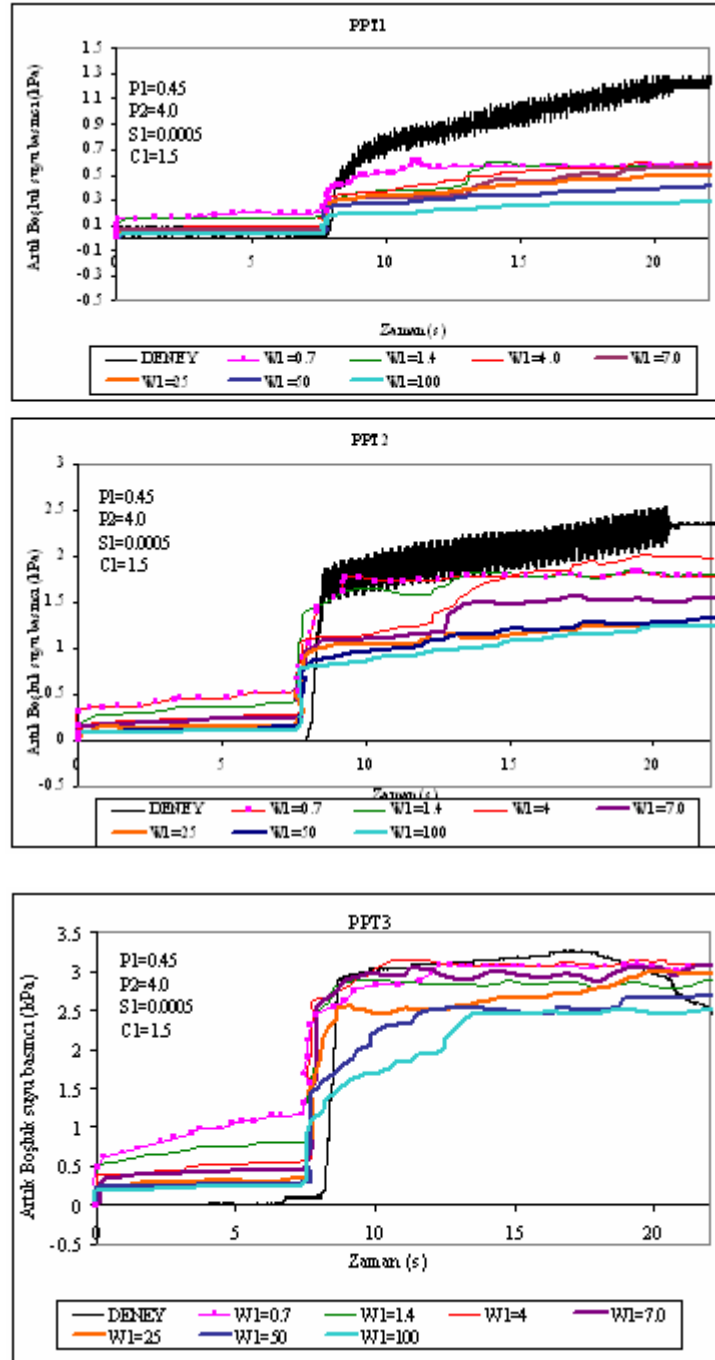
6.2.3.2 W_1 parametresinin etkisi

W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için 0.7-100.0 arasında yedi farklı değer (0.7, 1.4, 4.0, 7.0, 25.0, 50.0, 100.0) kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Literatürde W_1 için 7.0'den büyük değerler kullanıldığına rastlanmamakla birlikte, bu parametrenin boşluk suyu basıncı oluşumdaki etkisini daha iyi görebilmek için 7'den büyük değerler de kullanılarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. U1-A, U1-B ve U1-C laboratuvar model deneyleri için yapılan parametrik analiz çalışmalarında, W_1 , parametresinin farklı değerleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçları deneysel ölçüm sonuçları ile birlikte, sırası ile Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.13'de gösterilmiştir.

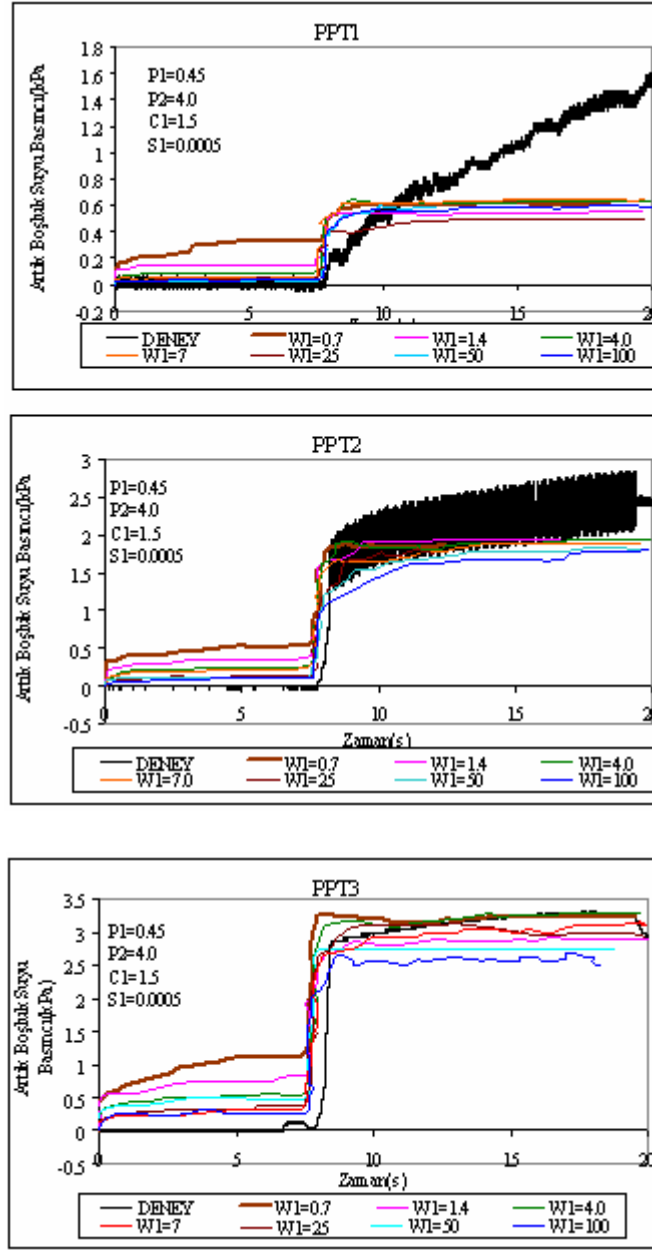
W_1 malzeme parametresinin etkisini araştırmak için yapılan parametrik çalışma sonucunda, bu parametrenin boşluk suyu basıncı oluşumunda, dolayısı ile sıvılaşma davranışı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13' de verilen grafiklerden W_1 parametresi için kullanılan değer büyüdükçe, hesaplanan artık boşluk suyu basıncında azalma meydana geldiği görülmektedir. Dolayısıyla bu parametre için kumun sıkılık derecesi artıkça daha büyük değerler kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.11. U1-A model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



Şekil 6.12. U1-B model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

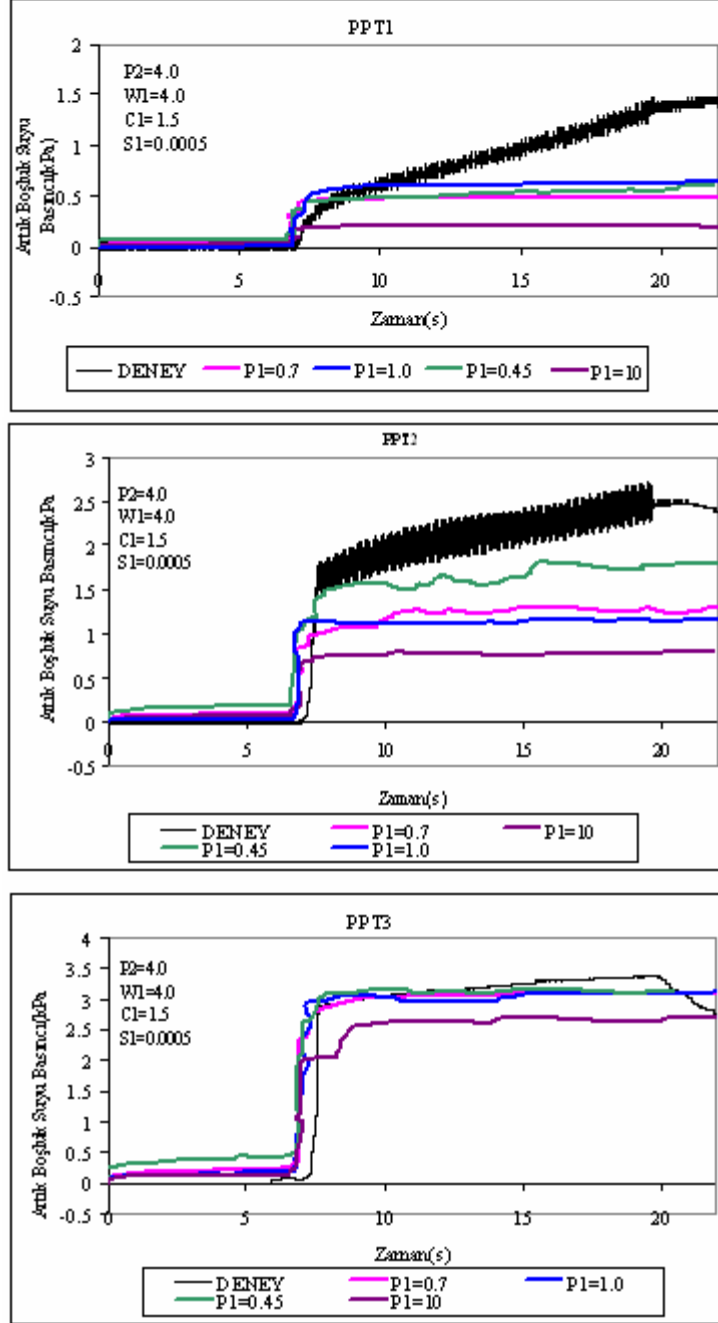


Şekil 6.13. U1-C model deneyinde W_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

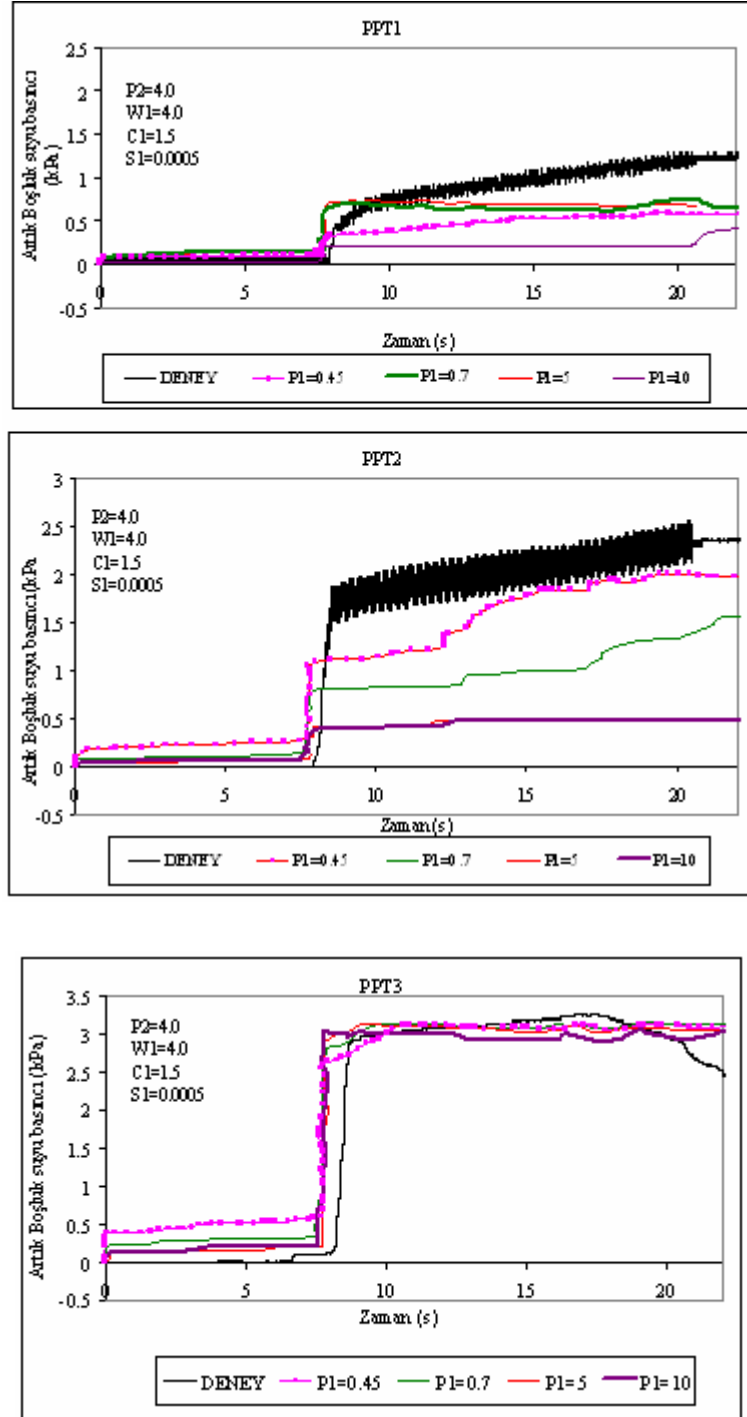
6.2.3.3 P_1 parametresinin etkisi

P_1 parametresinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisini incelemek için 0.45-10.00 arasında dört farklı değer (0.45, 0.70, 1.00 ve 10.00) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. P_1 değeri için literatürde karşılaşılan değerler 0.45-1.0 arasında olmakla beraber, bu parametrenin etkisini daha iyi bir şekilde görebilmek için $P_1=10.00$ değeri için de analizler gerçekleştirilmiştir. U1-A, U1-B ve U1-C laboratuvar model deneyleri için yapılan

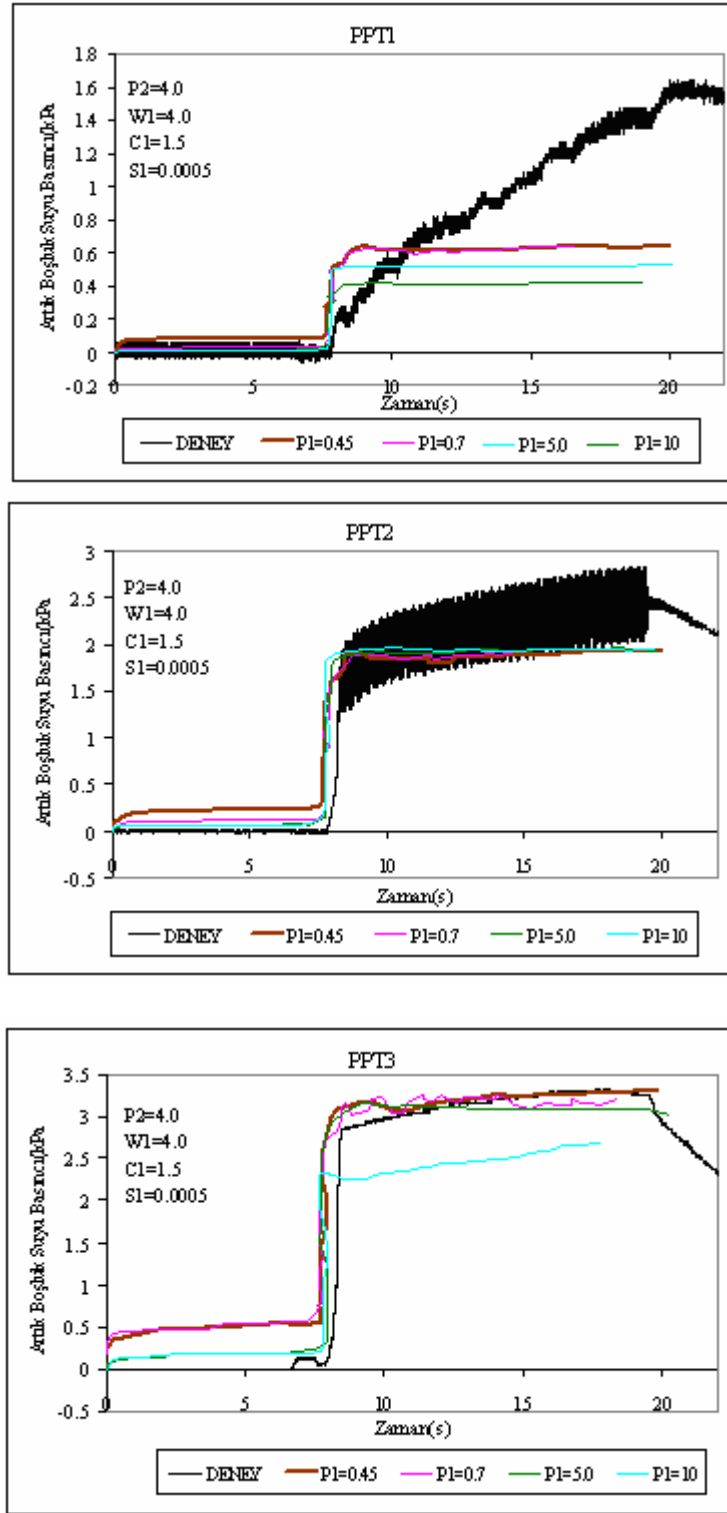
parametrik analiz çalışmalarında, P_1 parametresinin farklı değerleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçları deneysel ölçümlerle birlikte sırası ile Şekil 6.14 , Şekil 6.15, Şekil 6.16’da gösterilmiştir. Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16’ da verilen grafiklerden görüldüğü gibi P_1 için kullanılan değer büyüdükçe hesaplanan artık boşluk suyu basınçları azalmakta ve dolayısı ile zeminin sıvılaşmaya karşı direnci de artmaktadır.



Şekil 6.14 U1-A model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



Şekil 6.15. U1-B model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

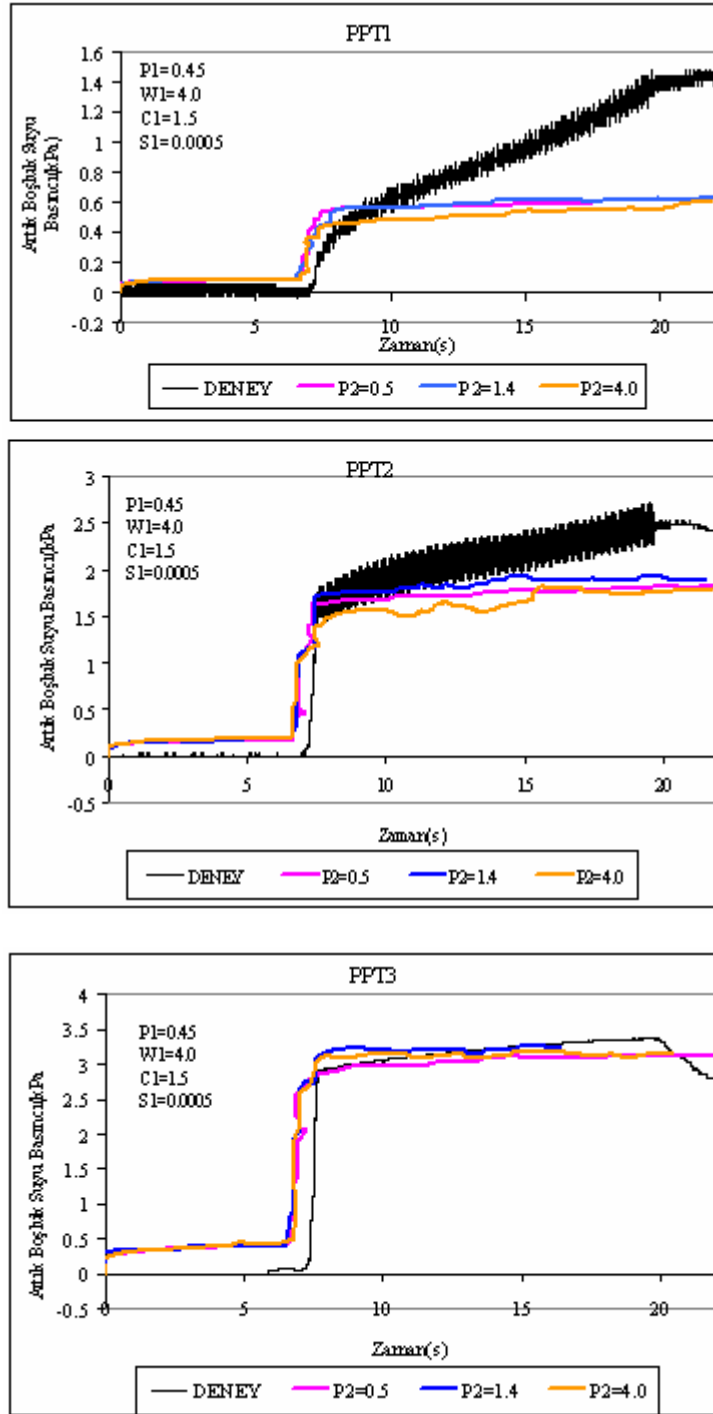


Şekil 6.16. U1-C model deneyinde P_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

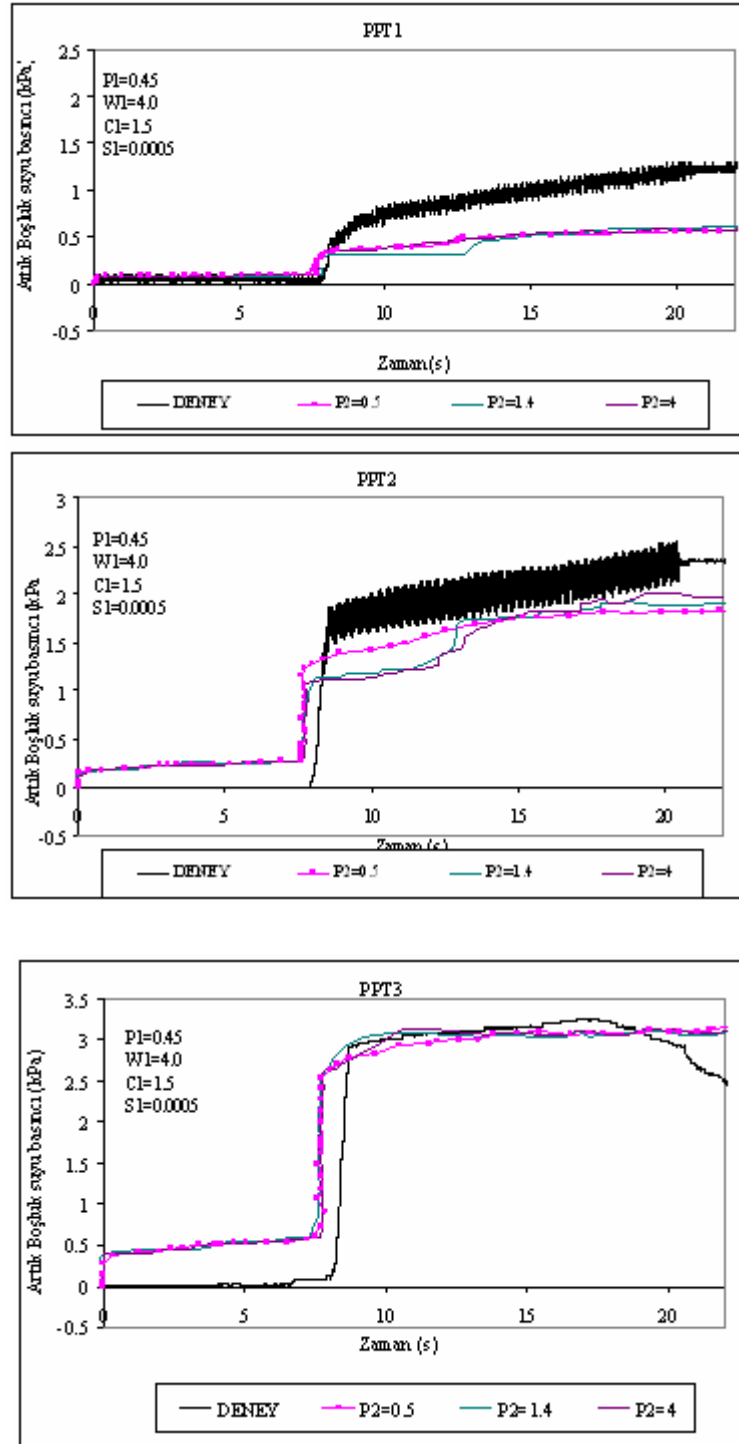
6.2.3.4 P_2 parametresinin etkisi

Artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinde P_2 malzeme parametresinin etkisini incelemek amacı ile 0.5-4.0 arasında üç farklı değer (0.5, 1.4 ve 4.0) kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. P_2 'nin değeri için literatürde rastlanılan değerler 0.9-1.4 arasında değişmesine rağmen bu parametrenin etkisini daha iyi görebilmek için 0.5 ve 4.0 arasında değerler için de analizler gerçekleştirilmiştir. U1-A, U1-B ve U1-C laboratuvar model deneyleri için yapılan parametrik analiz çalışmalarında, P_2 parametresinin değişik değerleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçları deneysel ölçümlerle birlikte sırası ile Şekil 6.17 , Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19' da verilen hesap sonuçlarından, P_2 parametresinin sıvılaşma davranışı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu durum aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

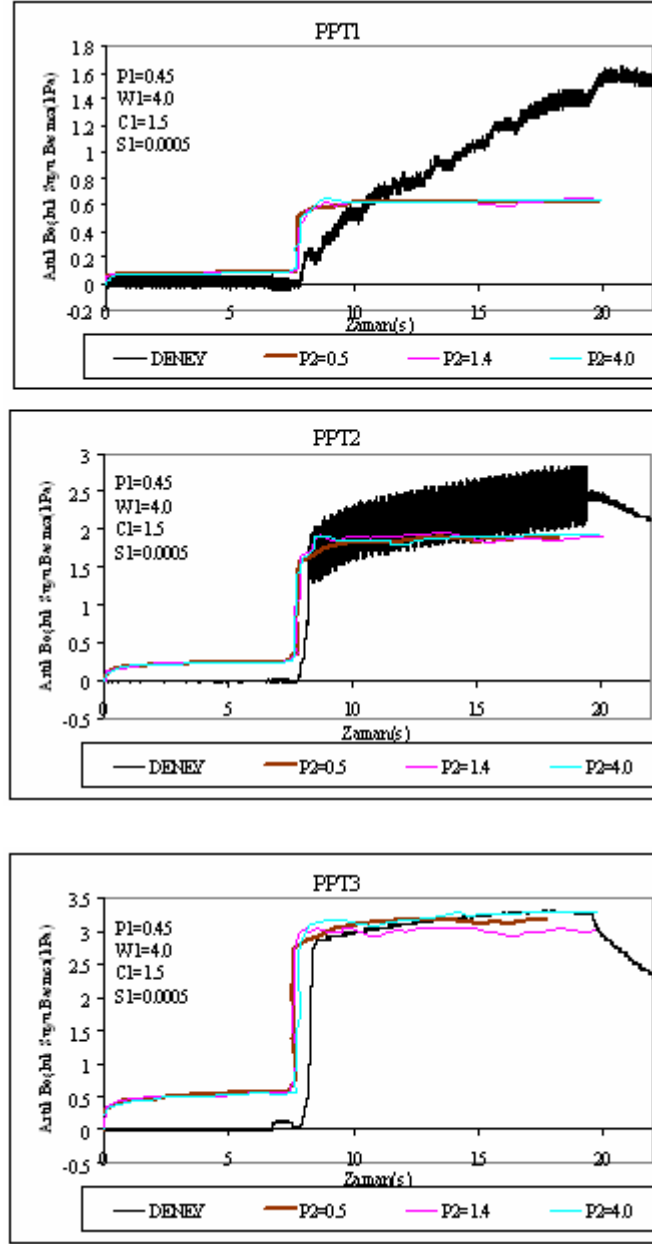
6.5 eşitliğinde verildiği gibi sıvılaşma davranışını yöneten iki farklı ifade bulunmaktadır. P_2 parametresi ancak normalize kayma şekil değiştirmesi işinin bir sınır değeri, W_1 , aşması durumunda ($w > W_1$) etkili olan bir parametre olup, gerçekleştirilen nümerik analizlerde göz önüne alınan yükleme koşullarında deney kumu için $w/W_1 < 1$ olduğu ve bu nedenle P_2 parametresinin etkili olmadığı söylenebilir.



Şekil 6.17 model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



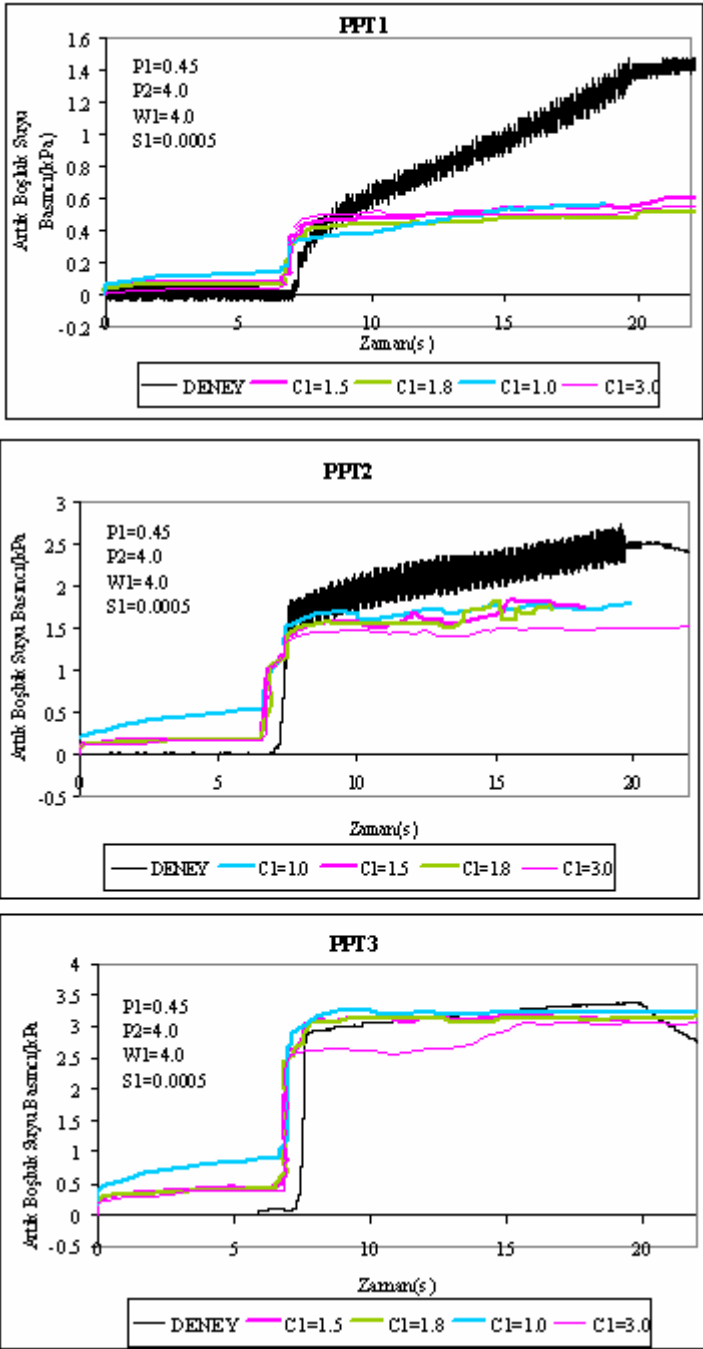
Şekil 6.18. U1-B model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



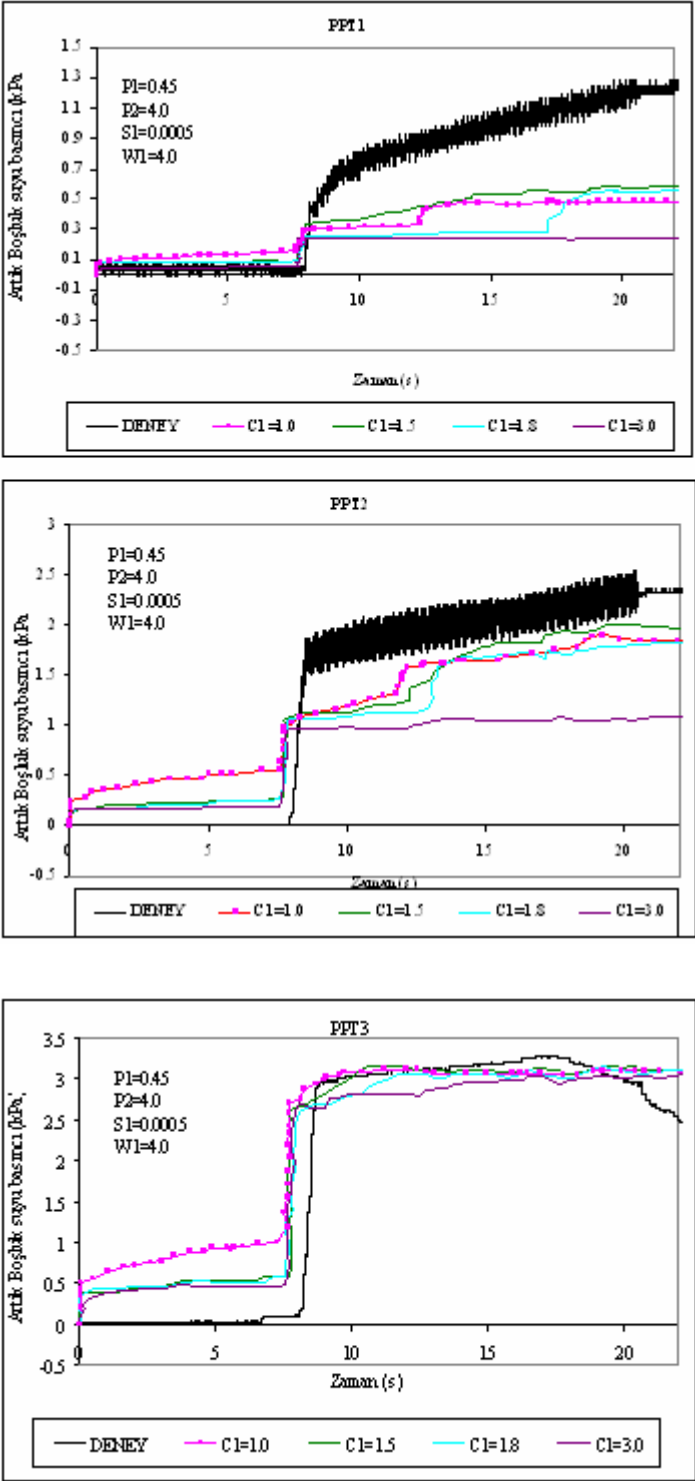
Şekil 6.19. model deneyinde P_2 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

6.2.3.5 C_1 parametresinin etkisi

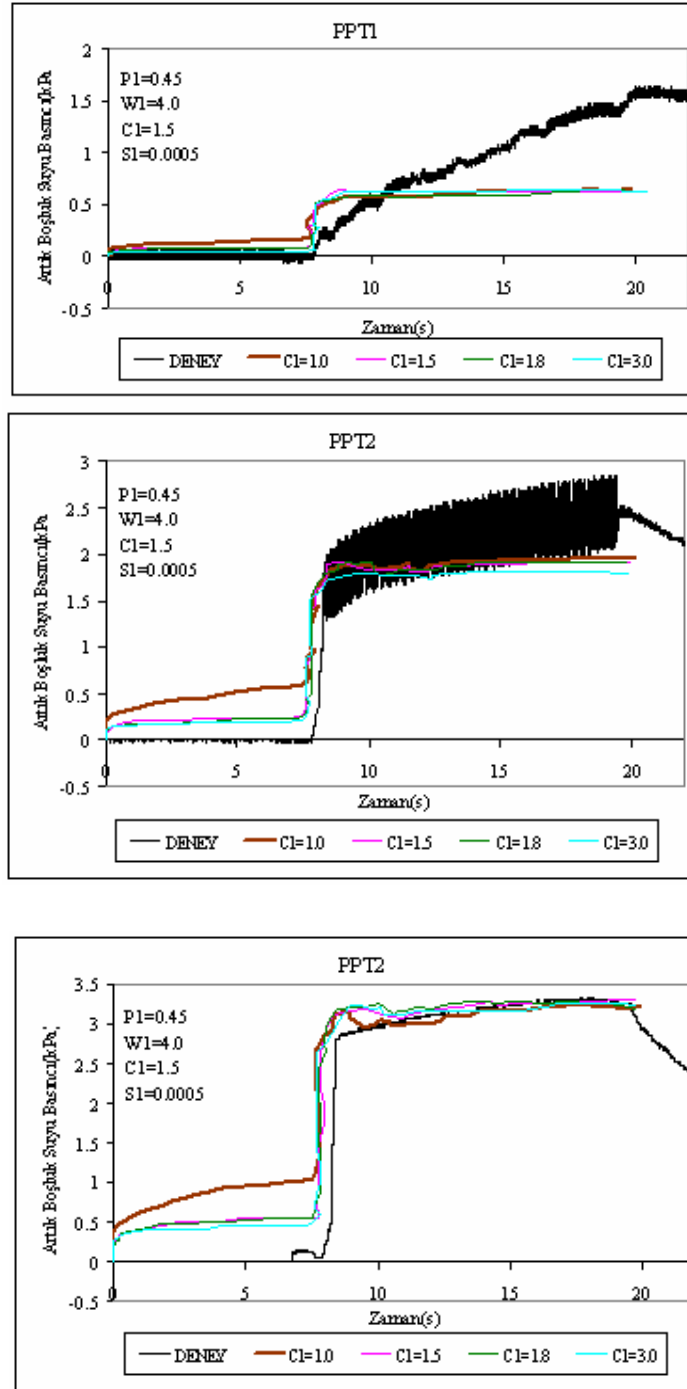
C_1 parametresinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisini incelemek amacı ile C_1 parametresi için 1.0-3.0 arasında dört farklı değer (1.0, 1.5, 1.8 ve 3.0) kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. C_1 için literatürde 1.0-1.8 arasında değerlere rastlanılmasına rağmen bu parametrenin etkisini daha iyi görebilmek için $C_1=3.0$ değeri için de analizler gerçekleştirilmiştir. U1-A, U1-B ve U1-C laboratuvar model deneyleri için yapılan parametrik analiz çalışmalarında, C_1 parametresinin değişik değerleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçları ölçüm sonuçları ile birlikte, sırası ile Şekil 6.20, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Şekil 6.20, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de verilen grafiklerden görüldüğü gibi genel olarak C_1 parametresi için kullanılan değer küçüldükçe hesaplanan artık boşluk suyu basınçları artmaktadır. (6.8) eşitliğinde ifade edildiği şekilde C_1 parametresi bünye modelinde elastik şekil değiştirme seviyeleri aşıldıktan sonra boşluk suyu basıncı oluşmasını sağlayan bir sınır değerdir. Bu nedenle artık boşluk suyu basıncı artışlarının başlaması aşamasında etkisi bulunmaktadır.



Şekil 6.20. U1-A model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



Şekil 6.21. U1-B model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi



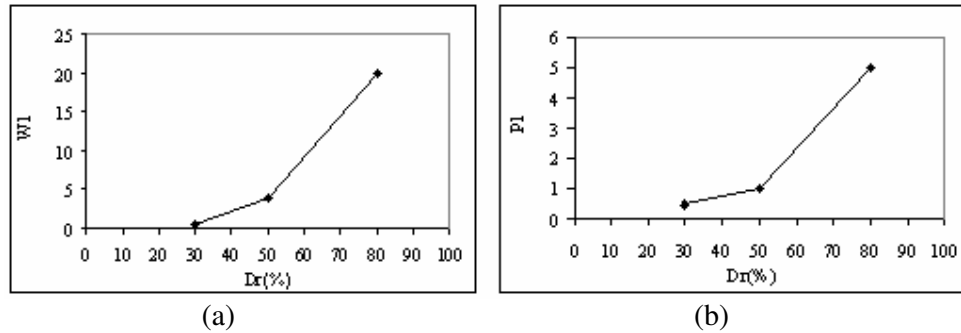
Şekil 6.22. U1-C model deneyinde C_1 parametresi değerinin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerindeki etkisi

6.3 Parametrik Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında suya doymuş kum tabakalarının sıvılaşma davranışını analiz etmek için Towhata-Iai bünye modeli kullanılarak yapılan nümerik analizlerde kullanılacak malzeme parametrelerinin sağlıklı olarak seçilebilmesi amacı ile gerçekleştirilen parametrik çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda, model deneylerde kullanılan kum için ve inceleme konusu gerilme-şekil değiştirme seviyeleri için, bünye modelinde yer alan sıvılaşma parametrelerinden W_1 , P_1 ve C_1 parametreleri için seçilen değerlerin artık boşluk suyu basıncı oluşumunu etkilediği, S_1 ve P_2 parametrelerinin ise önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Özet olarak, W_1 ve P_1 parametrelerinin değerleri büyüdükçe hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı, bu parametreler için daha küçük değer kullanılması durumunda ise artık boşluk suyu basınçlarında artış meydana geldiği görülmektedir. C_1 parametresinin ise elastik şekil değiştirme seviyelerinin aşılmasından sonra artık boşluk suyu basıncı oluşmasını sağlayan bir sınır değer işlevine sahip olduğu ve artık boşluk suyu basıncı artışlarının başlaması aşamasında etkili olduğu gözlenmiştir.

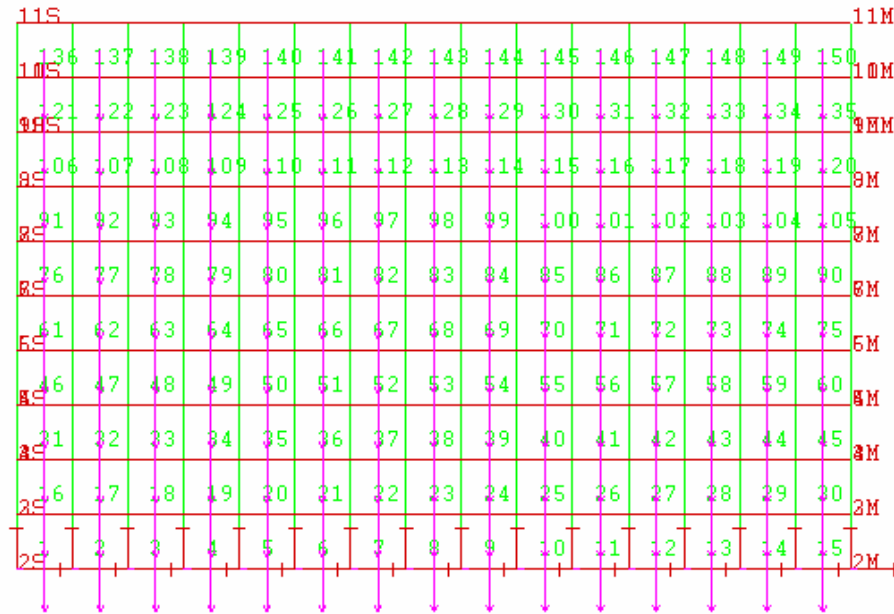
Bu parametrik çalışma sonucunda artık boşluk suyu basıncı oluşumunun modellenmesinde etkisinin oldukça önemli olduğu gözlenen W_1 ve P_1 değerlerinin kumun sıklık derecesine bağlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için literatürde kullanılan değerler de göz önünde bulundurularak, model deneylerde kullanılan kum için sıklık derecesine bağlı olarak W_1 ve P_1 parametreleri için Şekil 6.23a ve Şekil 6.23b 'de gösterilen ilişkilerin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.23 W_1 parametresi ve P_1 parametresinin sıklık derecesi ile değişimi

6.4 Arazide Suyu Doygun Kum Tabakalarının Sıvılaşma Analizi

Daha yüksek gerilme seviyelerinde, nümerik analizlerde kullanılan bünye modelinin sıvılaşma davranışını modellemekte başarı derecesini değerlendirmek ve yukarıda anlatılan parametrik analizler sonucunda kumun sıkılık derecesine bağlı olarak elde edilen malzeme parametrelerinin etkisini daha net bir şekilde görebilmek için tipik bir arazi zemin profili kullanılarak DIANA sonlu elemanlar programı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, Şekil 6.24'de sonlu elemanlar modeli gösterilen 20m kalınlığında yatay ve uniform bir kum tabakası kullanılmış ve yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinde kabul edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin arazi koşullarını temsil edebilmesi için sınır koşulları yatayda sonsuz uzanan ve yanal şekil değiştirmeler sıfır olacak şekilde modellenmiştir. İncelenen tabaka 10 adet alt tabakaya bölünmüş ve taban kayasında etkiyecek deprem hareketi olarak 1999 Kocaeli Depremi'nde kaydedilen ve maksimum ivme değeri 0.216g olan Arçelik kuvvetli yer hareketi kaydının yatay bileşeni kullanılmıştır. İvme genliğinin tabakanın sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisini incelemek için aynı ivme-zaman tarihçesi maksimum ivme değeri 0.11g, 0.216g 0.32g ve 0.43g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Analizler kum çökeline üç farklı sıkılık derecesinde olması durumları için gerçekleştirilmiştir. Gevşek kum tabakası için $D_r = 30\%$, orta sıkı kum tabakası için $D_r = 50\%$ ve sıkı kum için $D_r = 80\%$ seçilmiş ve bu sıkılık derecelerine karşılık gelen boşluk oranı değerleri ise gevşek kum için $e = 0.85$, orta sıkı kum için $e = 0.75$ ve sıkı kum için $e = 0.60$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.24 20m kalınlığında uniform bir kum tabakası için sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları

Üç farklı sıklık derecesinde kum için analizlerde kullanılan Towhata-Iai malzeme parametreleri 6.18, 6.19 ve 6.20 eşitliklerinden yararlanarak ve derinlikle değişimleri dikkate alınarak hesaplanmış ve %30, %50 ve %80 rölatif sıklık değerleri için sırası ile Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 %30 rölatif sıklıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	Gref(kPa)	Kref(kPa)	E(kPa)	S₁	W₁	P₁	P₂	C₁
0	0	0.85	0	0	0	0.0035	0.5	0.45	0.72	1.8
1	9.19	0.85	19600	51113	52136					
3	27.57	0.85	33900	88530	90301					
5	45.95	0.85	43800	114300	117000					
7	64.33	0.85	51900	135233	138000					
9	82.71	0.85	58800	153340	156000					
11	101.09	0.85	65000	169523	173000					
13	119.47	0.85	71000	184292	188000					
15	137.85	0.85	75900	197961	202000					
17	156.23	0.85	80800	210746	214960					
19	174.61	0.85	85400	223000	227254					

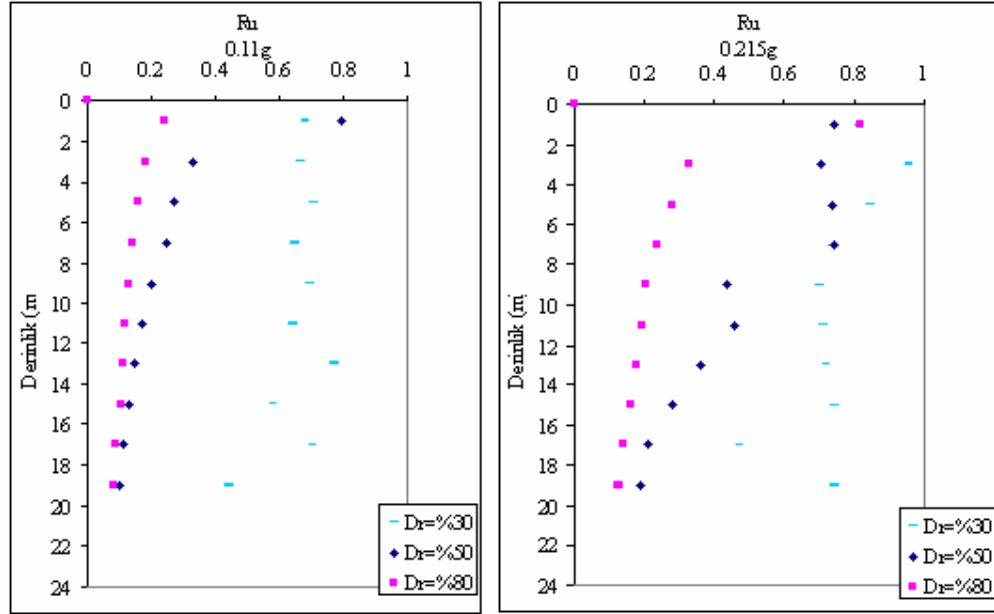
Çizelge 6.2 %50 rölatif sıklıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	Gref(kPa)	Kref(kPa)	E(kPa)	S₁	W₁	P₁	P₂	C₁
0	0	0.75	0	0	0	0.0035	4.0	1.0	0.72	1.8
1	9.69	0.75	24622	64210	65494					
3	29.07	0.75	42646	111214	113439					
5	48.45	0.75	55056	143577	146449					
7	67.83	0.75	65143	169883	173280					
9	87.21	0.75	73865	192629	196482					
11	106.59	0.75	81661	212959	217219					
13	125.97	0.75	88775	231511	236142					
15	145.35	0.75	95360	248683	253657					
17	164.73	0.75	102000	264743	270038					
19	184.11	0.75	107000	279884	285481					

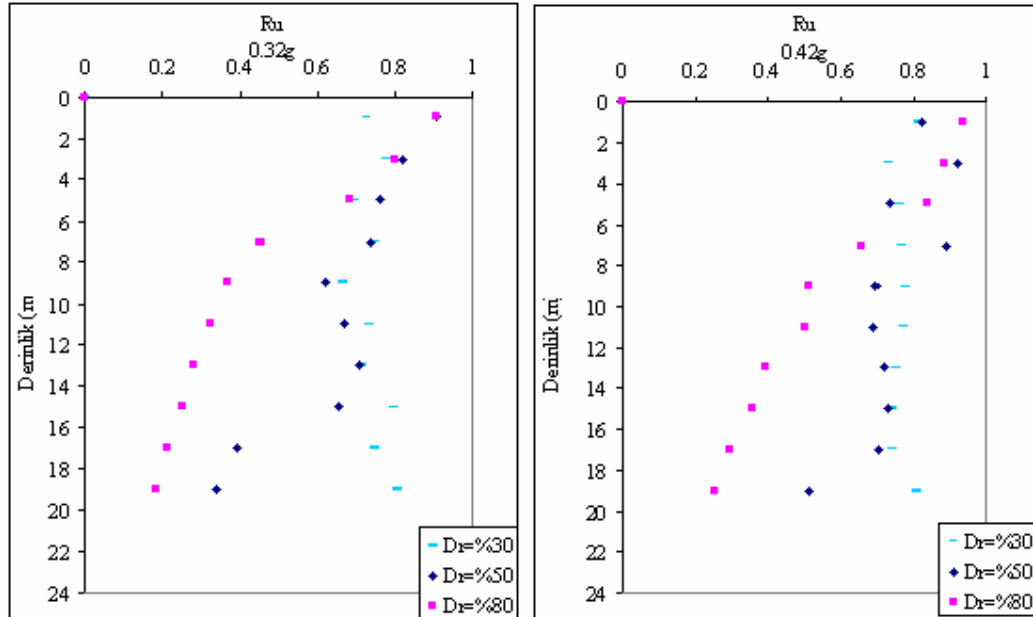
Çizelge 6.3 %80 rölatif sıklıkta üniform kum tabakası için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref}(kPa)	K_{ref}(kPa)	E(kPa)	S₁	W₁	P₁	P₂	C₁
0	0	0.6	0	0	0	0.005	20.0	5.0	0.72	1.8
1	10.69	0.6	34600	90000	92000					
3	32.07	0.6	59900	156000	159000					
5	53.45	0.6	77300	202000	206000					
7	74.83	0.6	91500	239000	243000					
9	96.21	0.6	104000	271000	276000					
11	117.59	0.6	115000	299000	305000					
13	138.97	0.6	125000	325000	332000					
15	160.35	0.6	134000	349000	356000					
17	181.73	0.6	143000	372000	379000					
19	203.11	0.6	151000	393000	401000					

20m kalınlığında %30, %40 ve %80 rölatif sıklıklardaki üniform kum tabakası tabanında maksimum ivme genliği 0.11g, 0.216g, 0.32g ve 0.43g olan deprem hareketi etkimesi durumları için yapılan dinamik analiz sonuçları değerlendirilerek, farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde gevşek, orta sıkı ve sıkı kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri elde edilmiştir. Şekil 6.25’de 0.11g ve 0.215g maksimum ivme genliklerinde %30, %40 ve %80 rölatif sıklıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi, Şekil 6.26’da ise 0.32g ve 0.43g maksimum ivme genliklerinde %30, %40 ve %80 rölatif sıklıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi gösterilmektedir.



Şekil 6.25 0.11g ve 0.215g maksimum ivme genliğinde deprem hareketi etkisinde %30, %40 ve %80 rölatif sıkılıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

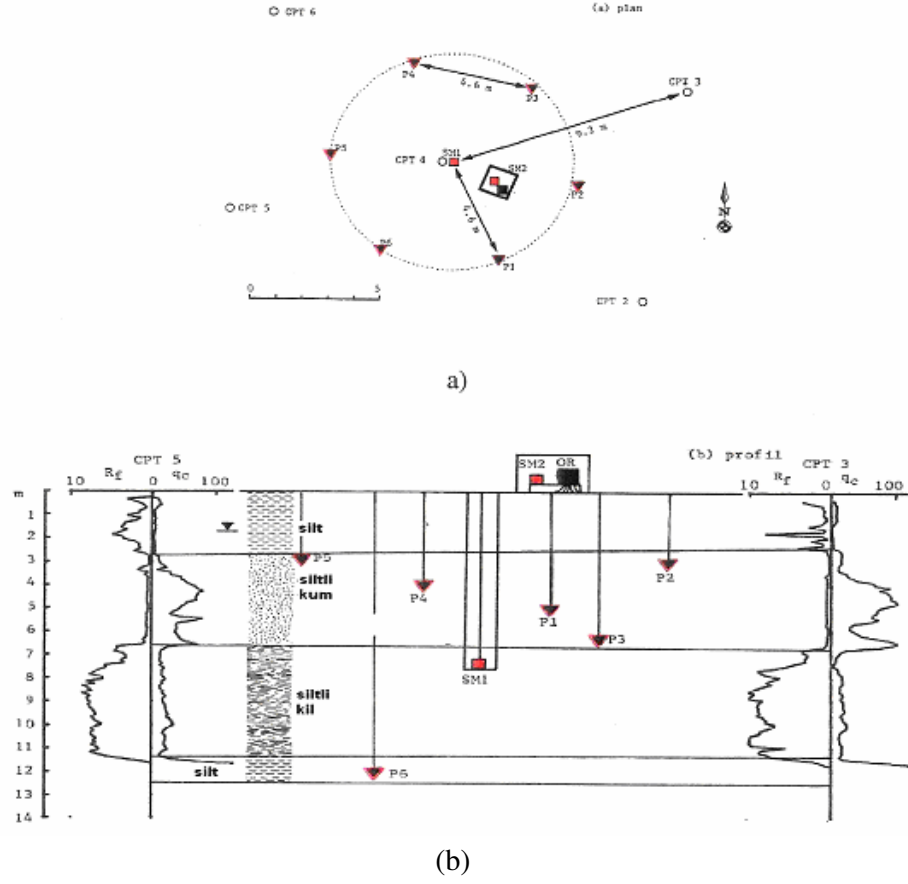


Şekil 6.26 0.32g ve 0.42g maksimum ivme genliğinde deprem hareketi etkisinde %30, %40 ve %80 rölatif sıkılıklardaki üniform kum tabakasında oluşacak maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

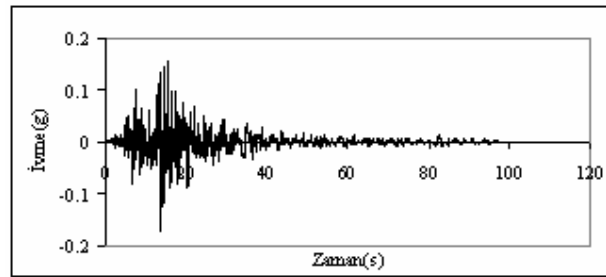
Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da verilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişim grafikleri incelendiğinde, kumun sıklık derecesinin ve sarsıntı şiddetinin dinamik yükleme sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarına olan etkisi görülmektedir. Maksimum 0.11g sarsıntı şiddetinde deprem kaydının kullanıldığı analizlerde sıkı ve orta sıkı kumda sıvılaşmaya yol açacak kadar büyük r_u değerleri görülmezken, gevşek kumda ise bu değerlerin sıvılaşmaya yol açabilecek mertebelerde olduğu görülmektedir. 0.215g’lik sarsıntı şiddetinde r_u değerlerinin gevşek kumda tüm tabakada sıvılaşmaya yol açabilecek seviyelerde olduğu, orta sıkı kumda yüzeyden itibaren 7m’lik derinliğe kadar olan kısımda yüksek değerlerde olduğu, sıkı kumda ise bu değerlerin tüm tabaka boyunca oldukça küçük olduğu görülmektedir. 0.32g ve 0.43g’lik ivme şiddetlerinin uygulandığı dinamik analizlerde ise gevşek ve orta sıkı kum tabakalarında yüzeyden itibaren 15-17m’lik derinliklere kadar r_u değerlerinin sıvılaşmaya yol açacak değerlerde olduğu, sıkı kum tabakasında ise r_u değerlerinin ilk 5 m’lik derinliğe kadar yüksek olduğu, daha derinlerde ise oldukça küçük olduğu görülmektedir. Genel olarak, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da gösterilen analiz sonuçlarından depremler sırasında kumlu zeminlerde oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde sıklık derecesinin ve sarsıntı şiddetinin etkisi açık olarak görülürken, artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle birlikte azaldığı da görülmektedir. Analiz sonuçlarından elde edilen bu eğilimlerin beklenenlerle uyumlu olduğu ve kullanılan nümerik model ile seçilen malzeme parametrelerinin oldukça gerçekçi sonuçlar verdiği görülmektedir.

6.5 Wildlife Sıvılaşma Alanı Zemin Davranışı (Youd vd., 2005)

Parametrik analizler sonucunda elde edilen malzeme parametreleri kullanılarak, sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu bilinen bir arazi DIANA sonlu elemanlar modeli ile analiz edilmiştir. Nümerik modellemenin geçerliliğinin sınanması amacı ile depremsellliği ve sıvılaşma potansiyeli yüksek olan Wildlife Sıvılaşma Araştırma Alanı’nda bir deprem sırasında elde edilen arazi ölçümleri ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu arazide sıvılaşma potansiyelinin yüksek olduğu bir kum tabakası içine farklı derinliklerde 5 adet piezometre ile iki adet ivme ölçer yerleştirilmiştir. Arazi zemin profili ve boşluk suyu basıncı ölçerler(piezometreler) ile ivme ölçerlerin konumları Şekil 6.27’de gösterilmiştir. 1987 yılında meydana gelen Superstition Hill depremi ($M=6.6$) sırasında (Şekil 6.28) araştırma alanında piezometreler yardımı ile deprem sırasında kum tabakasında oluşan ve sıvılaşmaya yol açan boşluk suyu basıncı artışları kaydedilmiştir.



Şekil 6.27 Wildlife Sıvılaşma Araştırma Alanı a) arazi planı b) piezometre derinlikleri (Youd vd.2005)



Şekil 6.28 Superstition Hills depremi ivme kaydı (Youd, 2005)

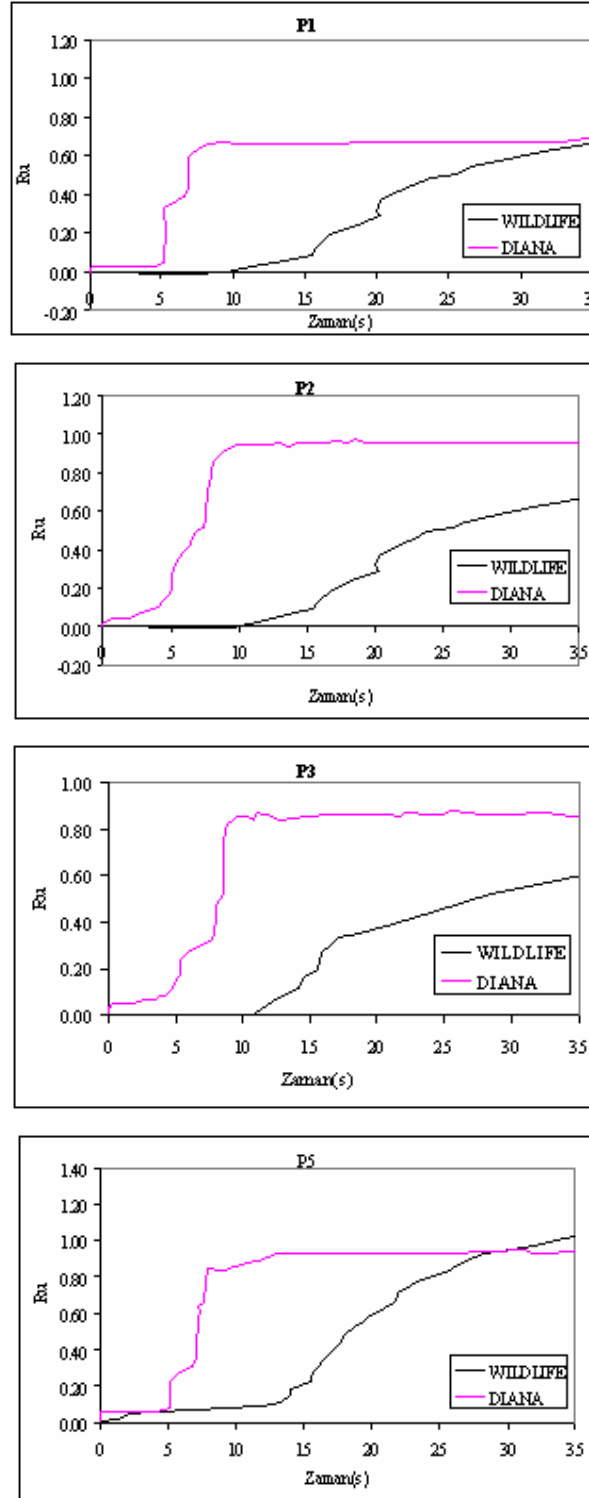
DIANA sonlu elemanlar programı kullanılarak Wildlife Sıvılaşma Araştırma Alanı'nın Superstition Hill depremi sırasındaki davranışı analiz edilerek yerinde ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile nümerik analizden elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır. Analizlerde, deprem hareketi Şekil 6.27'de görülen yüzeyden 12.5m derinlikte yer alan silt tabakasının tabanında etkitilerek, deprem sırasında oluşacak boşluk suyu basınçları hesaplanmıştır. Nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 Wildlife test alanı zemin tabakaları için nümerik analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	Gref(kPa)	Kref(kPa)	E(kPa)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
Silt	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
	1.00	15.7	0.68	36700	95600	95612					
	2.50	14.73	0.79	28600	74500	74547					
Siltli kum	3.25	24.34	0.425	73800	192500	192512	0.0005	1.0	0.45	0.72	1.8
	3.75	28.09	0.425	79300	206700	206792					
	4.25	31.80	0.425	84400	220100	220146					
	4.75	35.58	0.425	89200	232700	232736					
	5.25	39.32	0.425	93800	244600	244679					
	5.75	43.07	0.425	98200	256000	256066					
	6.25	46.81	0.425	102300	266900	266967					
	6.75	50.56	0.425	106400	277400	277440					
Siltli kil	9.00	95.31	0.407	151000	393700	393804	-	-	-	-	-
Silt	11.75	124.43	0.407	172500	449800	449964	-	-	-	-	-

Şekil 6.27'de gösterilen zemin kesitinde yer alan P1, P2, P3 ve P5 piezometrelerinde ölçülen artık boşluk suyu basıncı oranı değerleri ile nümerik analizden hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının zamanla değişimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 6.29'da verilmiştir. Şekil 6.29'dan görüldü gibi analiz sonuçları ile arazide ölçülen boşluk suyu basıncı davranışı arasında farklılıklar bulunmaktadır. Arazide ölçülen artık boşluk suyu basıncı artışlarının deprem hareketi süresince oldukça sınırlı kaldığı ve deprem süresi sonunda dahi (23 saniye) $r_u=0.4-0.5$ değerlerinde olduğu, buna karşın deprem bittikten sonra boşluk suyu basıncı artışlarının devam ettiği gözlenmektedir. DIANA programında kullanılan bünye modelinde ise dinamik yüklemenin başlaması ile birlikte boşluk suyu basıncı artışları olacağı ve bir süre sonra bu artışın oldukça ani bir şekilde yükselerek sıvılaşmaya yol açacağı hesaplanmaktadır. Özet olarak, nümerik analiz sonuçları arazide gözlenen sıvılaşma davranışını öngörebilmekte, ancak hesaplanan boşluk suyu basıncı artışlarının zamana bağlı gelişimi ile ölçülenler

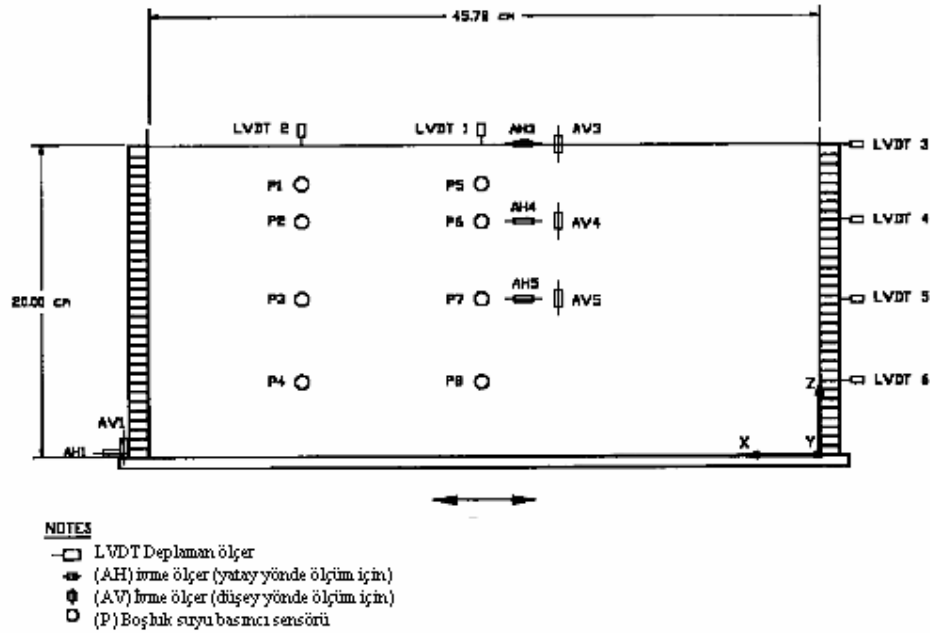
arasında önemli farklar bulunmaktadır. Bunun nedenleri arasında, malzeme parametrelerinin arazi zemin tabakaları için gerçeğe yakın seçilmemiş olması olasılığı ve deprem hareketinin taban kayasında değil, 12.5m derinlikte bir zemin tabakasında etkililmiş olması düşünülebilir. Ayrıca, arazi ölçümlerinin sağlıklılığı hakkında da bazı tereddütler ileri sürülmüştür. Wildlife araştırma alanı'nda gözlenen boşluk suyu artışı-zaman davranışı ile ilgili olarak Youd(2005) bunun zeminde depremden sonra devam eden salınımlara bağlı olarak oluşan kayma deformasyonlarından kaynaklanmış olabileceğini, diğer bazı araştırmacılar ise ölçümlerin güvenilirliği konusunda kuşkular olduğunu ileri sürmüşlerdir (Husmand, 1992; Yoshida,1998).



Şekil 6.29 Wildlife araştırma alanı'nda P1, P2, P3 ve P5 piezometrelerinde ölçülen ve nümerik analizden hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının karşılaştırılması

6.6 VELACS Projesi (Arulanandan ve Scott, 1993) Kapsamında Gerçekleştirilen Santrifüj Deneyi Modelinin Nümerik Analizi

Parametrik analizler sonucunda farklı sıklık derecelerine göre belirlenen malzeme parametrelerinden yararlanarak DIANA sonlu elemanlar programı ile VELACS (Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies) Projesi kapsamında %40 rölatif sıklığa sahip suya doymun gevşek bir kum tabakası modeli üzerinde gerçekleştirilen bir santrifüj deneyi nümerik olarak modellenmiştir. Nümerik modelleme sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basınçları ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model deney düzeneği Şekil 6.30'da ve nümerik analizde kullanılan Towhata-Iai bünye modeline ait malzeme parametreleri ise Çizelge 6.5' de verilmiştir.

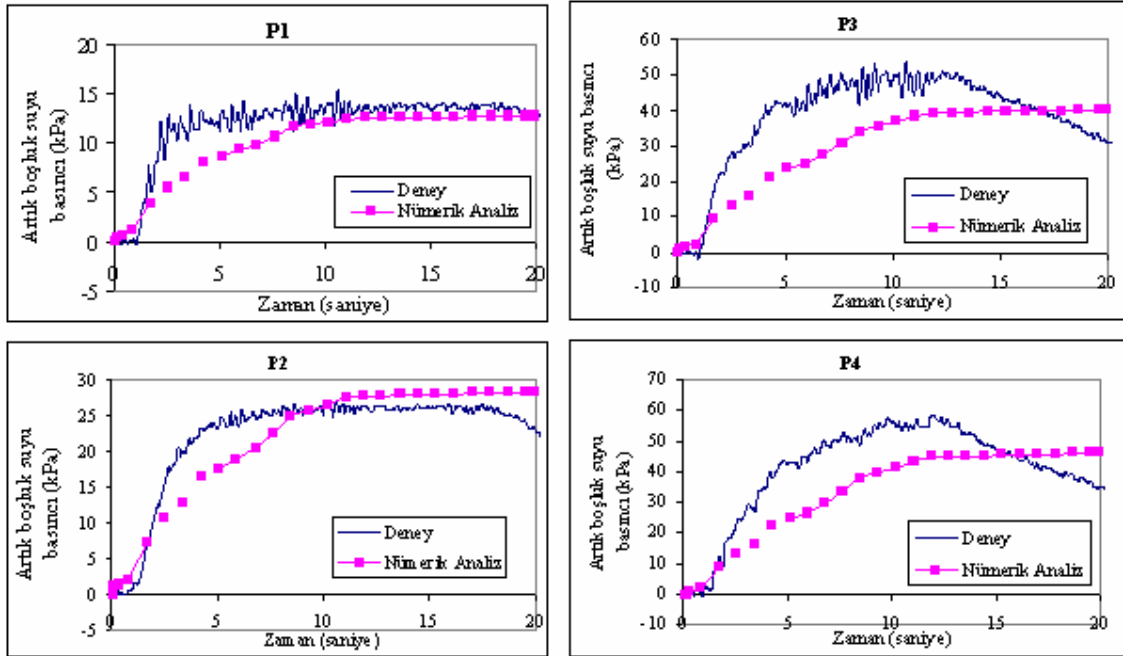


Şekil 6.30 Model deney düzeneği (VELACS, 1993)

Çizelge 6.5 VELACS model deneyi için analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E(kPa)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
0	0	0.73	0	0	0	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
0.01	0.0939	0.73	2571	6705	6707					
0.03	0.282	0.73	4453	11613	11616					
0.05	0.469	0.73	5749	14992	14997					
0.07	0.660	0.73	6802	17739	17744					
0.09	0.845	0.73	7713	20114	20120					
0.11	1.030	0.73	8527	22237	22244					
0.13	1.220	0.73	9270	24175	24182					
0.15	1.408	0.73	99.58	25968	25975					
0.17	1.596	0.73	10600	27644	27653					
0.19	1.784	0.73	11200	29226	29234					

Yapılan analizlerden dinamik yükleme sonucu meydana gelen artık boşluk suyu basıncının zamanla değişimi elde edilerek Şekil 6.29’da gösterilen model deney sisteminde P1, P2, P3 ve P4 noktalarında ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.31’de gösterilmiştir.



Şekil 6.31 P1, P2, P3 ve P4 sensörlerinde ölçülen ve nümerik analizden hesap edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.31’de gösterilen karşılaştırmalı sonuçlardan parametrik çalışmalar sonucu %40 rölatif sıkılık değeri için belirlenen malzeme parametreleri ile gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçları ile santrifüj model deneyinden ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının genel olarak oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

7. DENEYSEL SONUÇLARIN NÜMERİK ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1 Giriş

Bölüm 5’de ayrıntıları verilen suya doymun uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar model deneyleri nümerik olarak modellenerek, deneysel olarak elde edilen artık boşluk suyu basıncı ölçümleri ile nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

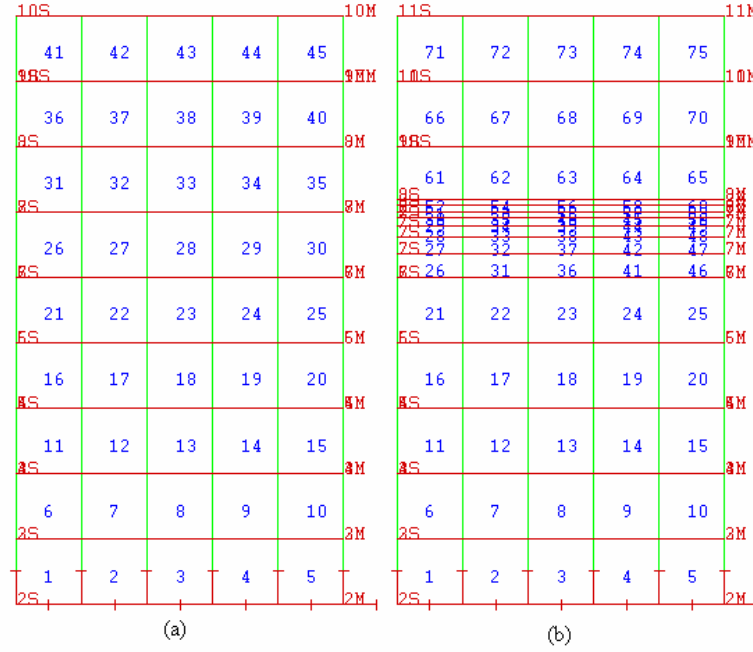
DIANA sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilen nümerik analizlerde, dinamik yüklemeler etkisinde artık boşluk suyu basıncı oluşumu ve sıvılaşmayı modelleyen ve ayrıntıları Bölüm 6’da verilen Towhata-Iai bünye modeli kullanılmıştır. Deneysel çalışmada oluşturulan farklı sıklık derecelerine sahip kum kolonları için gerekli malzeme parametrelerinin tayini için ise Bölüm 6’da sunulan parametrik analiz çalışmaları sonuçlarından faydalanılmıştır.

Aşağıdaki bölümlerde önce DIANA sonlu elemanlar programında Towhata-Iai bünye modeli kullanılarak gerçekleştirilen nümerik analizlerde kullanılan eleman tipi, sonlu elemanlar modeli, sınır koşulları ve analiz aşamaları hakkında bilgi verilmiş, daha sonra nümerik analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

7.2 Sonlu Elemanlar Modeli

Suya doymun uniform kum kolonları, silt ara tabakalı kum kolonları ve farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde gerçekleştirilen model deneylerinde gözlenen davranışı analiz etmek amacı ile düzlem şekil değiştirme yaklaşımı ile dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde eleman tipi olarak 4 düğüm noktalı düzlem şekil değiştirme elemanı olan dörtgen QU4 Q8EPS elemanlar kullanılmıştır. Sonlu elemanlar ağı, model deneylerde kum kolonları ortasına yerleştirilen boşluk suyu basıncı ölçerlerin bulunduğu noktalar ile çakışacak şekilde oluşturulmuştur. Buna göre, uniform ve iki tabakalı kum kolonları için oluşturulan modellerin sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları Şekil 7.1a’da, silt ara tabakalı kum kolonları için oluşturulan modellerin sonlu elemanlar ağı ve sınır koşulları ise Şekil 7.1b’de gösterilmektedir. Şekil 7.1b’de görüldüğü gibi silt ara tabakalı kum kolonları için oluşturulan sonlu elemanlar ağında, silt tabakasının altındaki artık boşluk suyu basıncı değişimlerini daha net bir şekilde görebilmek için daha ince bir ağ kullanılmıştır.

Kum kolonlarının oluşturulduğu pleksiglas silindirin sınır koşullarını temsil etmesi için, modellerin tabanı boyunca yatay ve düşey yönde hareketi sınırlandırılmıştır. MPC RCONNECT opsiyonu ile modelin sağ ve sol kenarları boyunca oluşturulan düğüm noktalarında rijit yatay bağlantı koşulları uygulanmış ve modelin düşey yönde deplasman yapmasına izin verilmiştir.



Şekil 7.1 Model deneyler için oluşturulan sonlu elemanlar ağı (a) Uniform ve iki tabakalı kum kolonları için (b) silt ara tabakalı kum kolonları için

Modellerde zeminin ve suyun ağırlığından doğan yükleme ile model tabanında uygulanan dinamik yükleme olmak üzere iki farklı yükleme koşulu dikkate alınmış ve tüm modellerde su zemin yüzeyinde kabul edilmiştir.

7.3 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar ağları Şekil 7.1’de verilen uniform ve silt ara tabakalı kum kolonlarının sınılaşma analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

- Kum tabakasının başlangıç gerilme durumunu belirlemek için K_0 koşullarında yapılan statik analiz
- Tabakanın başlangıç gerilme durumu da dikkate alınarak yapılan nonlinear dinamik analiz (Nonlinear Transient Analysis)

Bu analiz adımları aşağıda açıklanmıştır.

7.3.1 Statik Analiz

Model deneyler için oluşturulan kum kolonlarının dinamik yüklemeler altında davranışını nümerik olarak modellemek için dinamik analizden önce kum kolonunun K_0 koşulları altında statik analizi yapılarak başlangıç düşey efektif gerilmeleri ve boşluk suyu basınçları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen statik analizle belirlenen deplasmanlar sıfırlanmış, efektif gerilmeler ve boşluk suyu basınçları bir sonraki dinamik analizlerde başlangıç koşulları olarak dikkate alınmıştır. Statik analizlerde poisson oranı $\nu=0.33$ olarak alınmış ve K_0 değeri olarak ise kullanılan poisson oranına karşılık gelen 0.5 değeri kullanılmıştır.

7.3.2 Dinamik Davranış Analizi

Laboratorda yapılan model deneylerinin dinamik yüklemeler etkisinde davranışını nümerik olarak analiz etmek için $\Delta t=0.01$ zaman aralıkları ve 2500 zaman adımı kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. Seçilen bu zaman aralığı sıvılaşma oluşumunun nümerik analizi konusunda yapılmış benzer çalışmalardan yararlanılarak belirlenmiş ve yeterli yakınsamayı ve nümerik denge koşullarını sağladığı görülmüştür. Zaman tanım alanında integrasyon için Wilson-Teta methodu kullanılmış ve method için gerekli olan parametreler DIANA programı tarafından belirlenmiştir. Dinamik analizlerde iterasyon yöntemi olarak Newton-Raphson yöntemi kullanılmış ve her bir zaman aralığındaki işlem için tanımlanan doğruluk kriterlerinin sağlanması için maksimum 10 iterasyon yapılmıştır.

Dinamik analiz sonucunda, sonlu elemanlar modelinde her bir elemanda oluşan artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi hesaplanmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

7.4 Sıvılaşma Analizlerinin Sonuçları

Bölüm 5'te detayları verilen model deneylerinin DIANA ile nümerik olarak modellenmesi sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basınçları ile model deneyler sırasında ölçülen artık boşluk suyu basınçları gerçekleştirilen beş seri deney için karşılaştırılarak sonuçları aşağıda verilmiştir.

7.4.1 Birinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Farklı sıklık derecelerinde hazırlanmış (%40, %50, %60 ve %72 rölatif sıklıklarda) uniform kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde dinamik yüklemeler etkisi altında davranışının incelenmesi amacı ile gerçekleştirilen birinci seri deneyler DIANA sonlu

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %40)	0	0	0	0	0	0	34	29.60	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.221	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.665	0.72	6975	18190	18195							
	0.125	1.108	0.72	9005	23483	23490							
	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794							
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	433.01	43313							

Çizelge 7.2 U2 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%50)	0	0	0	0	0	0	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.025	0.238	0.705	4299	11210	11213							
	0.075	0.714	0.705	7446	19417	19422							
	0.125	1.19	0.705	9612	25067	25074							
	0.175	1.666	0.705	11373	29660	29668							
	0.225	2.142	0.705	12896	33631	33640							
	0.275	2.618	0.705	14257	37180	37191							
	0.325	3.094	0.705	15499	40419	40431							
	0.375	3.57	0.705	16649	43417	43430							
	0.425	4.046	0.705	17724	46221	46234							

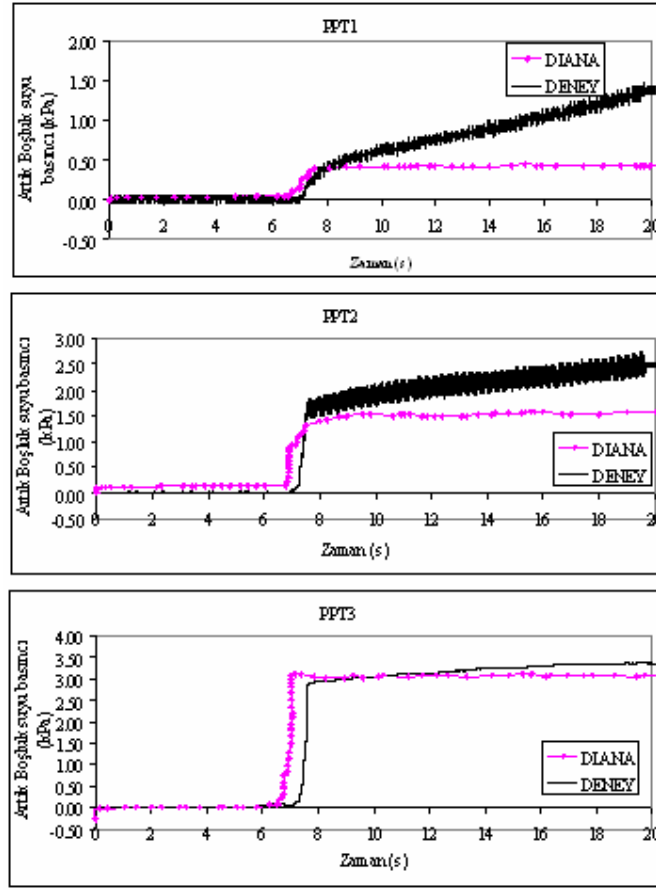
Çizelge 7.3 U3 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_r (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%60)	0	0	0	0	0	0	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.025	0.242	0.67	4642	12105	12109							
	0.075	0.727	0.67	8040	20967	20973							
	0.125	1.211	0.67	10380	27068	27076							
	0.175	1.696	0.67	12281	32028	32037							
	0.225	2.180	0.67	13926	36316	36326							
	0.275	2.665	0.67	15395	40149	40160							
	0.325	3.149	0.67	16737	43646	43659							
	0.375	3.634	0.67	17978	46884	46897							
	0.425	4.118	0.67	19139	49912	49926							

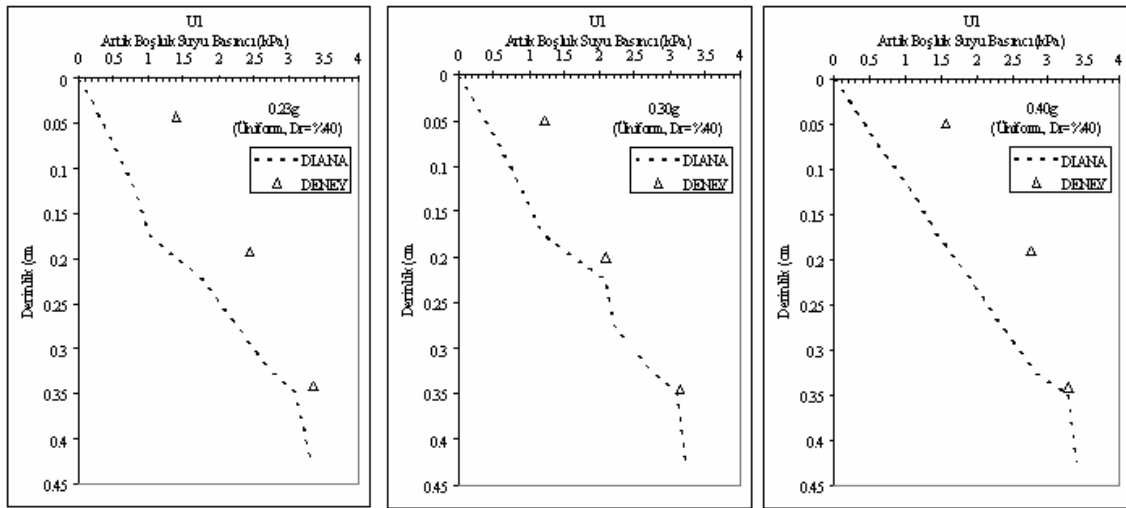
Çizelge 7.4 U4 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%72)	0	0	0	0	0	0	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.025	0.249	0.625	5131	15393	13385							
	0.075	0.747	0.625	8887	26661	23183							
	0.125	1.245	0.625	11473	34420	29929							
	0.175	1.743	0.625	13575	40726	35412							
	0.225	2.241	0.625	15393	46179	40154							
	0.275	2.739	0.625	17018	51053	44392							
	0.325	3.237	0.625	18500	55500	48259							
	0.375	3.735	0.625	19872	59617	51838							
	0.425	4.233	0.625	21156	63467	55186							

Şekil 7.2’de %40 rölatif sıkılıkta uniform kum kolonunun 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri, Şekil 7.3’de ise 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiş, diğer deneyler (U1, U2, U3 ve U4) için sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ve deneysel ölçümler ise Ekler bölümü’nde Şekil Ek 3.1- Şekil Ek 3.11’de ve maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri ise Şekil Ek 4.1- Şekil Ek 4.3’de verilmiştir.



Şekil 7.2 U1-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.3 $D_r = 40\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

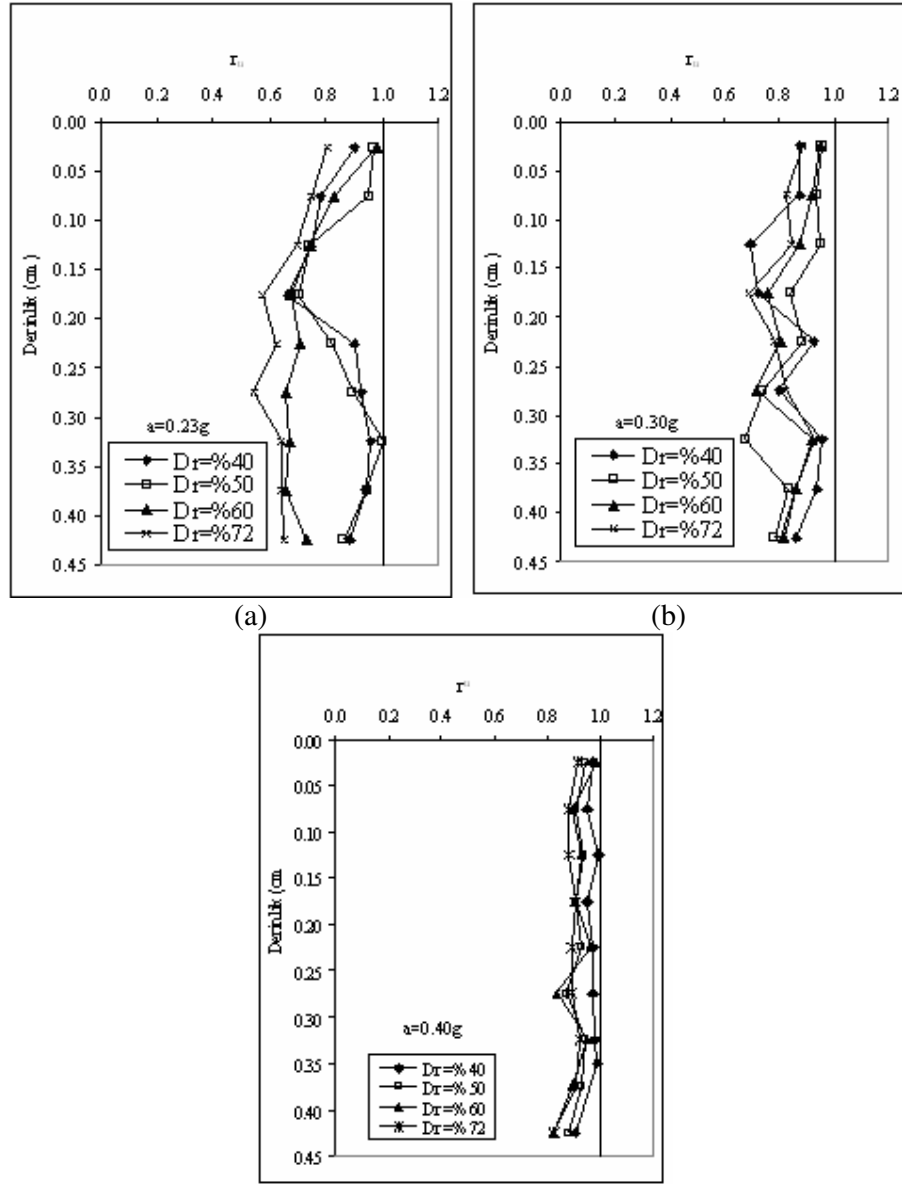
Nümerik analiz sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişim grafikleri ve derinlikle değişim grafikleri incelendiğinde, parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. En üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikte bazı modellerde deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun nedeninin, muhtemelen bu derinlikteki sensörün yüzeye çok yakın olmasından ve kum kolonlarının hazırlanması sırasında üst tabakanın daha gevşek kalmasından, ya da boşluk suyunun zemin yüzeyine doğru hareketi sırasında bu noktalarda yüksek artık boşluk suyu basınçları oluşmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, 0.23g sarsıntı şiddetinde %60 rölatif sıklıkta kum kolonu üzerinde yapılan U3-A model deneyinin nümerik analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumlu olmadığı görülmektedir.

7.4.2 Birinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

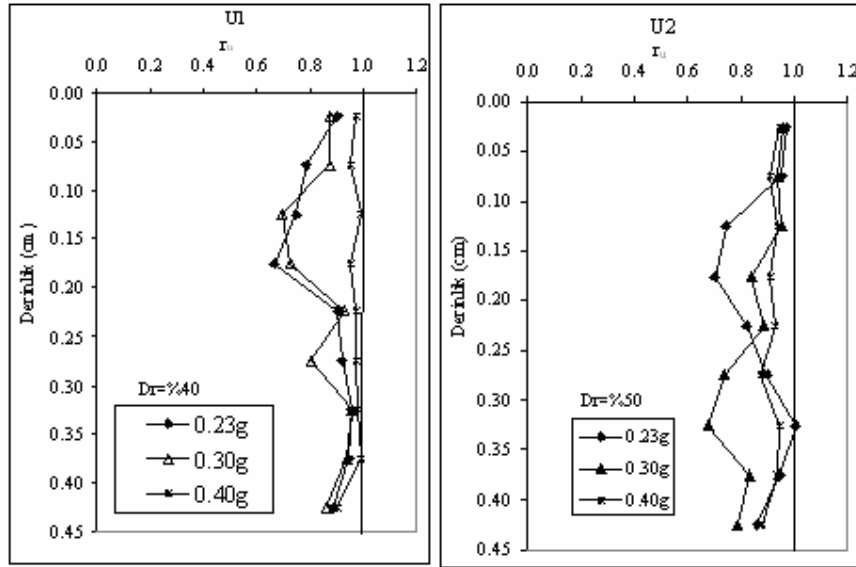
Farklı sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliğine sahip dinamik yüklemelere maruz bırakıldığı birinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen model deneylerin nümerik analizlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu oranlarının uygulanan ivme genlikleri ve kumun rölatif sıklığı ile olan değişimleri Şekil 7.4’de gösterilmiştir.

Şekil 7.4’de gösterilen nümerik analiz sonuçlarından, aynı sarsıntı şiddeti uygulanan farklı sıklıklardaki üniform kum kolonlarında oluşan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının, genel olarak kumun sıklık derecesi arttıkça azaldığı, ancak birbirine yakın sıklıkta olanlarda ($D_r = \%40$ ve $\%50$ ile $\%60$ ve $\%72$) yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Diğer taraftan yüksek sarsıntı etkisinde (0.40g) bütün sıklık derecelerinde oluşması hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının birbirine yakın ve sıvılaşmaya yol açacak mertebelerde olduğu gözlenmektedir.

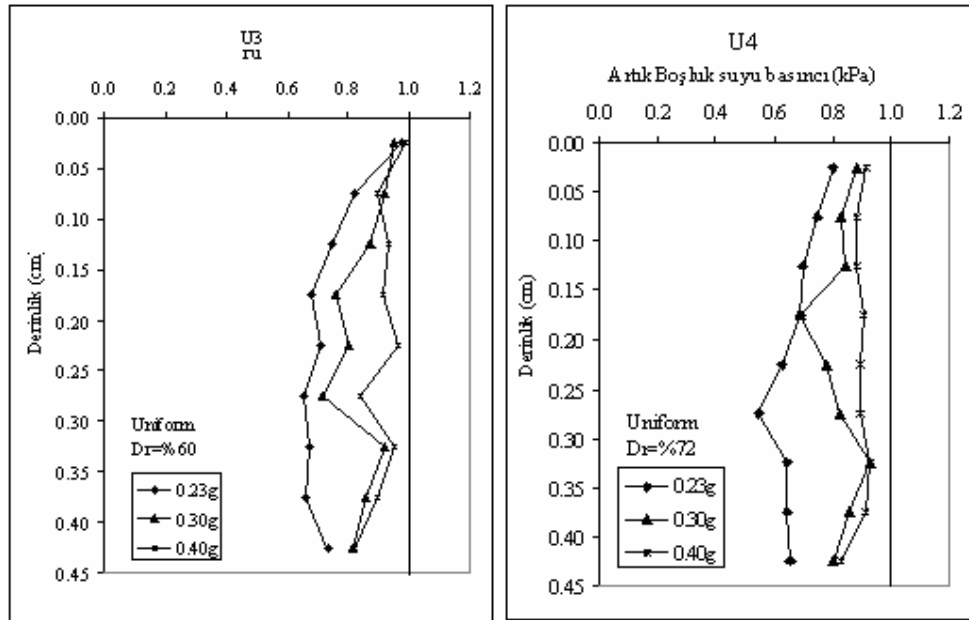
Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da dört farklı sıklıktaki üniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının uygulanan ivme genlikleri ile olan değişimi gösterilmektedir.



Şekil 7.4 Farklı rölatif sıkılıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında farklı ivme genliklerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 7.5 %40 ve %50 rölatif sıkılıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi



Şekil 7.6 %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

Grafiklerden aynı rölatif sıkılıktaki uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının artan titreşim ivme genliği ile birlikte arttığı,

bununla birlikte sadece 45cm yüksekliğinde olan kum kolonlarında efektif gerilme seviyesinin düşük olmasından dolayı, maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle çok fazla değişmediği görülmektedir. Ayrıca, $Dr=40\%$, $Dr=50\%$ ve $Dr=60\%$ olan orta sıkı kum kolonlarında uygulanan her üç ivme genliğinde titreşimler etkisinde derinlik boyunca $r_u=0.8-1.0$ arasında değerlere ulaşırken, $Dr=72\%$ sıklıkta kum kolonlarında $0.23g$ genliğinde titreşimde $r_u \leq 0.80$ olurken, $0.30g$ ve $0.40g$ genliğinde titreşimler etkisinde dahi $r_u \leq 0.90$ olmaktadır.

7.4.3 İkinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

İkinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kum tabakaları içinde silt ara tabakaları bulunmasının kum tabakalarının dinamik davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılabilmesi amacı ile yapılan, ince bir silt ara tabakası içeren farklı sıklıklarda hazırlanmış kum kolonları model deneylerinin dinamik davranış analizleri yapılarak, sonuçları deneysel sonuçlar ile birlikte aşağıda özetlenmiştir.

İkinci seri deneyler kapsamında yapılan L1,L2, L3, L4, L5, L6 ve L7 modelleri için sonlu elemanlar modelinde kum tabakası ve silt tabakası için kullanılan rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai malzeme parametreleri sırası ile Çizelge 7.5, Çizelge 7.6, Çizelge 7.7, Çizelge 7.8, Çizelge 7.9, Çizelge 7.10 ve Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Çizelge 7.5 L1 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	$\sigma_{vo'}$ (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%40)	0	0	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.221	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.665	0.72	6975	18190	18195							
	0.12	1.063	0.72	8823	23009	23015							
SİLT	0.145	1.332	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%40)	0.175	1.550	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.878	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.322	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

Çizelge 7.6 L2 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	Z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %50)	0	0	0	0	0	0	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.025	0.238	0.705	4299	11210	11213							
	0.075	0.714	0.705	7446	19417	19422							
	0.12	1.142	0.705	9418	24561	24567							
SİLT	0.145	1.332	0.72	10172	26526	26533	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr= %50)	0.175	1.666	0.705	11373	29660	29668	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.225	2.142	0.705	12896	33631	33640							
	0.275	2.618	0.705	14257	37180	37191							
	0.325	3.094	0.705	15499	40419	40431							
	0.375	3.570	0.705	16649	43417	43430							
	0.425	4.046	0.705	17724	46221	46234							

Çizelge 7.7 L3 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	Z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_r (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %60)	0	0.000	0	0	0	0	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.025	0.242	0.67	4642	12105	12109							
	0.075	0.727	0.67	8040	20967	20973							
	0.12	1.163	0.67	10170	26521	26529							
SİLT	0.145	1.333	0.72	10172	26526	26533	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr= %60)	0.175	1.696	0.67	12281	32028	32037	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.225	2.180	0.67	13926	36316	36326							
	0.275	2.665	0.67	15395	40149	40160							
	0.325	3.149	0.67	16737	43646	43659							
	0.375	3.634	0.67	17978	46884	46897							
	0.425	4.118	0.67	19139	49912	49926							

Çizelge 7.8 L4 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	Z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %72)	0	0	0	0	0	0	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.025	0.249	0.625	5131	13381	13385							
	0.075	0.747	0.625	8887	23176	23183							
	0.12	1.195	0.625	11241	29316	29324							
SİLT	0.145	1.3325	0.72	10172	26526	26533	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr= %72)	0.175	1.743	0.625	13575	35402	35412	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.225	2.241	0.625	15393	40142	40154							
	0.275	2.739	0.625	17018	44379	44392							
	0.325	3.237	0.625	18500	48245	48259							
	0.375	3.735	0.625	19872	51824	51838							
	0.425	4.233	0.625	21156	55171	55186							

Çizelge 7.9 L5 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	Z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_r (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%40)	0	0.000	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.222	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.665	0.72	6975	18190	18195							
	0.12	1.063	0.72	8823	23009	23015							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%50)	0.175	1.666	0.705	11373	29660	29668	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.225	2.142	0.705	12896	33631	33640							
	0.275	2.618	0.705	14257	37180	37191							
	0.325	3.094	0.705	15499	40419	40431							
	0.375	3.570	0.705	16649	43417	43430							
	0.425	4.046	0.705	17724	46221	46234							

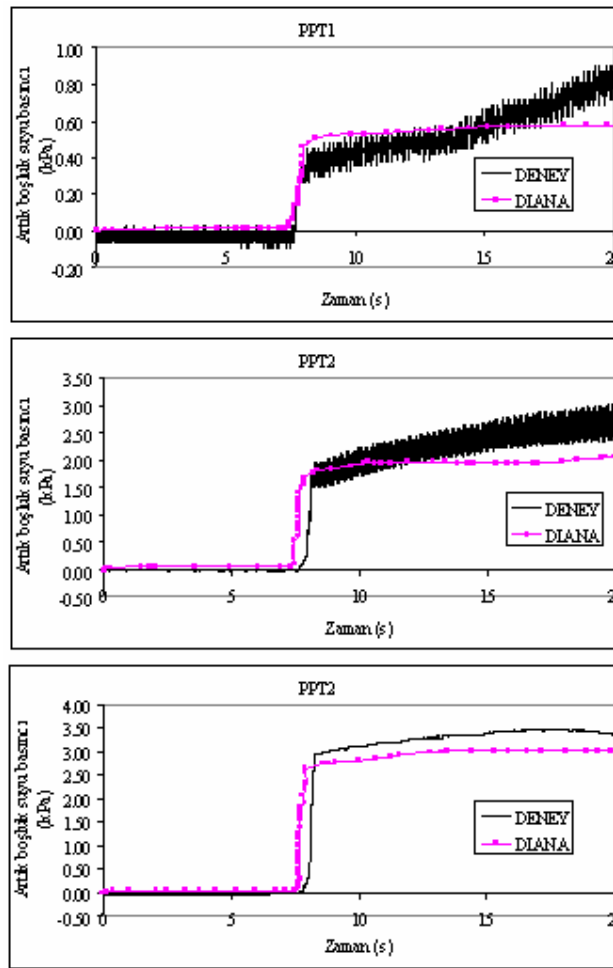
Çizelge 7.10 L6 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %40)	0	0.000	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.222	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.665	0.72	6975	18190	18195							
	0.12	1.063	0.72	8823	23009	23015							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr= %60)	0.175	1.696	0.67	12281	32028	32037	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.225	2.180	0.67	13926	36316	36326							
	0.275	2.665	0.67	15395	40149	40160							
	0.325	3.149	0.67	16737	43646	43659							
	0.375	3.634	0.67	17978	46884	46897							
	0.425	4.118	0.67	19139	49912	49926							

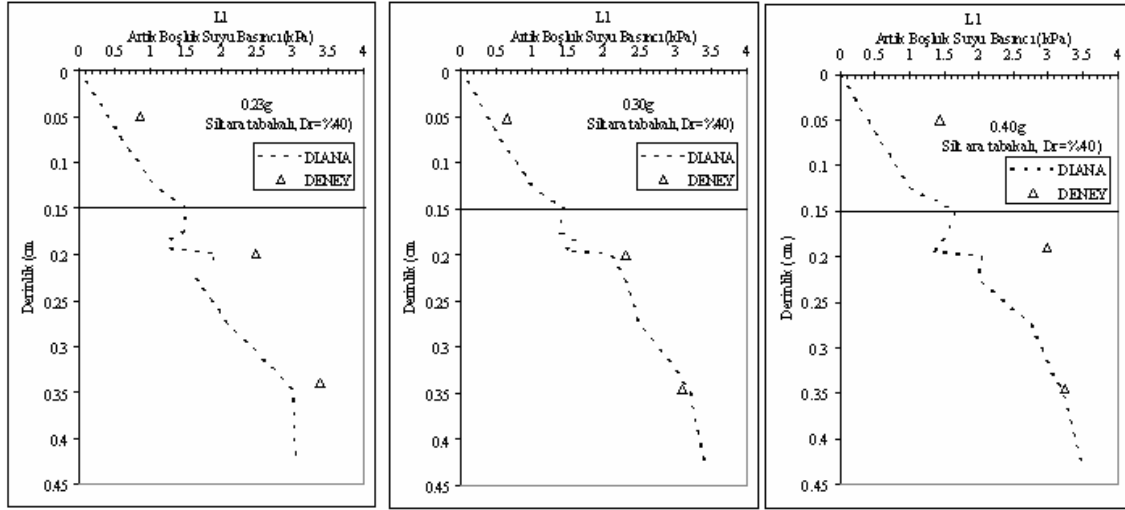
Çizelge 7.11 L7 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%40)	0	0.000	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.222	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.665	0.72	6975	18190	18195							
	0.12	1.063	0.72	8823	23009	23015							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%72)	0.175	1.743	0.625	13575	35402	35412	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.225	2.241	0.625	15393	40142	40154							
	0.275	2.739	0.625	17018	44379	44392							
	0.325	3.237	0.625	18500	48245	48259							
	0.375	3.735	0.625	19872	51824	51838							
	0.425	4.233	0.625	21156	55171	55186							

Şekil 7.7’de ve Şekil 7.8’de sırası ile %40 rölatif sıkılıkta hazırlanmış silt ara tabakalı kum kolonunun 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının nümerik analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ve 0.23g, 0.30g 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri deneysel sonuçlar ile birlikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiş, diğer deneyler (L1, L2, L3, L4,L5, L6 ve L7) için sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar ise deneysel sonuçlar ile birlikte Ekler bölümü’nde Şekil Ek 3.12-Şekil Ek 3.31’de ve Şekil Ek 4.4-Şekil Ek 4.9’da verilmiştir.



Şekil 7.7 %40 rölatif sıkılıkta silt ara tabakalı üniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



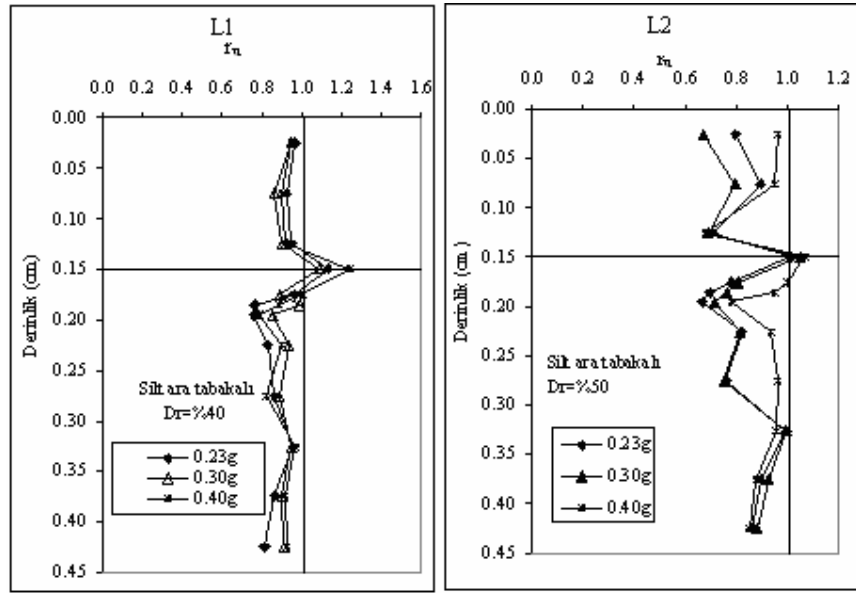
Şekil 7.8 %40 rölatif sıkılıkta silt ara tabakalı üniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

Nümerik analiz sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişim grafikleri incelendiğinde, parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. En üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikte bazı modellerde (L1-C, L2-C, L3-C, L5-C, L6-C) deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının iyi uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun olası nedenleri arasında bu derinlikteki sensörün yüzeye çok yakın olması ve kum kolonlarının hazırlanması sırasında üst tabakanın daha gevşek kalması veya deney sırasında bu noktalarda zemin yüzeyine doğru oluşan boşluk suyu hareketinden kaynaklanan artık boşluk suyu basınçlarının bünye modelinde modellenememiş olmasının yer alabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, 0.23g sarsıntı şiddetinde %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda homojen kum kolonları üzerinde yapılan silt ara tabakalı L3-A ve L4-A model deneylerinde ve silt tabakası altındaki kumun sıkılık derecesinin %60 olduğu L6-A ve %72 olduğu L7-A tabakalı kum model deneylerinde bazı derinliklerde nümerik analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile çok iyi uyumlu olmadığı görülmektedir.

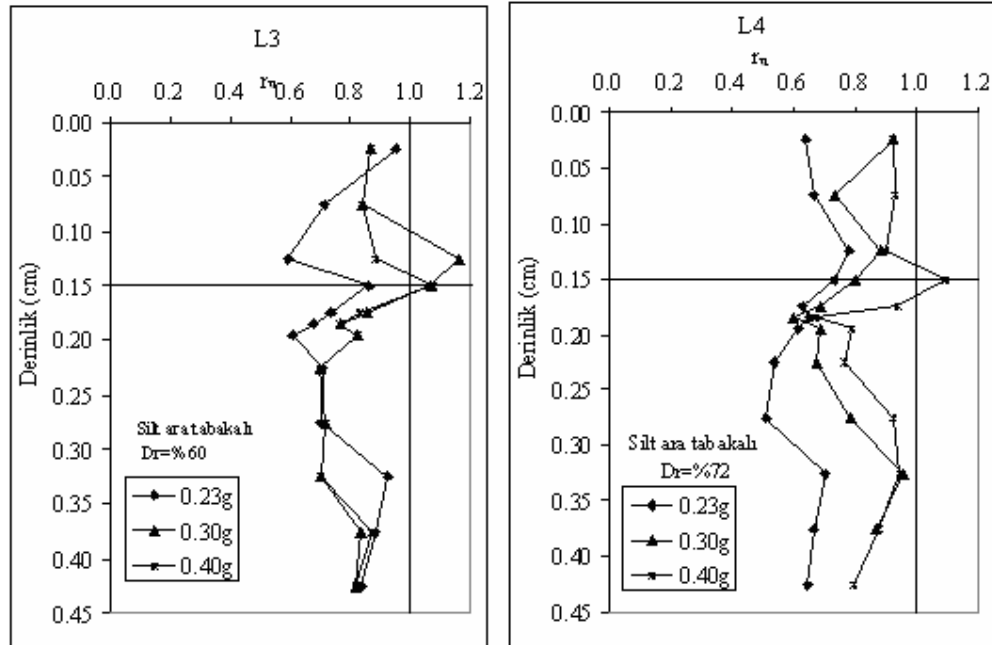
7.4.4 İkinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

İkinci seri deneyler kapsamında silt ara tabakası içeren homojen kum kolonları ve silt ara tabakası altında ve üstünde farklı sıkılıkta tabakalardan oluşan kum kolonları üzerinde gerçekleştirilen model deneylerin nümerik analizlerinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı

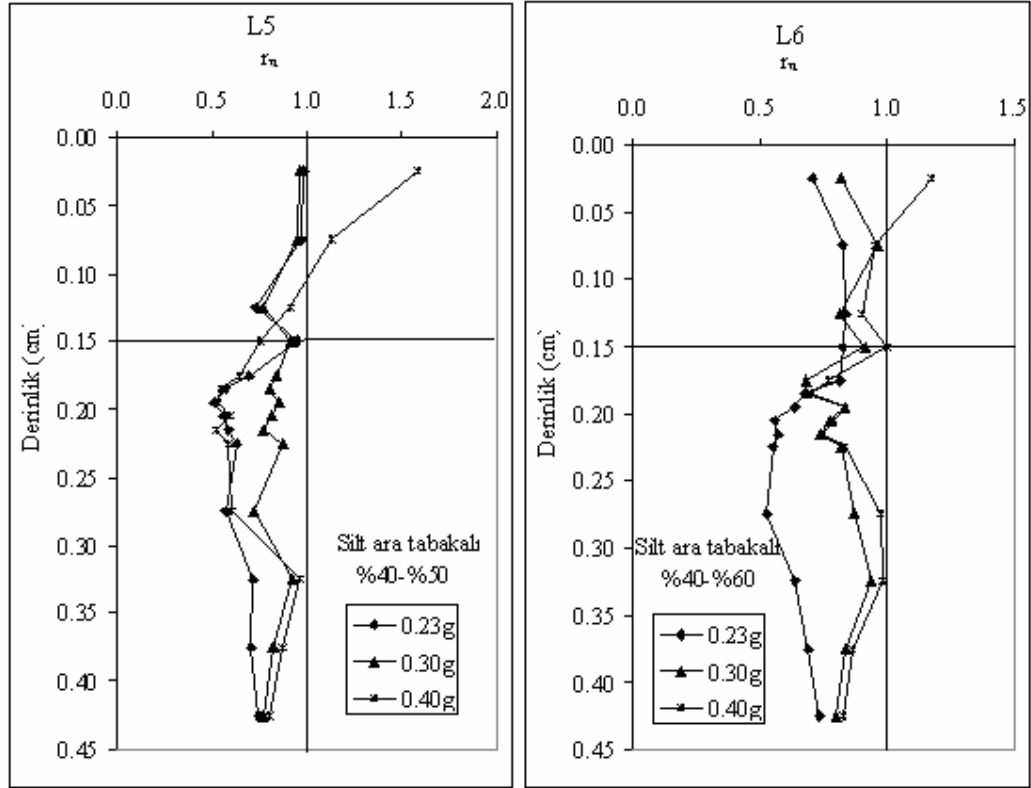
oranlarının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri, silt tabakası altında ve üstünde aynı sıklıkta kum olması durumu için Şekil 7.9'da, silt tabakası altında farklı sıklıklarda kum olması durumları için ise Şekil 7.10'da gösterilmiştir.



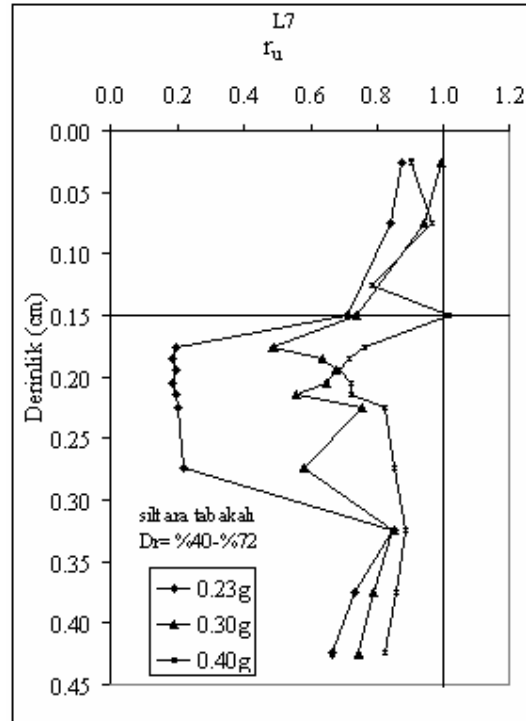
Şekil 7.9a %40 ve %50 rölatif sıklıklarda silt ara tabakalı üniform kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi



Şekil 7.9b. %60 ve %72 rölatif sıklıklarda silt ara tabakalı üniform kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi



Şekil 7.10a. L5 ve L6 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 7.10b. Uniform sıklıkta (D_r =%72) kum modellerinin nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

Şekil 7.9’da gösterilen grafiklerden, silt ara tabakasının olduğu seviyede belirgin bir boşluk suyu basıncı artışı olduğu görülürken, $D_r=40$ ve $D_r=50$ olan homojen kum kolonlarında artan ivme şiddeti ile birlikte daha büyük boşluk suyu basınçları oluşmasına karşın, sarsıntı şiddetinin etkisinin çok belirgin olmadığı ve uygulanan bütün sarsıntı şiddetlerinde $r_u=0.80-1.00$ arasında değerlere ulaşıldığı görülmektedir. $D_r=60$ ve $D_r=72$ olan silt ara tabakalı kum kolonlarında da silt tabakasının etkisi belirgin olarak gözlenirken, artık boşluk suyu basınçları üzerinde ivme genliğinin etkisi daha açık olarak görülmektedir. Ayrıca, bu daha sıkı kum kolonlarında silt ara tabakası üzerindeki kesimde hesaplanan artık boşluk suyu basınçları sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ($r_u= 0.8-1.0$) ulaşırken, alt kesimlerde ise daha düşük kaldığı gözlenmektedir.

Şekil 7.10’da gösterilen grafiklerden ise, silt ara tabakası üzerinde $D_r=40$, altında daha sıkı ($D_r=50$, $D_r=60$, $D_r=72$) yerleşimde olan kum kolonlarında, silt tabakası üzerindeki kesimde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının alt tabakanın sıklık derecesinden çok etkilenmediği ve uygulanan şiddette sarsıntılar etkisinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelerde ($r_u= 0.8-1.0$) boşluk suyu basınçları ortaya çıkacağı görülmektedir. Silt tabakası altındaki kesimde ise sarsıntı şiddeti arttıkça daha yüksek artık boşluk suyu basınçları oluştuğu, kumun sıklık derecesi arttıkça da oluşan artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı görülmektedir.

7.4.5 Üçüncü seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Altta yer alan kum tabakasının üst tabakaya göre daha sıkı olduğu durumlardaki “tabakalı kum” kolonlarının dinamik yükleme altındaki davranışının incelenmesi için gerçekleştirilen model deneylerin dinamik davranışı nümerik olarak analiz edilerek, elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile birlikte aşağıda özetlenmiştir. Üçüncü seri deneyler kapsamında yapılan L8, L9 ve L10 modelleri için sonlu elemanlar modelinde kum tabakası için kullanılan rijitlik parametrelerinin derinlikle değişimleri ve Towhata-Iai malzeme parametreleri sırası ile Çizelge 7.12, Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14’de verilmiştir.

Çizelge 7.12 L8 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %40)	0	0	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.2215	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.6645	0.72	6975	18190	18195							
	0.125	1.1075	0.72	9005	23483	23490							
KUM (Dr= %50)	0.175	1.666	0.705	11373	29660	29668	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.225	2.142	0.705	12896	33631	33640							
	0.275	2.618	0.705	14257	37180	37191							
	0.325	3.094	0.705	15499	40419	40431							
	0.375	3.57	0.705	16649	43417	43430							
	0.425	4.046	0.705	17724	46221	46234							

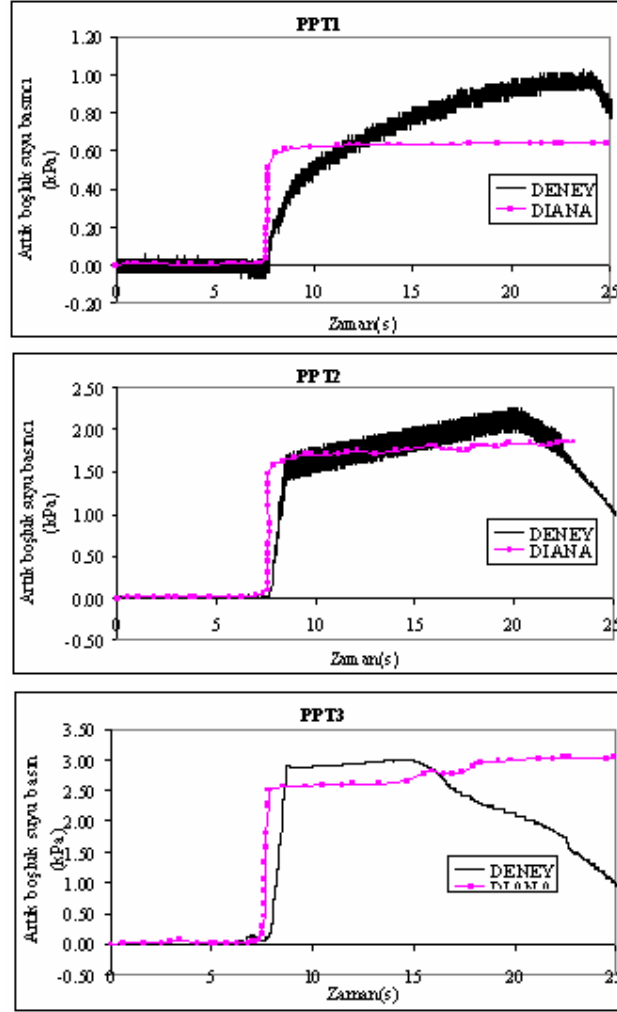
Çizelge 7.13 L9 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %40)	0	0	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.2215	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.6645	0.72	6975	18190	18195							
	0.125	1.1075	0.72	9005	23483	23490							
KUM (Dr= %60)	0.175	1.69575	0.67	12281	32028	32037	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.225	2.18025	0.67	13926	36316	36326							
	0.275	2.66475	0.67	15395	40149	40160							
	0.325	3.14925	0.67	16737	43646	43659							
	0.375	3.63375	0.67	17978	46884	46897							
	0.425	4.11825	0.67	19139	49912	49926							

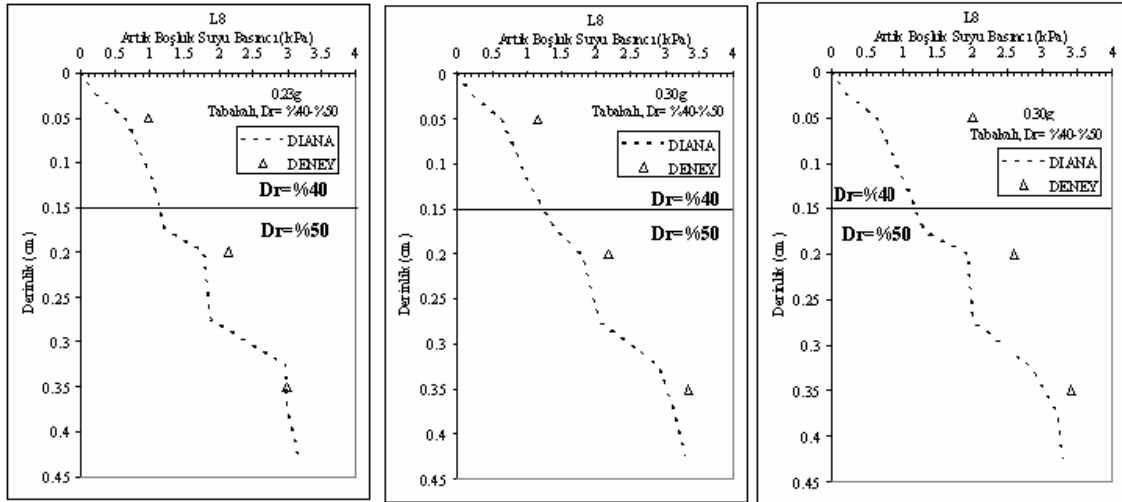
Çizelge 7.14 L10 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %40)	0	0	0	0	0	0	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.025	0.2215	0.72	4027	10502	10505							
	0.075	0.6645	0.72	6975	18190	18195							
	0.125	1.1075	0.72	9005	23483	23490							
KUM (Dr= %72)	0.175	1.743	0.625	13575	35402	35412	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.225	2.241	0.625	15393	40142	40154							
	0.275	2.739	0.625	17018	44379	44392							
	0.325	3.237	0.625	18500	48245	48259							
	0.375	3.735	0.625	19872	51824	51838							
	0.425	4.233	0.625	21156	55171	55186							

Şekil 7.11’de üst tabakanın %40 ve alt tabakanın %50 rölatif sıkılıkta olduğu iki tabakalı kum kolonunun 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri, Şekil 7.12’de ise 0.23g, 0.30g ve 0.40g sarsıntı şiddetlerinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak gösterilmiş, diğer deneyler (L8, L9 ve L10) için sonlu elemanlar analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimleri ise deneysel sonuçlar ile birlikte Ekler bölümü’nde Şekil Ek 3.32-Şekil Ek 3.39’de ve Şekil Ek 4.10-Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 7.11 Tabakalı kum ($D_r=\%40-\%50$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

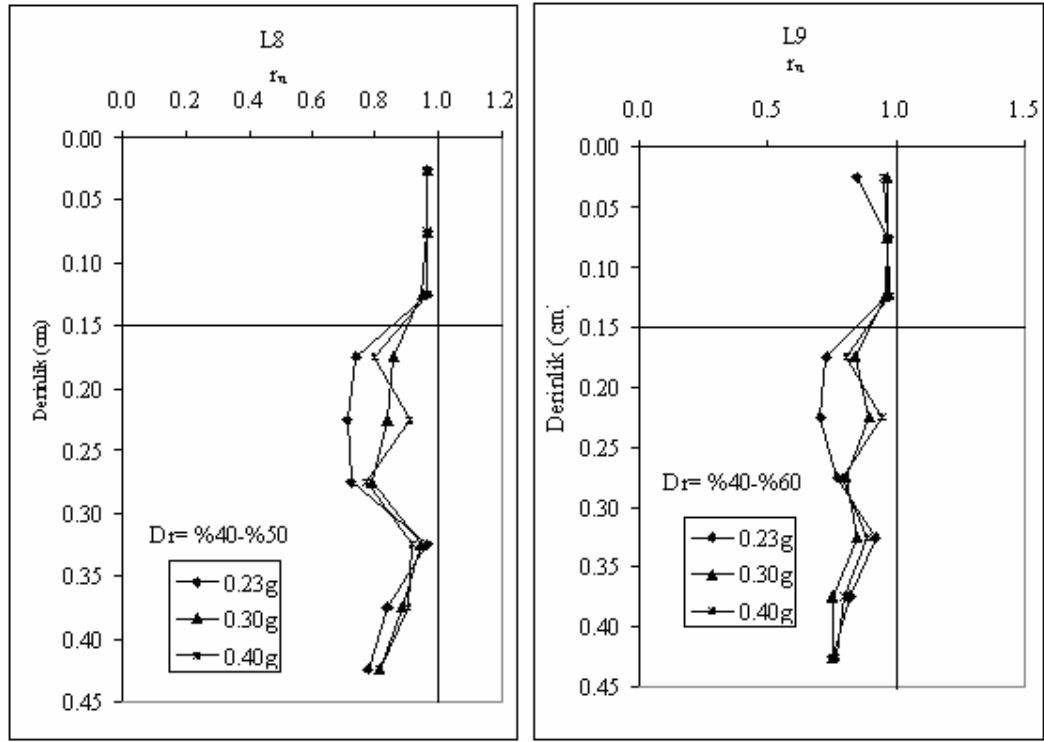


Şekil 7.12 Tabakalı kum model deneylerinin ($D_r=\%40-\%50$) nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

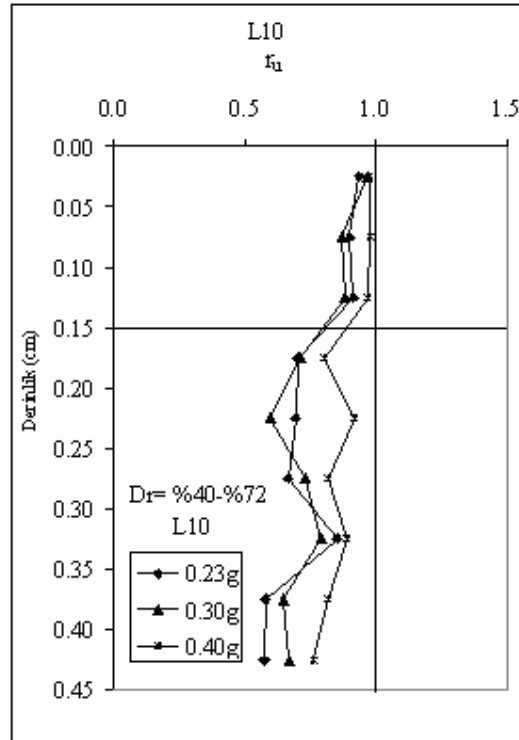
Nümerik analiz sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman ve maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişim grafikleri incelendiğinde, parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. En üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikte bazı modellerde (L8-A, L8-B, L9-C) deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun sensörün yüzeye çok yakın daha gevşek kum tabakası içinde olmasından veya deney sırasında zemin yüzeyine doğru boşluk suyu hareketinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Alt tabakanın %72 rölatif sıklıklarda olduğu L10-A ve L10-B model deneylerinde bazı derinliklerde nümerik analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile iyi uyumlu olmadığı görülmektedir.

7.4.6 Üçüncü seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası altında daha sıkı kum tabakasının yer aldığı durumları modellemek için gerçekleştirilen üçüncü seri model deneylerin nümerik analizlerinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri Şekil 7.13’de gösterilmiştir. Üstte yer alan %40 rölatif sıklıktaki tabakada oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının bütün sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaştığı alt tabakanın sıklık derecesinden pek fazla etkilenmediği görülmektedir. Gevşek tabaka altında yer alan daha sıkı kum tabakasında ise artık boşluk suyu basınçlarının genel olarak uygulanan titreşimlerin genliği ile birlikte arttığı, kumun sıklık derecesi arttıkça ise azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.13a. L8 ve L9 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 7.13b. L10 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

7.4.7 Dördüncü seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı bir kum tabakasının dinamik yükleme sırasındaki davranışını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen dördüncü seri model deneylerin dinamik davranışı nümerik olarak analiz edilerek sonuçları aşağıda deneysel sonuçlar ile birlikte sunulmuştur.

Dördüncü seri deneyler kapsamında yapılan L11, L12 ve L13 modelleri için sonlu elemanlar modelinde kum tabakası için kullanılan rijitlik parametrelerinin derinlikle değişimleri ve Towhata-Iai malzeme parametreleri sırası ile Çizelge 7.15, Çizelge 7.16 ve Çizelge 7.17’de verilmiştir.

Çizelge 7.15 L11 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G _{ref} (kPa)	K _{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S ₁	W ₁	P ₁	P ₂	C ₁
KUM (Dr= %50)	0	0	0	0	0	0	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.025	0.238	0.705	4299	11210	11213							
	0.075	0.714	0.705	7446	19417	19422							
	0.125	1.190	0.705	9612	25067	25074							
KUM (Dr= %40)	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

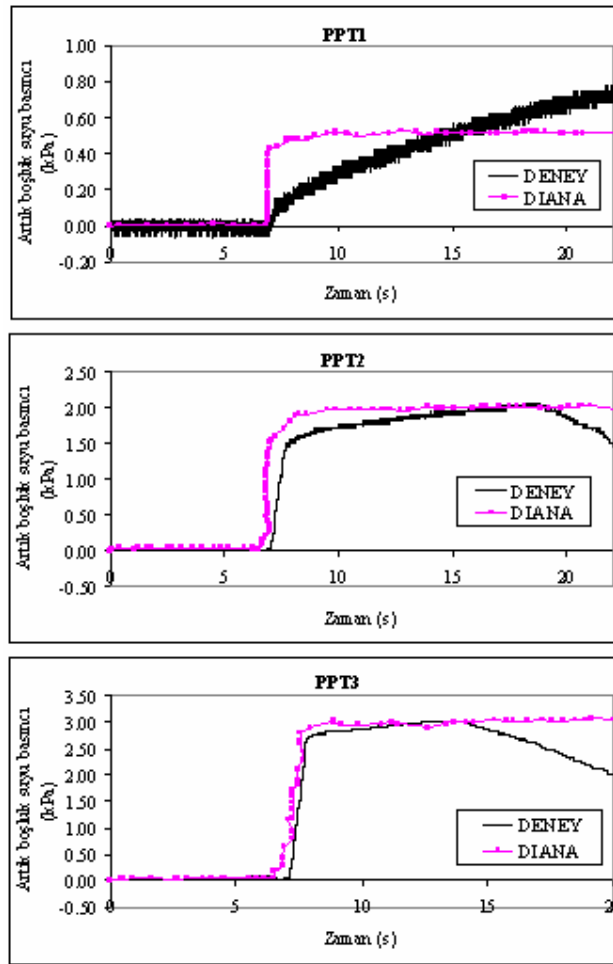
Çizelge 7.16 L12 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	Z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr= %60)	0	0	0	0	0	0	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.025	0.24225	0.67	4642	12105	12109							
	0.075	0.72675	0.67	8040	20967	20973							
	0.125	1.21125	0.67	10380	27068	27076							
KUM (Dr= %40)	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

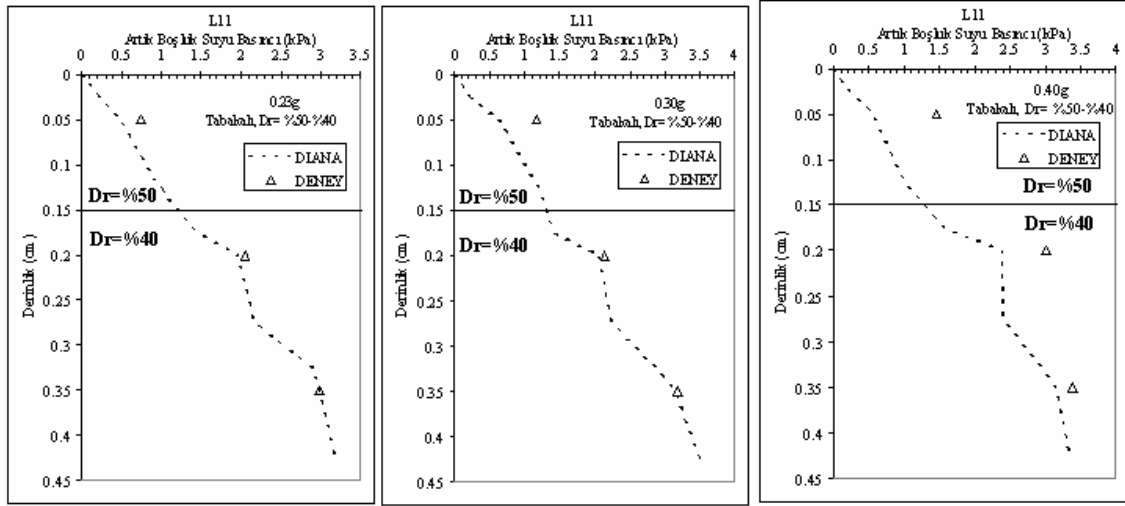
Çizelge 7.17 L13 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

[illegible]

Alt tabakanın %40 ve üst tabakanın %50 rölatif sıkılıkta olduğu iki tabakalı kum kolonunun (L11-A) 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 7.14’de, 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ise Şekil 7.15’de gösterilmiştir. Diğer deneyler için sonlu elemanlar analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri deneysel sonuçlar ile birlikte Ekler bölümü’nde Şekil Ek 3.40-Şekil Ek 3.47’de ve maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimleri ise Şekil Ek 4.12 ve Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 7.14 Tabakalı kum ($D_r = \%50 - \%40$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

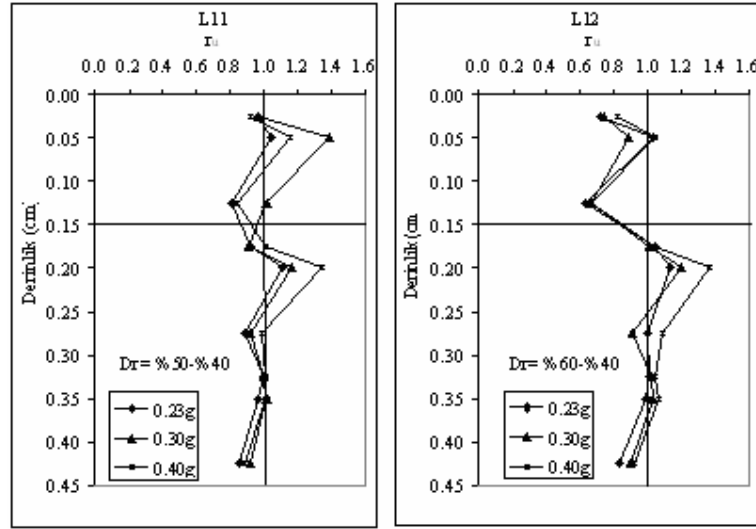


Şekil 7.15 Tabakalı kum ($Dr=\%50-\%40$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

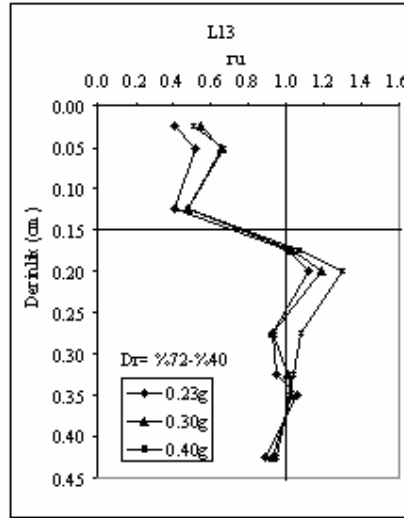
Şekil 7.14’de, Şekil 7.15’de ve Ekler bölümü’nde verilen nümerik analiz sonuçlarından elde edilen artık boşluk suyu basıncı değişim grafikleri incelendiğinde, parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. En üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikte bazı modellerde (L11-A, L11-B, L11-C, L12-C, L13-C) deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun sensörün yüzeye çok yakın, daha gevşek kum tabakası içinde olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

7.4.8 Dördüncü seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası üzerinde, daha sıkı kum tabakalarının yer aldığı durumların modellenmesi için gerçekleştirilen “Tabakalı kum” model deneylerinin dinamik davranış analizlerinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri Şekil 7.16’da gösterilmiştir.



Şekil 7.16a. L11 ve L12 model deneylerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 7.16b. L13 model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

Şekil 7.16'da gösterilen grafiklerden ve Şekil 7.5 ile Şekil 7.6'da verilen üniform kum kolonlarının davranışı ile karşılaştırılmasından, üstteki daha sıkı tabakanın mevcudiyetinin alt tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını artırıcı etkisi olduğu, bunun yanında alttaki gevşek tabakanın üstünde yer alan daha sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir. Artık boşluk suyu basınçlarının artan ivme genliği ile genel olarak artan bir eğilimde olduğu da gözlenmektedir.

7.4.9 Beşinci seri deneylerin nümerik analizi ve deney sonuçları ile karşılaştırılması

Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen alt tabakanın üst tabakaya göre daha gevşek olduğu “silt ara tabakalı” kum kolonlarının 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerindeki dinamik davranışı nümerik olarak analiz edilerek sonuçları aşağıda deneysel sonuçlar ile birlikte sunulmuştur.

L14, L15 ve L16 modelleri için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde kum tabakası ve silt tabakası için kullanılan rijitlik parametrelerinin derinlikle değişimleri ve Towhata-Iai malzeme parametreleri sırası ile Çizelge 7.18, Çizelge 7.19 ve Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.18 L14 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S ₁	W ₁	P ₁	P ₂	C ₁
KUM (Dr=%50)	0	0	0	0	0	0	35	31.4	0.0005	4.0	1.0	0.72	1.8
	0.025	0.238	0.705	4299	11210	11213							
	0.075	0.714	0.705	7446	19417	19422							
	0.12	1.142	0.705	9418	24561	24567							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%40)	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

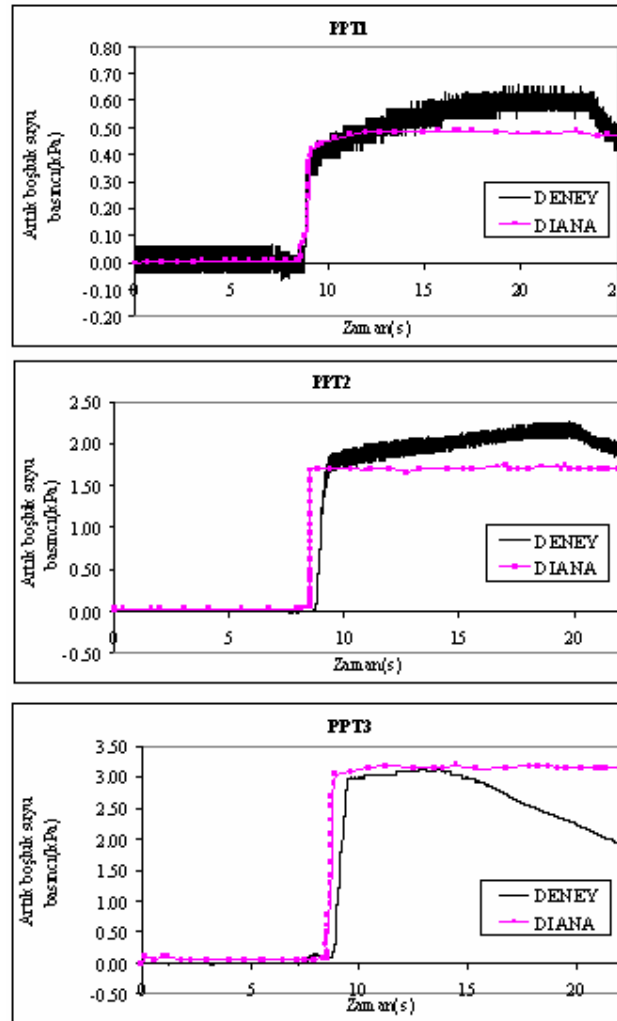
Çizelge 7.19 L15 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G_{ref} (kPa)	K_{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_r (°)	ϕ_p (°)	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
KUM (Dr=%60)	0	0	0	0	0	0	37	33.4	0.0005	5.0	2.0	0.72	1.8
	0.025	0.242	0.67	4642	12105	12109							
	0.075	0.727	0.67	8040	20967	20973							
	0.12	1.163	0.67	10170	26521	26529							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%40)	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

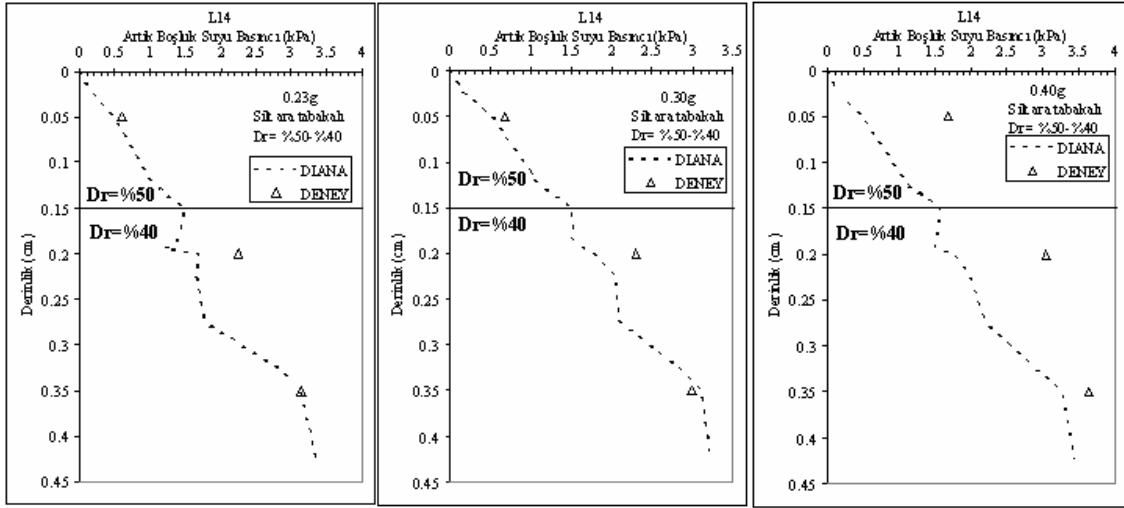
Çizelge 7.20 L16 model deneyleri için rijitlik parametreleri ve Towhata-Iai bünye modeli malzeme parametreleri

Zemin	z (m)	σ_{vo}' (kPa)	e	G _{ref} (kPa)	K _{ref} (kPa)	E (kPa)	ϕ_f (°)	ϕ_p (°)	S ₁	W ₁	P ₁	P ₂	C ₁
KUM (Dr=%72)	0	0	0	0	0	0	39	35	0.0005	15	4.0	0.72	1.8
	0.025	0.249	0.625	5131	13381	13385							
	0.075	0.747	0.625	8887	23176	23183							
	0.12	1.195	0.625	11241	29316	29324							
SİLT	0.145	1.333	0.72	9878	25759	25766	37	33.4	0.0005	30	1.0	4.0	1.8
KUM (Dr=%40)	0.175	1.551	0.72	10655	27786	27794	34	29.6	0.0005	2.0	0.75	0.72	1.8
	0.225	1.994	0.72	12081	31506	31515							
	0.275	2.437	0.72	13356	34831	34841							
	0.325	2.880	0.72	14520	37866	37876							
	0.375	3.323	0.72	15597	40674	40686							
	0.425	3.766	0.72	16604	43301	43313							

Alt tabakanın %40 ve silt ara tabakası üzerindeki tabakanın ise %50 rölatif sıkılıkta olduğu kum kolonunun (L14-A) 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 7.17’de, 0.23g, 0.30g ve 0.40g ivme genliklerinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ise Şekil 7.18’de gösterilmiştir. Beşinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen diğer deneyler için sonlu elemanlar analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri deneysel sonuçlar ile birlikte Ekler bölümü’nde Şekil Ek 3.48-Şekil Ek 3.55’de, maksimum artık boşluk suyu basıncı-derinlik değişimleri ise Şekil Ek 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 7.17 L14-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

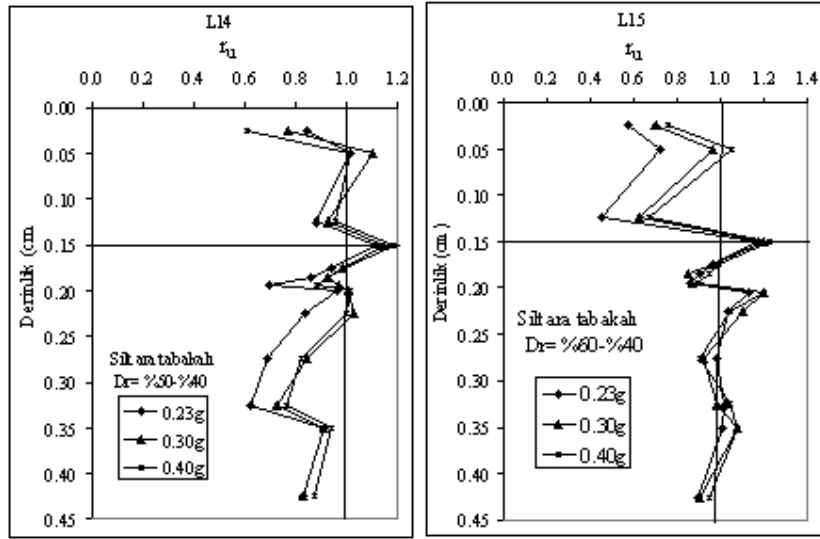


Şekil 7.18 Silt ara tabakalı kum ($Dr=50-40$) model deneylerinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

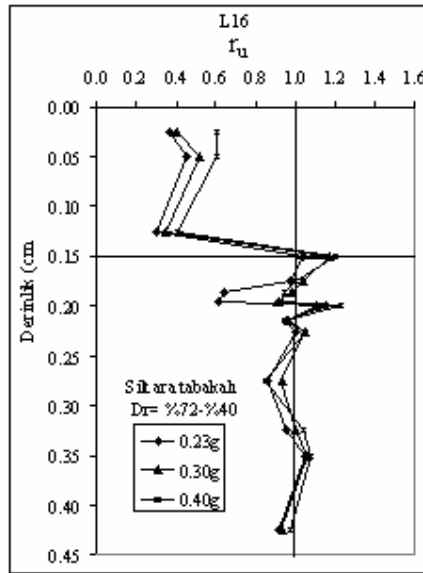
Beşinci seri deneyler kapsamında gerçekleştirilen model deneylerin dinamik davranış analizlerinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman eğrilerinin deneysel ölçümlerden elde edilen davranışla genel olarak uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

7.4.10 Beşinci seri deneylerin nümerik analizinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı bir kum tabakası ve arasında ince bir silt tabakası bulunan tabakalı kum zeminlerin dinamik yükleme sırasındaki davranışını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen beşinci seri deneylerin nümerik analizlerinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri Şekil 7.19'da gösterilmiştir.



Şekil 7.19a. L14 ($Dr=50-40$) ve L15 ($Dr=60-40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 7.19b L16 ($Dr=72-40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

Şekil 7.19'da gösterilen grafiklerden, silt ara tabakasının hemen altında ani bir boşluk suyu basıncı artışı meydana geldiği, alttaki gevşek tabakada oluşan boşluk suyu basınç artışlarının silt tabakasının mevcudiyetinden ve üstteki tabakanın sıkılık derecesinden fazla etkilenmediği gözlenmektedir. Diğer taraftan, sonuçların Şekil 7.16'dakilerle karşılaştırılmasından, silt tabakasının mevcudiyetinin üstteki daha sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları

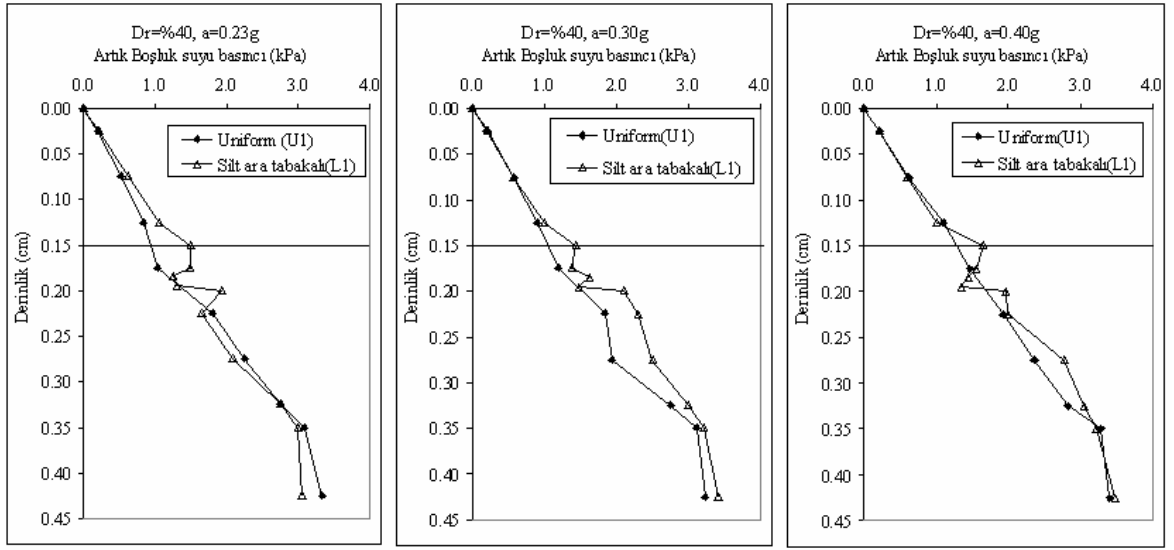
üzerinde belirgin bir azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir. Artan ivme şiddetinin artık boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi ise sıkı kum tabakasından oluşan üst kesimlerde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

7.5 Nümerik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

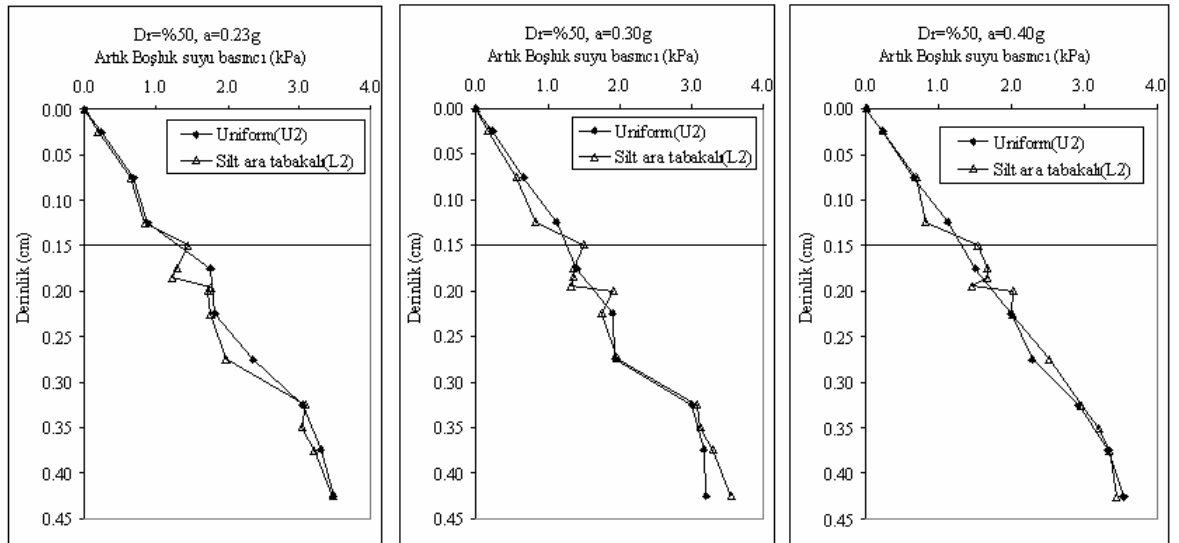
Bu tez çalışması kapsamında suya doymuş tabakalı kum zeminlerin sıvılaşma davranışının araştırılması amacı ile farklı sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonları, iki tabakalı kum kolonları ve silt ara katmanlı kum kolonları üzerinde üç farklı ivme genliğinde dinamik yüklemeler yapılan laboratuvar model deneyleri DIANA sonlu elemanlar programı ile nümerik olarak modellenmiştir. Nümerik modellemelerde Towhata-Iai bünye modeli kullanılmıştır. Beş seri deneyde gerçekleştirilen nümerik analiz sonucunda deneyler sırasında üç farklı derinlikte ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile nümerik analizlerden bu derinliklere karşılık gelen elemanlarda hesaplanmış olan artık boşluk suyu basınçları karşılaştırılmıştır. Dinamik davranış analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel gözlemler ışığında değerlendirilmesi aşağıda özetlenmiştir.

7.5.1 Silt Ara Tabakalı Kum Kolonu Deneylerinin Dinamik Davranış Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

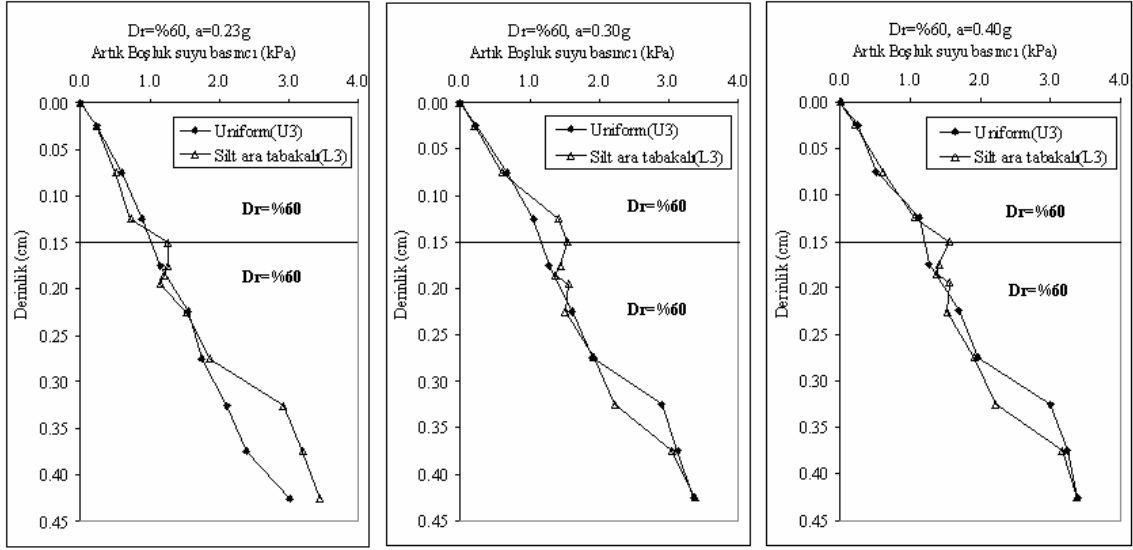
Silt ara tabakalı model deneyler sırasında silt tabakası altında olduğu gözlemlenen su filmi oluşumunu nümerik olarak değerlendirmek amacı ile silt ara tabakalı deneyler için gerçekleştirilen nümerik hesaplamalardan belirlenen artık boşluk suyu basıncı–derinlik değişimleri ile silt ara tabakası olmayan kum model deneylerinin nümerik analizinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri karşılaştırılmıştır. Şekil 7.20’de %40 rölatif sıklık derecesine sahip ve 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetlerinde sarsıntı uygulanan uniform kum model deneylerinin (U1-A, U1-B ve U1-C) dinamik davranış analizinden belirlenen ve aynı sıklık derecesine sahip silt ara tabakalı (L1-A, L1-B ve L1-C) model deneylerinin nümerik analizlerinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı–derinlik değişimleri gösterilmektedir. Uniform kum modelleri ile silt ara tabakalı modellerde farklı sıklıklar ve farklı sarsıntı şiddetleri için yapılan benzer karşılaştırmalar ise %50, %60 ve %72 rölatif sıklık derecelerine sahip model deneyler için sırası ile Şekil 7.21, Şekil 7.22 ve Şekil 7.23’de gösterilmektedir.



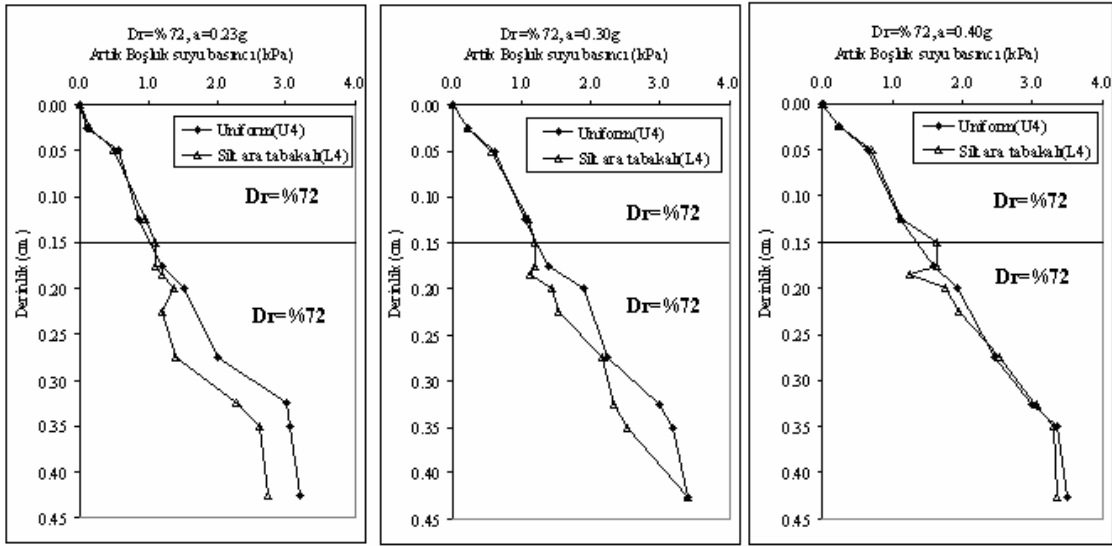
Şekil 7.20 $D_r = 40\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



Şekil 7.21 $D_r = 50\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



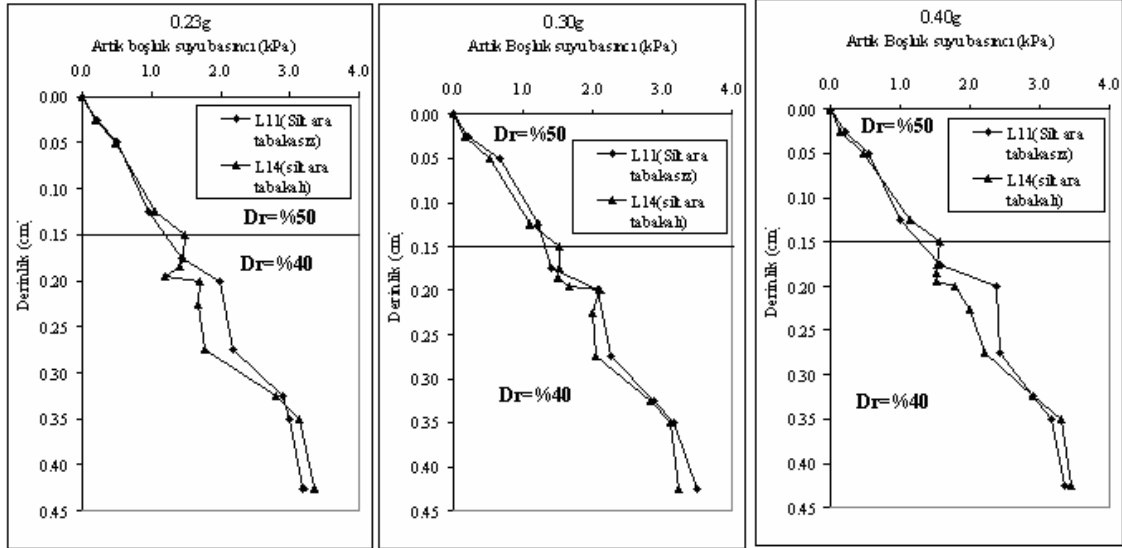
Şekil 7.22 $Dr=60\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



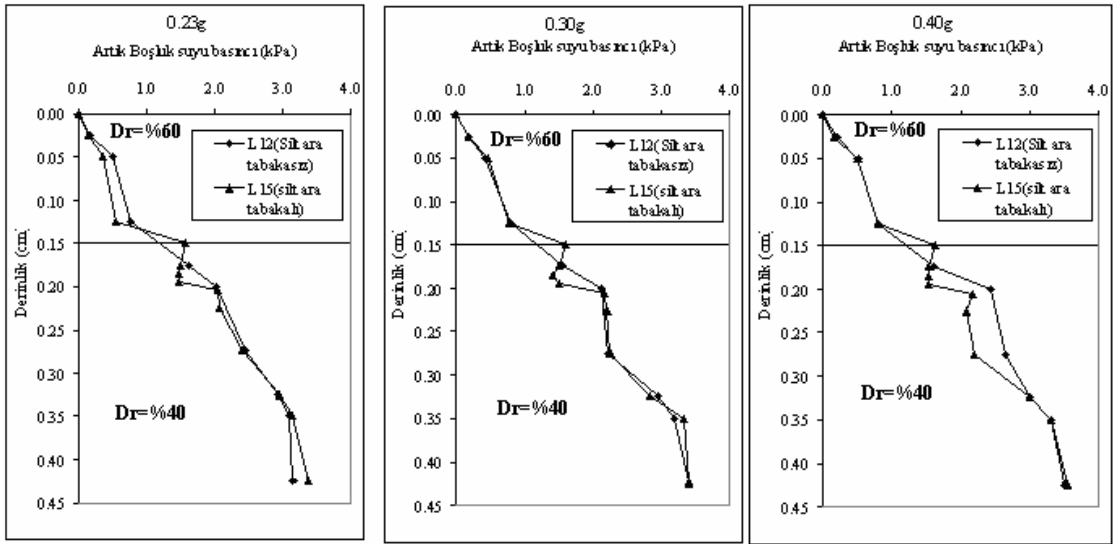
Şekil 7.23 $Dr=72\%$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

Şekillerde verilen grafiklerden görüldüğü gibi uniform kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan artık boşluk suyu basınçları derinlikle düzenli bir şekilde artmakta iken, silt ara tabakalı modellerde silt tabakası altında artık boşluk suyu basıncında genel olarak bir miktar ani artış olduğu görülmektedir. Bu ani artışın büyüklüğünün, gevşek ve orta sıkı kum kolonlarında daha fazla olduğu görülmekte iken, sıkı kum kolonlarında hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının uniform kum kolonlarında aynı derinlikte hesaplanan artık boşluk suyu basıncı değerlerine yakın büyüklükte olduğu görülmektedir.

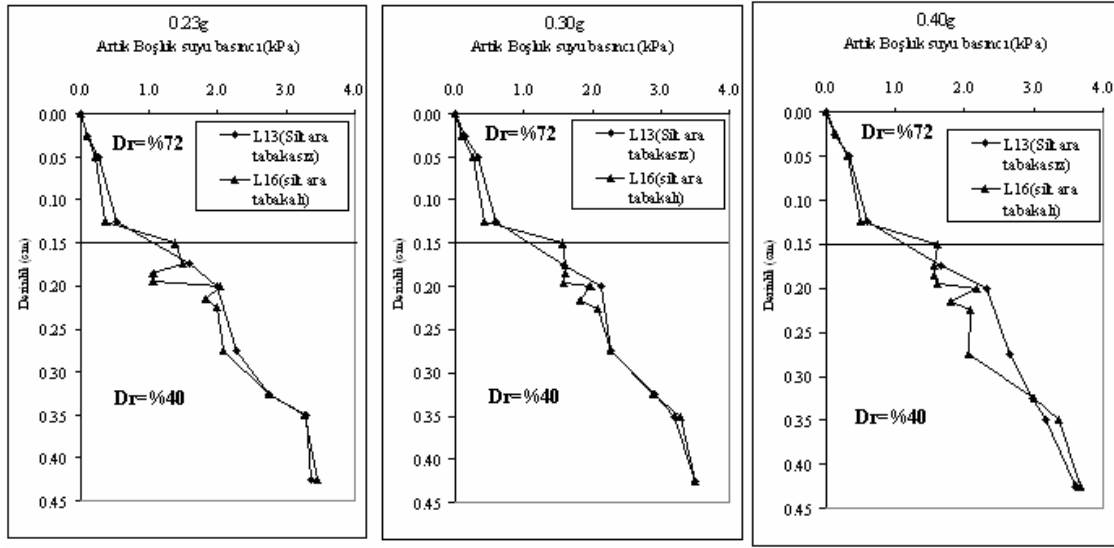
Gevşek bir kum tabakası ($Dr=40\%$) üzerinde daha sıkı bir kum tabakası ($Dr=50\%$, $Dr=60\%$ ve $Dr=72\%$) ve arasında ince bir silt tabakası bulunan silt ara tabakalı kum zeminler (L14, L15 ve L16) ile gevşek bir kum tabakası üzerinde ($Dr=40\%$), daha sıkı kum tabakalarının ($Dr=50\%$, $Dr=60\%$ ve $Dr=72\%$) yer aldığı silt ara tabakası içermeyen tabakalı kum zeminlerin (L11, L12 ve L13) dinamik davranış analizlerinden hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırmalı olarak Şekil 7.24, Şekil 7.25 ve Şekil 7.26’da gösterilmiştir.



Şekil 7.24 $Dr=50\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



Şekil 7.25 $Dr=60\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



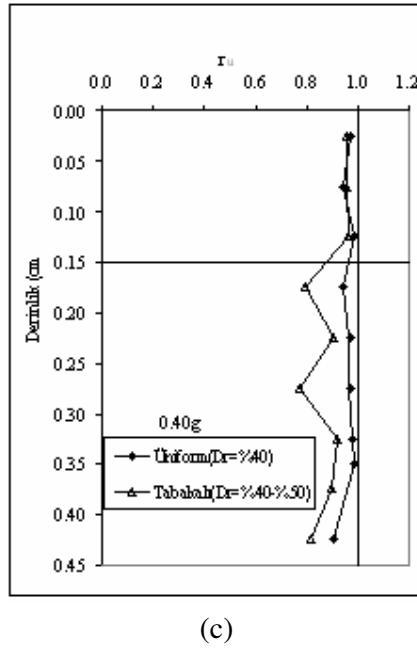
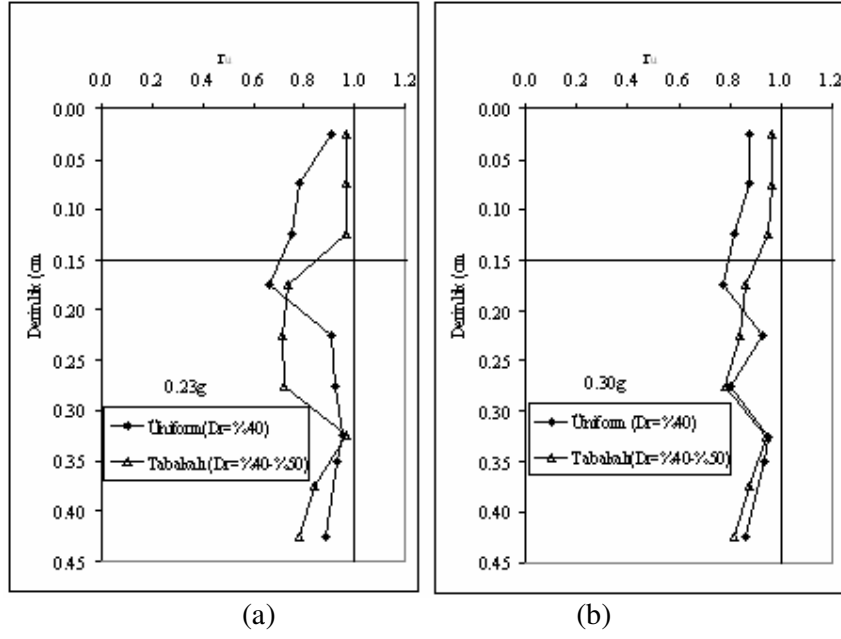
Şekil 7.26 $Dr=72/Dr=40$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

Silt ara tabakası bulunan ve bulunmayan kum kolonlarının nümerik analizinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle olan değişimlerinden, silt ara tabakası altında artık boşluk suyu basınçlarında bir miktar artış olduğu görülmektedir. Laboratuar model deneylerinde gözlenen, homojen sıklıkta veya farklı sıklıkta tabakalar içeren kum kolonlarında bir silt ara tabakası mevcut olmasının dinamik yüklemeler etkisinde oluşan boşluk suyu basıncı artışları üzerindeki belirgin etkisi, DIANA programı ile gerçekleştirilen nümerik analiz sonuçlarında tam olarak gözlenememektedir. Deneysel gözlemler ve nümerik analiz sonuçları arasındaki bu farklılığın iki olası nedenden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bunlardan birincisi, silt ara tabakası kalınlığının 1cm gibi oldukça ince bir tabaka olması ve sonlu elemanlar analizinde çok iyi modellenememesidir. Diğer bir nedeninin ise, kuma göre geçirimsizliği daha az olan bu ince tabakanın permeabilitesinin nümerik modelde dikkate alınabilmesi gerekirken kullanılan Towhata-Iai bünye modelinde zeminin geçirgenliği ile ilişkili bir malzeme parametresi kullanılmaması ve nümerik analizde sadece drenajsız koşulların göz önüne alınabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenlerden dolayı silt ara tabakalı modellerin nümerik analizi sonuçları, silt ara tabakasının etkisi yönünden deneysel sonuçlarda gözlemlenen davranışı yeterince yansıtamamıştır.

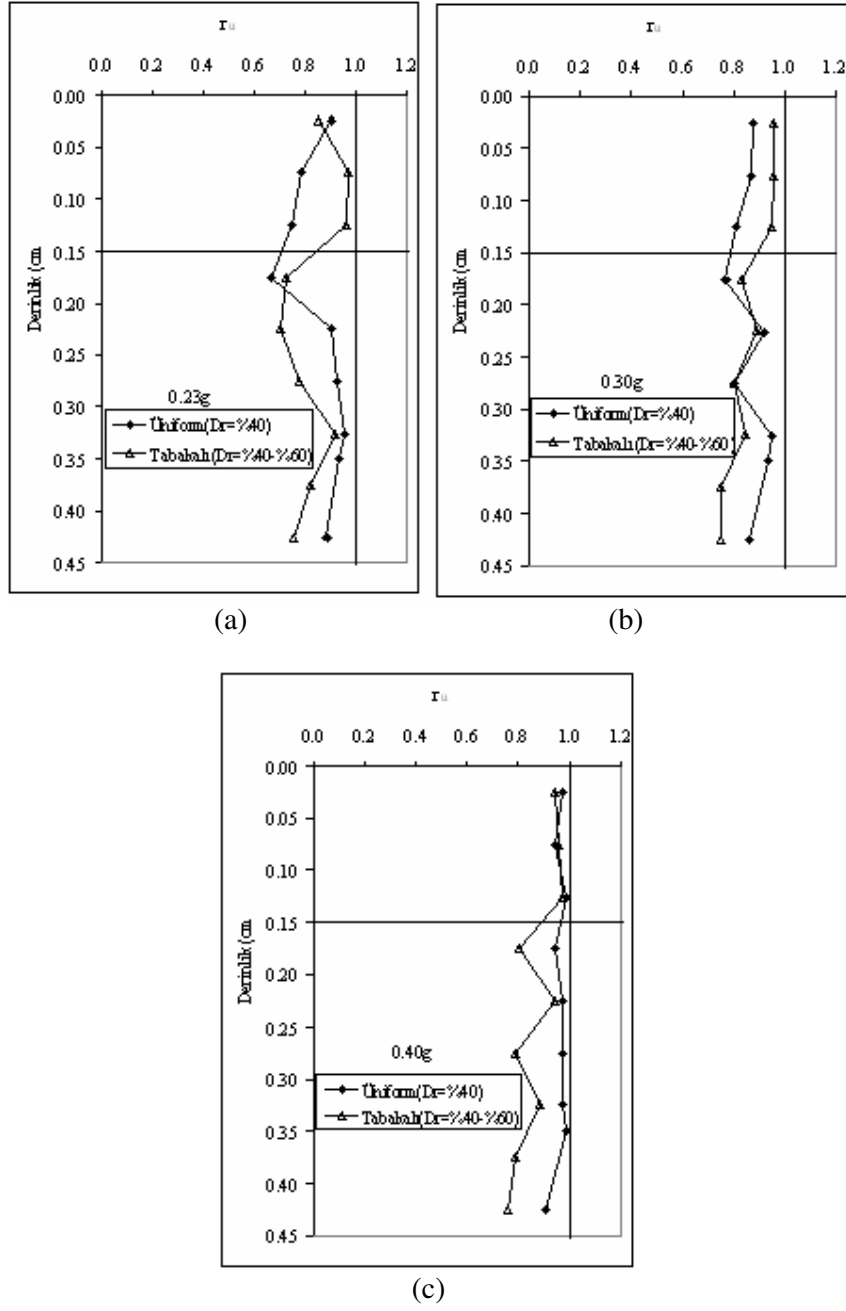
7.5.2 Tabakalı Kum Kolonu Deneylerinin Dinamik Davranış Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı rölatif sıklık derecelerine sahip kum tabakalarının dinamik davranışını incelemek için, üst tabakanın alt tabakaya göre daha gevşek ve daha sıkı olduğu durumları modelleyen deneylerin dinamik davranış analizlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi aşağıda sunulmuştur.

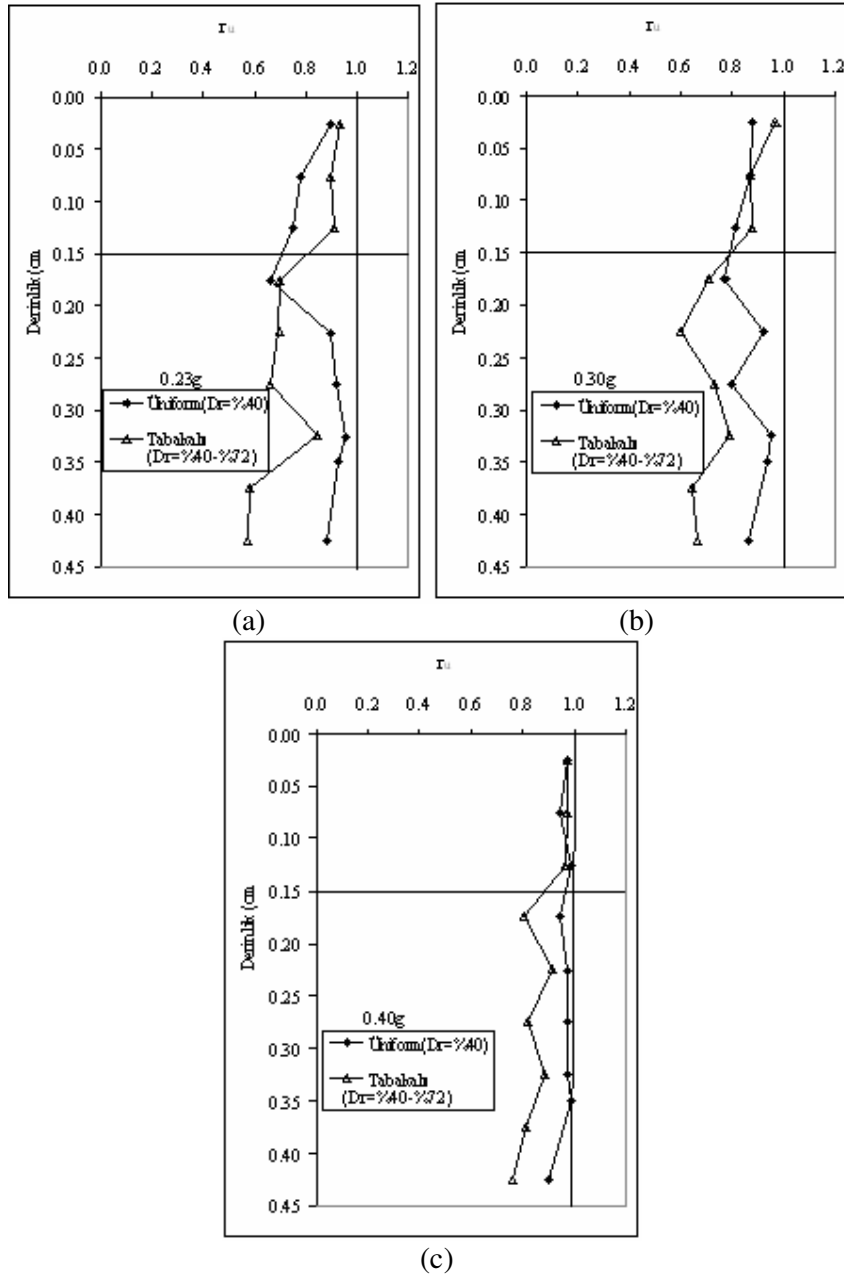
Sıkı bir kum tabakası üzerinde ($D_r = 50\%$, $D_r = 60\%$ ve $D_r = 72\%$) gevşek kum tabakasının ($D_r = 40\%$) yer aldığı zemin koşullarını modellemek için gerçekleştirilen model deneylerin (L8, L9 ve L10) dinamik davranış analizlerinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri, 40% rölatif sıklığa sahip gevşek kum tabakasından oluşan model deneyinin dinamik davranış analizinden hesaplanan sonuçlar ile Şekil 7.27, Şekil 7.28 ve Şekil 7.29’da farklı ivme genlikleri için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafiklerde gösterilen değişimlerden, üstte yer alan 40% rölatif sıklıktaki tabakada oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının, Bölüm 5.11’de tabakalı kum zeminlerin model deney sonuçları için yapılan benzer karşılaştırmaların aksine, alt tabakanın sıklık derecesinden fazla etkilenmediği ve uygulanan bütün sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaştığı ve kum kolonunun tümüyle $D_r = 40\%$ sıklıkta olmasından daha olumsuz bir durum oluşturduğu gözlenmektedir. Üst tabakaya göre daha sıkı olan alt tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları ile kum kolonunun tümü ile 40% rölatif sıklıkta olması durumundaki artık boşluk suyu basınçları karşılaştırıldığında ise sıklık derecesinin artık boşluk suyu basınçları üzerindeki etkisi genel olarak gözlenmekte ve sıklık derecesi arttıkça artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.27 Tabakalı (Dr=%40/Dr=%50) ve üniform kum (Dr=%40) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

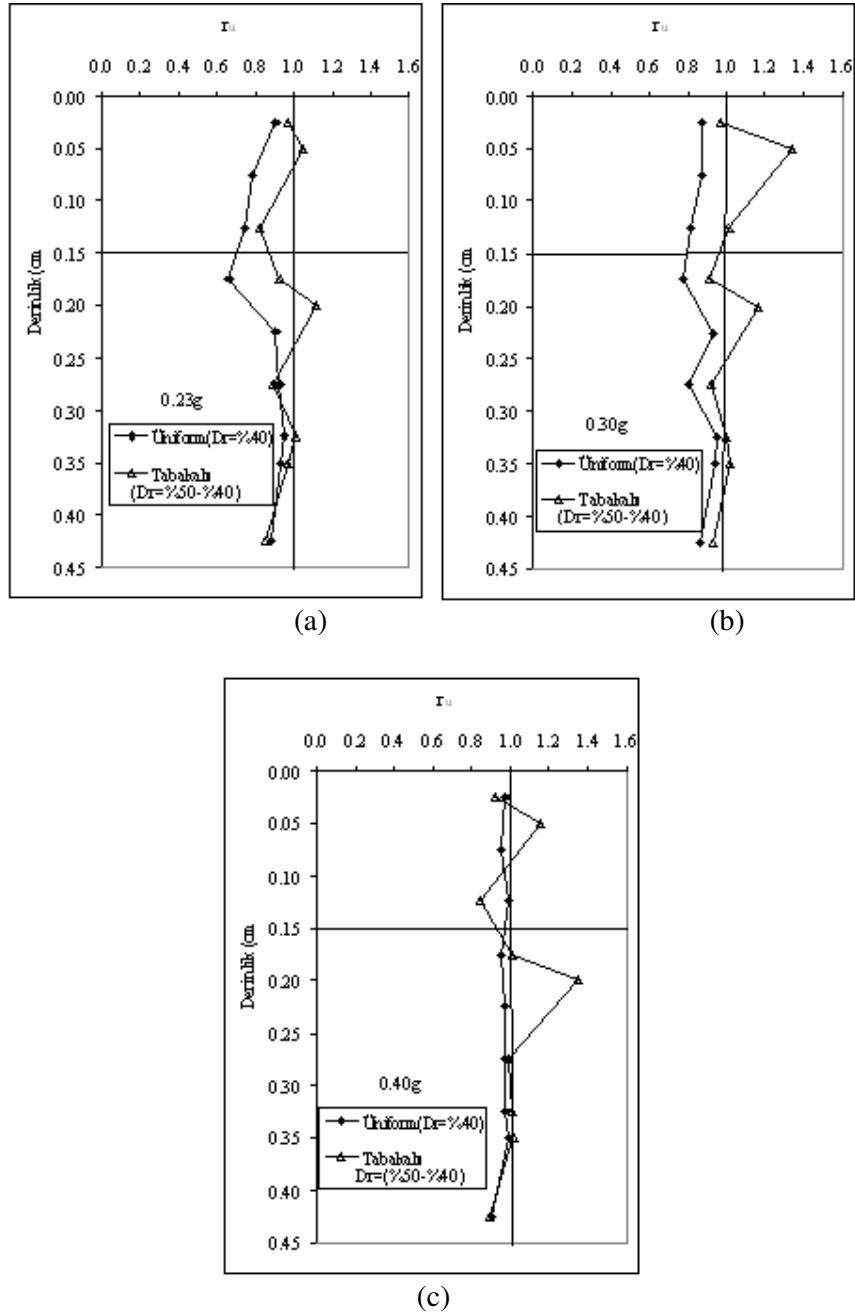


Şekil 7.28 Tabakalı ($Dr=40\%/Dr=60\%$) ve üniform kum ($Dr=40\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

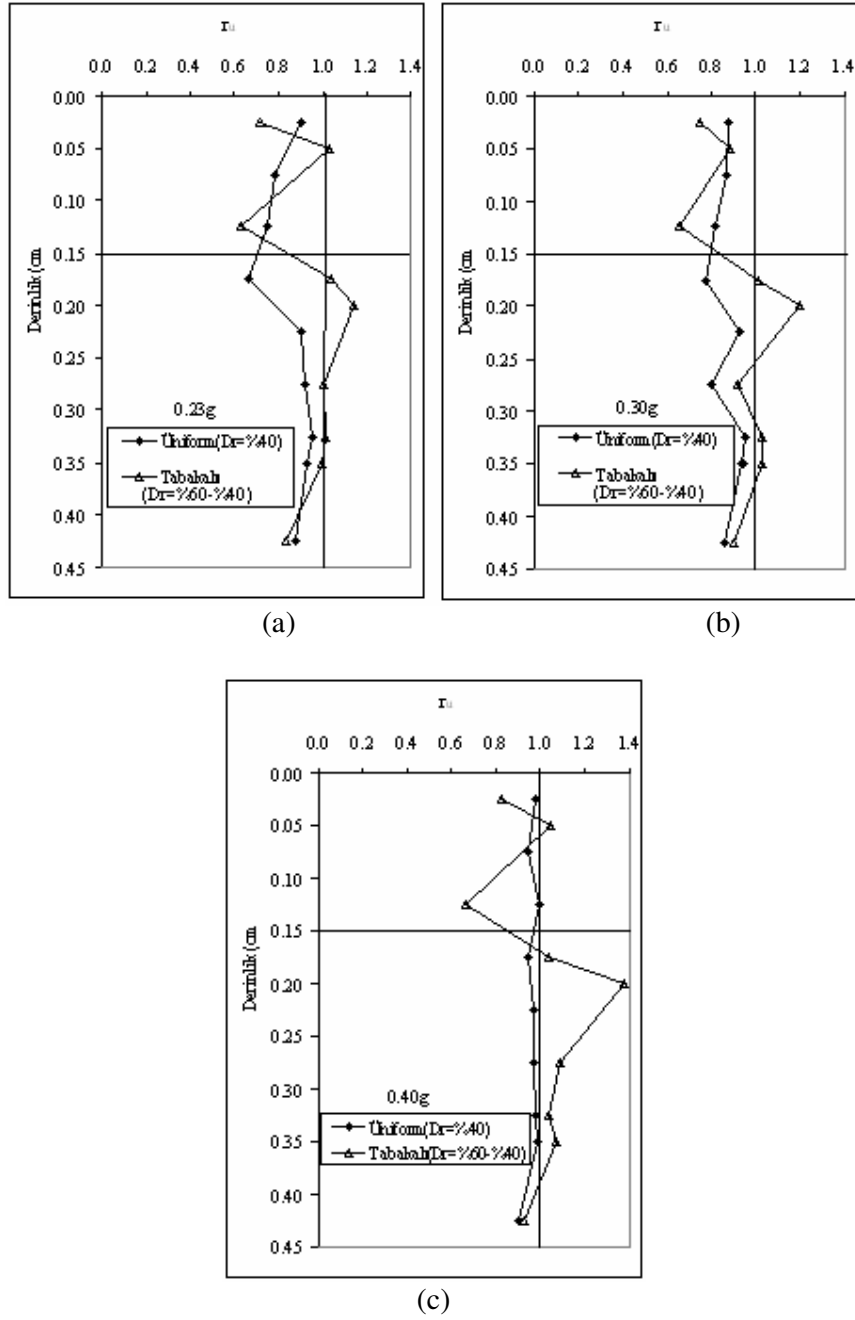


Şekil 7.29 Tabakalı ($Dr=40/Dr=72$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

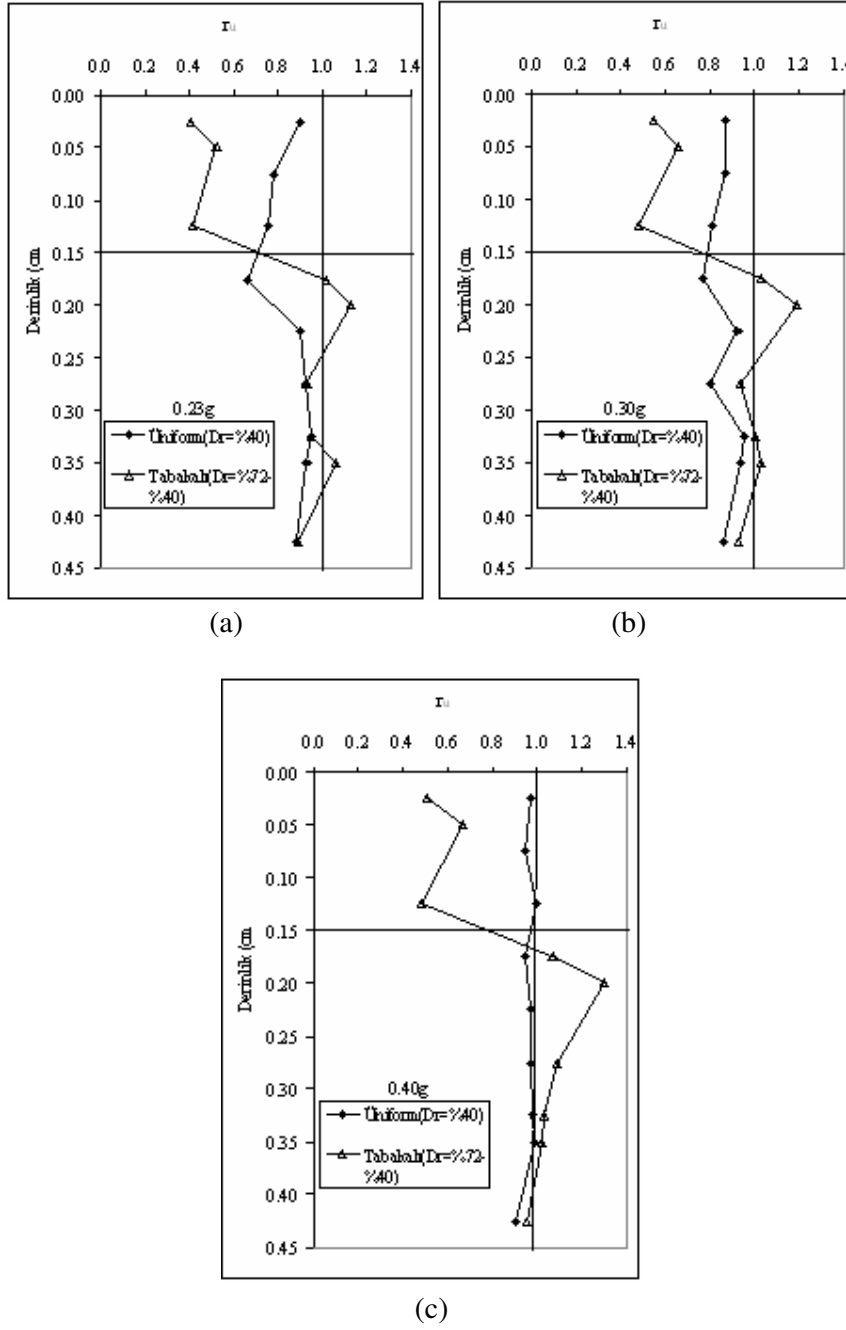
Gevşek bir kum tabakası üzerinde ($Dr=40$), daha sıkı kum tabakalarının ($Dr=50$, $Dr=60$, $Dr=72$) yer aldığı durumların modellenmesi için gerçekleştirilen “Tabakalı kum” model deneylerinin dinamik davranış analizlerinden hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri, kum kolonunun tümü ile %40 rölatif sıklıkta olması durumundaki artık boşluk suyu basıncı oranları ile farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırılarak Şekil 7.30, Şekil 7.31 ve Şekil 7.32’de gösterilmiştir.



Şekil 7.30 Tabakalı ($Dr=50\%/Dr=40\%$) ve üniform kum ($Dr=40\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



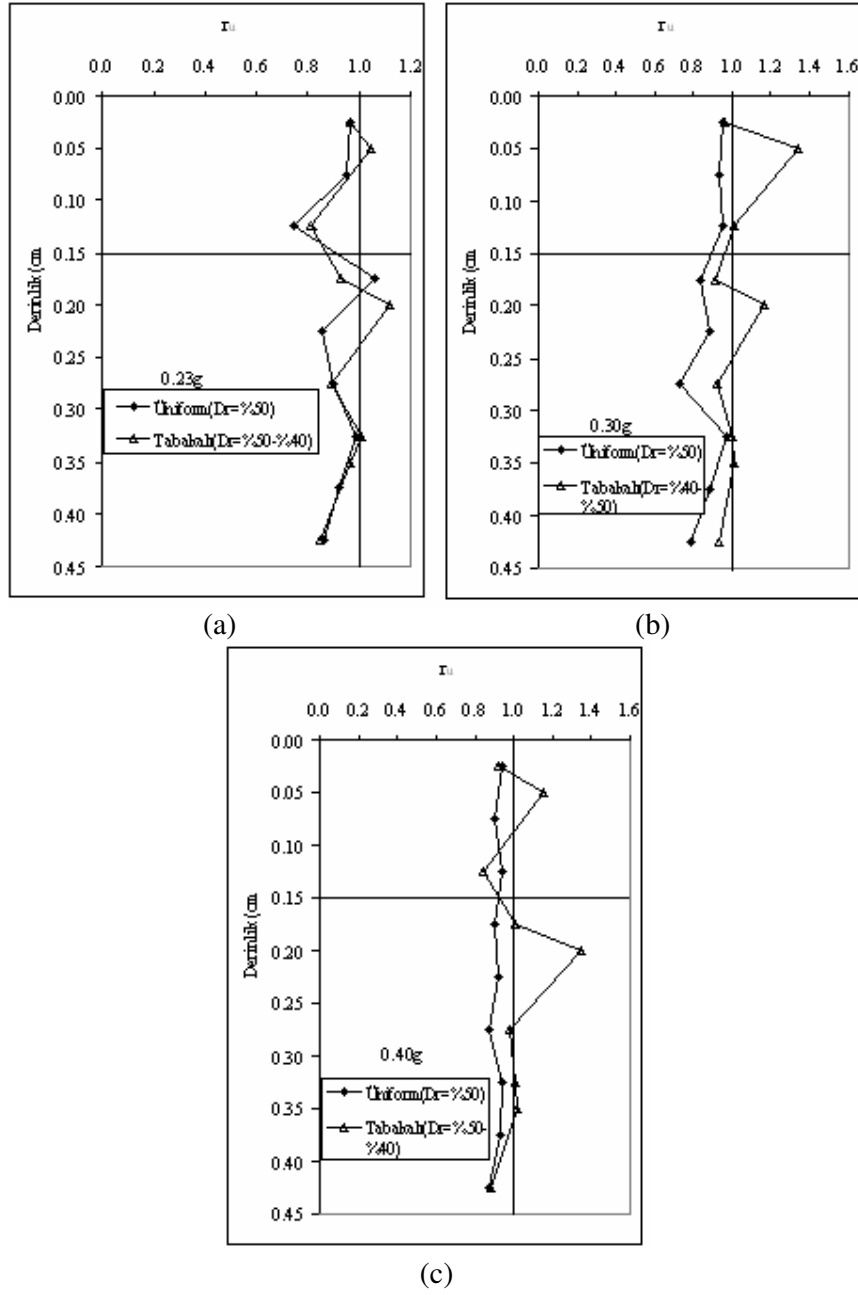
Şekil 7.31 Tabakalı ($Dr=60/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



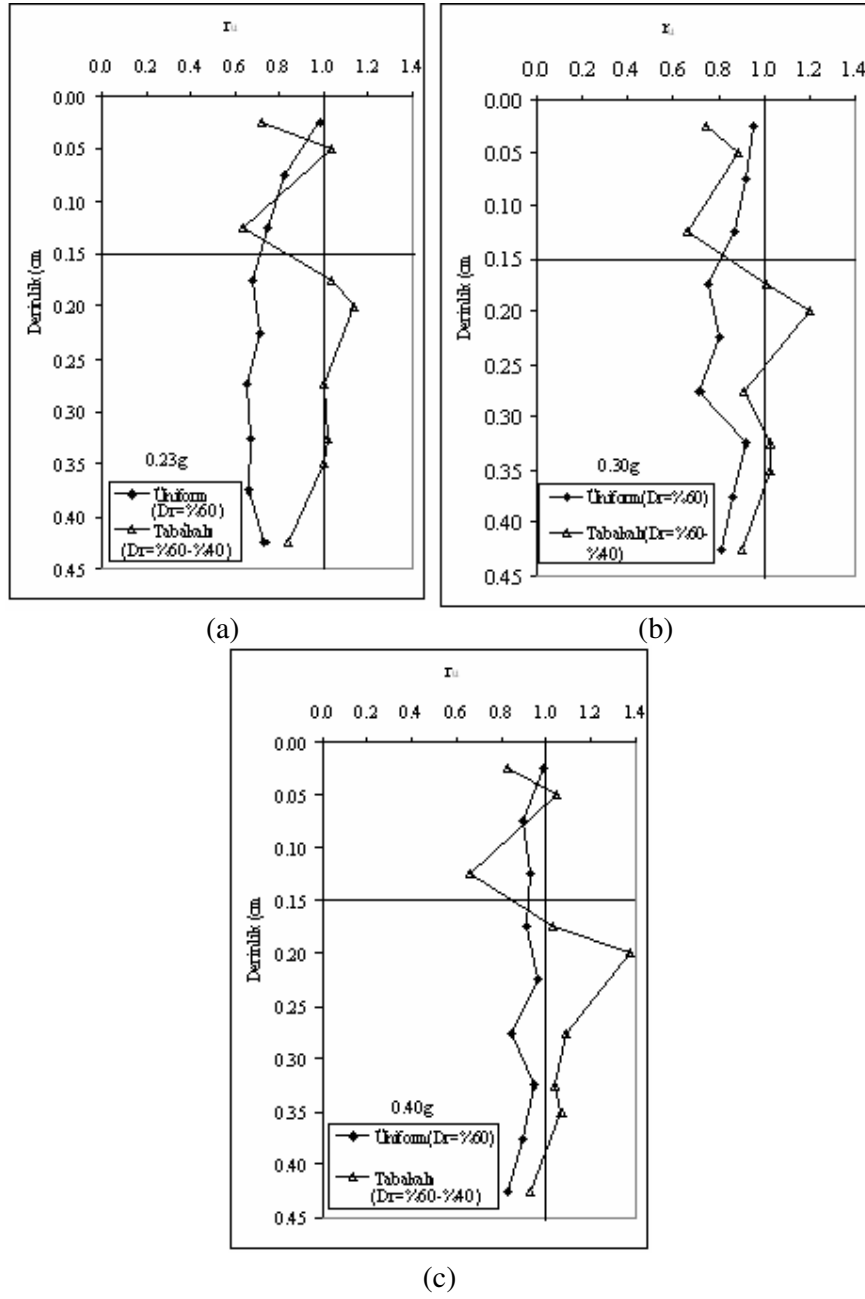
Şekil 7.32 Tabakalı ($D_r = 72\% / D_r = 40\%$) ve üniform kum ($D_r = 40\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Şekil 7.30, Şekil 7.31 ve Şekil 7.32’de gösterilen grafiklerden, üstteki daha sıkı tabakanın mevcudiyetinin alt tabakada oluşan boşluk suyu basınçları üzerinde bir miktar arttırıcı yönde etkisi olduğu, ayrıca, üst tabakanın %50 ve %60 rölatif sıklıkta olduğu tabakalı kum kolonlarında alttaki gevşek tabakanın, üstte yer alan daha sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir. Altta yer alan gevşek kum tabakasının boşluk suyu basınçlarını arttırıcı yöndeki etkisi üst tabakanın %72 rölatif sıklıkta olduğu tabakalı kum kolonunda tam olarak görülememektedir.

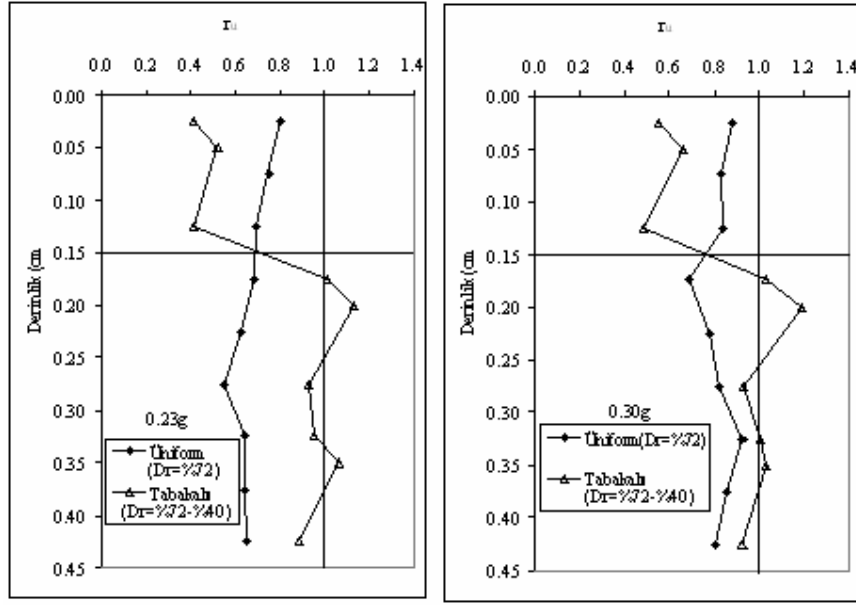
Alttaki gevşek kum tabakasının üstteki sıkı kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarına olan etkisini daha iyi inceleyebilmek için, alt tabakanın gevşek ($Dr=40\%$), üst tabakanın ise alt tabakaya göre daha sıkı ($Dr=50\%$, $Dr=60\%$ ve $Dr=72\%$) olduğu tabakalı kum kolonları (L11, L12, L13) ile %50, %60 ve %72 rölatif sıklık derecesine sahip uniform kum kolonlarının (U2, U3, U4) davranışı farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırılarak Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35’te gösterilmiştir. Grafiklerde gösterilen değişimlerden, üst tabakanın %50 rölatif sıklıkta olduğu tabakalı kum kolonlarında alttaki gevşek tabakanın, üstte yer alan daha sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırıcı yönde etkisi olduğu, fakat üst tabakanın %60 ve %72 olduğu tabakalı kum kolonlarında ise Bölüm 5.11’de tabakalı kum zeminlerin model deney sonuçlarından üretilen benzer karşılaştırmalarda görülenin aksine üstteki sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde rol oynadığı görülmektedir. Tabakalı kum zeminleri modellemek için gerçekleştirilen model deneylerden elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak yapılan benzer karşılaştırmalar ile nümerik analiz sonuçlarından elde edilen karşılaştırmalar arasındaki bu farklılığın nedeninin ise, deneyler sırasında görülen ve üstteki sıkı kum tabakasının boşluk suyu basınçlarının artışına neden olan yukarı yönlü boşluk suyu hareketinin nümerik olarak modellenememesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 7.33 Tabakalı ($D_r = 50\%/D_r = 40\%$) ve üniform kum ($D_r = 50\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

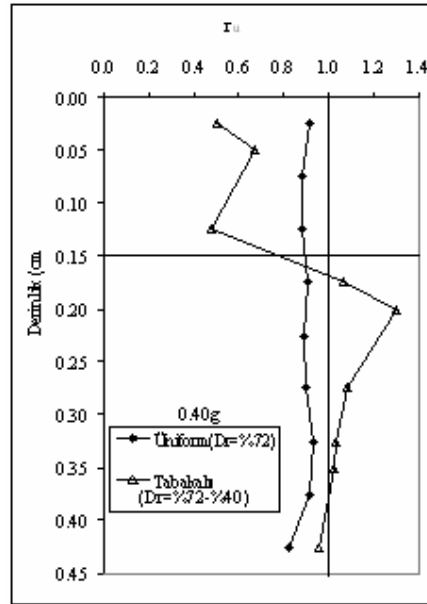


Şekil 7.34 Tabakalı ($Dr=60/Dr=40$) ve üniform kum ($Dr=60$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



(a)

(b)



(c)

Şekil 7.35 Tabakalı ($D_r = 72\%/D_r = 40\%$) ve üniform kum ($D_r = 72\%$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Nümerik analiz sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı değişim grafikleri toplu olarak incelendiğinde, sonuçları Bölüm 6'da verilen parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmekle birlikte bazı derinliklerde nümerik analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile iyi uyumlu olmadığı görülmektedir. Nümerik analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında yeterli uyumun gözlenmediği deneyler ve olası nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

Bazı modellerde, en üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikteki deneysel ölçümler ile nümerik analiz sonuçlarının iyi uyumlu olmadığı görülmektedir. Bunun muhtemelen bu derinlikteki sensörün yüzeye çok yakın olmasından ve kum kolonlarının hazırlanması sırasında üst tabakanın amaçlanandan daha gevşek kalmasından kaynaklanan deneysel hatalardan ve/veya boşluk suyunun zemin yüzeyine doğru hareketi sırasında sızıntı basınçlarının etkisi ile daha yüksek artık boşluk suyu basınçları oluşmasının nümerik modelde diakkate alınamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, artık boşluk suyu basınçları sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaşıncaya bünye modelinin yetersiz kalmasının da bir başka neden oluşturması beklenebilir. Nümerik analiz sonuçları ile deneysel boşluk suyu basıncı ölçümleri arasında uyumun yetersiz olduğu gözlenen diğer bazı deneylerin ise üst tabakanın %40, alt tabakanın %72 ve %60 rölatif sıklıklarda olduğu bazı tabakalı kum kolonu model deneyleri olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise kullanılan malzeme parametrelerinin maksimum artık boşluk suyu basıncına ulaşıldıktan sonra kumun dilatasyon davranışını iyi modelleyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Model deneylerin nümerik analizinden hesap edilen artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri sarsıntı şiddetine ve rölatif sıklığa bağlı olarak incelenmiş ve sonuç olarak, farklı ivme genliklerinde dinamik yüklemeler uygulanan kum kolonlarında hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının genel olarak rölatif sıklık arttıkça azaldığı, sarsıntı şiddeti arttıkça ise arttığı görülmüştür. Bununla birlikte sadece 45 cm yüksekliğinde olan model deneyi kum kolonlarında, efektif gerilme seviyesinin düşük olmasından dolayı, maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının özellikle gevşek kum kolonlarında uygulanan titreşimli yükler etkisinde sıvılaşmaya yol açacak seviyelere yaklaşarak derinlikle çok fazla değişmediği görülmüştür. Arazide 20m kalınlıkta bir kum tabakası için yapılan analizlerde r_u değerinin beklenildiği gibi derinlikle azaldığı görülmüştür (Şekil 6.25 ve Şekil 6.26). Üst tabakanın gevşek, alt tabakanın sıkı ve orta sıkı yerleşimde olduğu tabakalı kum kolonlarında ise, gevşek kum tabakasının yer aldığı üst kesimlerde sarsıntı şiddetinin etkisi belirgin bir

şekilde görülmezken, sıkı ve orta sıkı yerleşime sahip kum tabakasının bulunduğu alt kesimlerde sarsıntı şiddeti artıkça artık boşluk suyu basınçlarındaki artışın daha belirgin olduğu gözlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda dinamik sarsıntı sırasında ölçülen oturma-zaman değişimleri ile nümerik analiz sonuçları arasında bir karşılaştırma yapılamamıştır. Bunun nedeni ise Bölüm 6'da anlatıldığı gibi sıvılaşma analizlerinde kullanılan Towhata-Iai bünye modeli drenajsız koşullar için geçerli bir model olup, dinamik davranış analizlerinde kum tamamen sıkışmaz olarak modellenmektedir. Ayrıca, kullanılan bünye modelinde boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini, yani sıvılaşma sonrası davranış modellenmemektedir. Deneysel çalışmalar sırasında gözlenen oturma-zaman değişimlerinden ise oturmaların hem artık boşluk suyu basıncı oluşumu sırasında hem de artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme aşaması sırasında olduğu görülmektedir. Dolayısı ile, deneysel olarak ölçülen oturma-zaman değişimleri ile nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için artık boşluk suyu basınçlarının oluşumu sırasında meydana gelecek oturmaların drenajlı koşulların dikkate alınarak hesaplandığı ve dinamik yükleme sonrasında artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme aşamasının konsolidasyona dayalı olarak modellendiği bir nümerik analiz gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Giriş

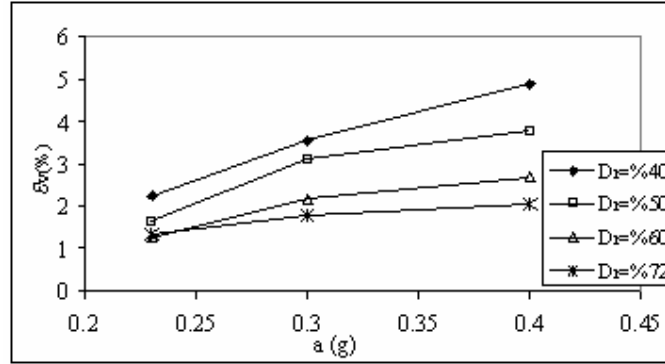
Bu tez çalışmasında, suya doymun kumlu zemin tabakalarının depremle sırasında maruz kaldıkları tekrarlı (çevrimli) yüklemeler etkisindeki davranışlarının ve özellikle artık boşluk suyu basıncı oluşumu ile bunun sonucu ortaya çıkabilen sıvılaşma durumunun araştırılması amacı ile öncelikle laboratuvarında oluşturulan uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde model deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, model deneylerde gözlemlenen davranışı nümerik olarak modellemek amacı ile DIANA sonlu elemanlar programı ile nümerik analizler yapılarak, deneysel çalışma sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı ölçümleri ile nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. DIANA sonlu elemanlar programında kullanılan bünye modeline ait malzeme parametrelerinin değişim aralıkları ile boşluk suyu basıncı oluşumundaki etkilerini, kumun sıklık derecesine bağlı olarak belirleyebilmek amacı ile parametrik analizler gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda elde edilen malzeme parametreleri kullanılarak, fiziksel model deneylerinin modellenmesi yanında arazideki farklı sıklıklarda uniform bir kum tabakası, depremselliği ve sıvılaşma potansiyeli yüksek bir arazi gözlem ve deney alanı olan Wildlife Sıvılaşma Alanı ve VELACS Projesi kapsamında suya doymun gevşek bir kum tabakası modeli üzerinde gerçekleştirilen bir santrifüj deneyi nümerik olarak analiz edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen model deney çalışmalarından ve nümerik analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

8.2 Model Deney Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

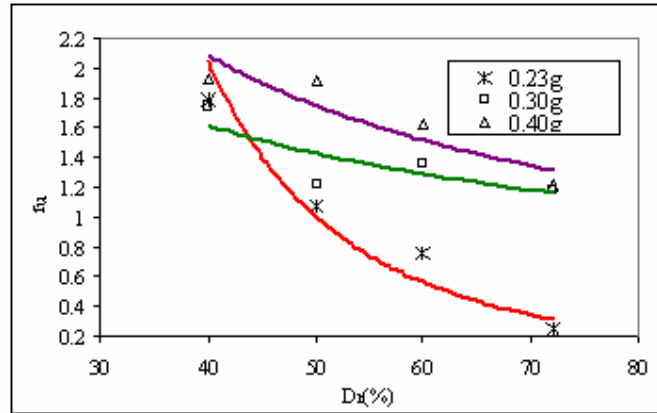
Bu tez çalışması kapsamında suya doymun tabakalı kum zeminlerin sıvılaşma davranışının araştırılması amacı ile kurulan deney düzeneğinde, farklı arazi koşullarını modelleyebilmek amacı ile beş seri model deneyi programlanmış ve farklı sıklıklarda ($D_r = \%40, \%50, \%60, \%72$) hazırlanmış uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıkta tabakalardan oluşan kum kolonları üzerinde üç farklı ivme genliğine (0.23g, 0.30g ve 0.40g) sahip sarsıntılar uygulanarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sırasında üç farklı derinliğe yerleştirilmiş artık boşluk suyu basıncı sensörleri ile dinamik yükleme sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının zamanla değişimi ve bir dijital kamera yardımı ile de kum kolonlarında oluşan yüzeysel oturmalar ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar sırasında dijital

kamera yardımı ile kum tabakasında ölçülen yüzeysel oturmalar ve hacimsal şekil değiştirmelerin Şekil 8.1’de gösterildiği gibi sıklık derecesi arttıkça azaldığı ve sarsıntı şiddeti arttıkça arttığı görülmüştür.

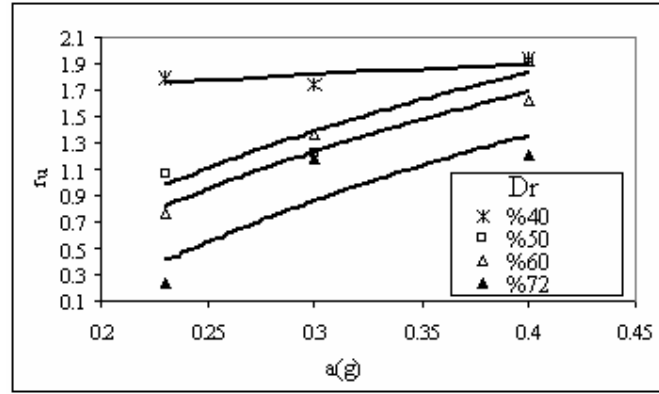


Şekil 8.1. Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonlarında hacimsal şekil değiştirmenin sarsıntı şiddeti ile değişimi

Farklı derinliklere yerleştirilmiş olan boşluk suyu basıncı sensörleri yardımı ile ölçülen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının sensörün bulunduğu derinlikteki düşey efektif gerilmeye (σ_{vo}') bölünmesi ile elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının (r_u)_{maks Şekil 8.2 ve Şekil 8.3’ de gösterildiği gibi artan sıklık derecesi ile azaldığı ve artan sarsıntı şiddeti ile ise arttığı görülmüştür. Genel olarak dinamik yüklemeler altında oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle azaldığı ve yüzeye yakın kesimlerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.}



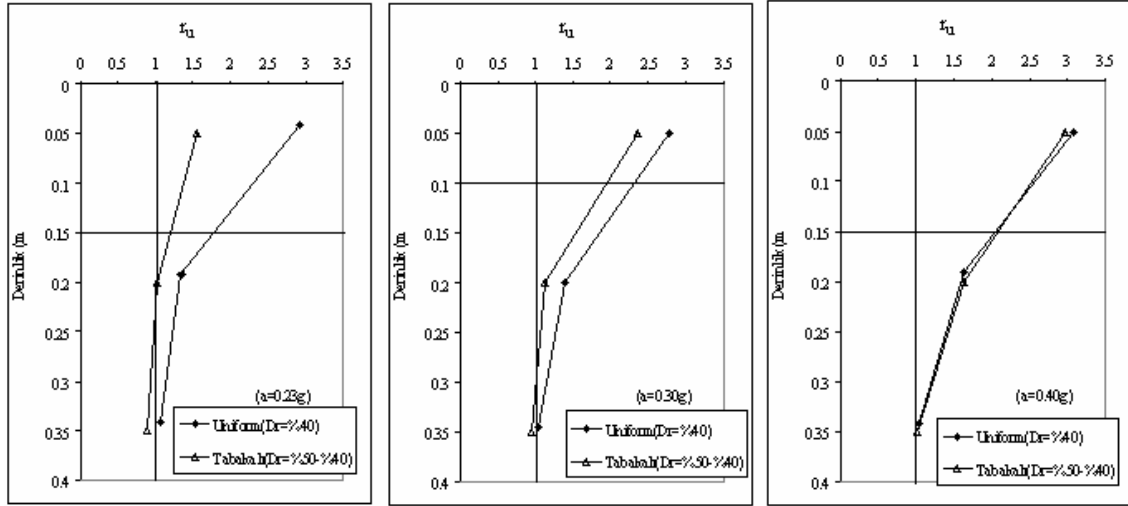
Şekil 8.2 Üniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) rölatif sıklıkla değişimi



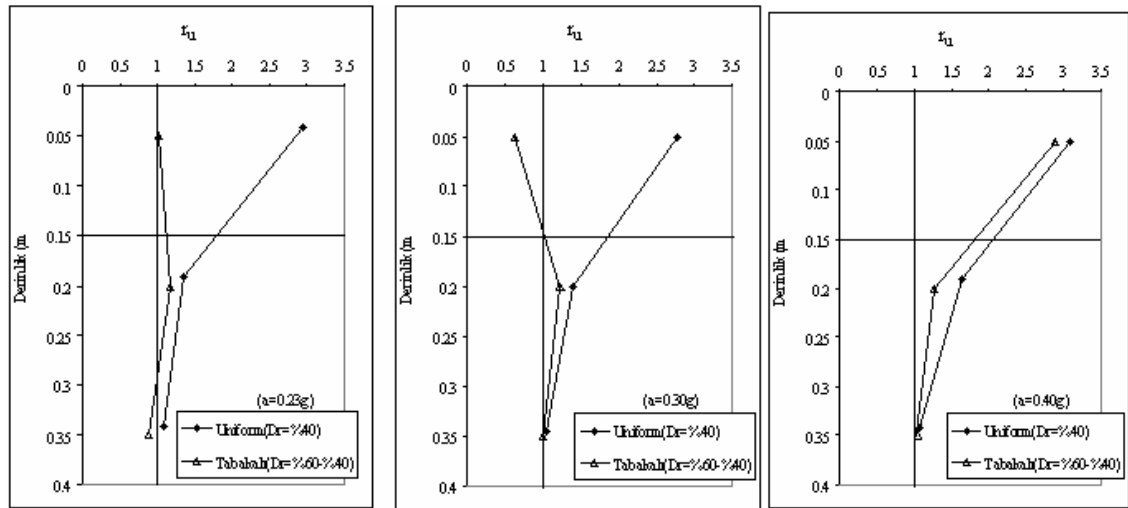
Şekil 8.3 Uniform kum kolonu deneylerinde ortalama maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının (r_u) sarsıntı şiddeti ile değişimi

8.2.1 Üniform sıkılıkta ve tabakalı kum kolonlarının davranışı

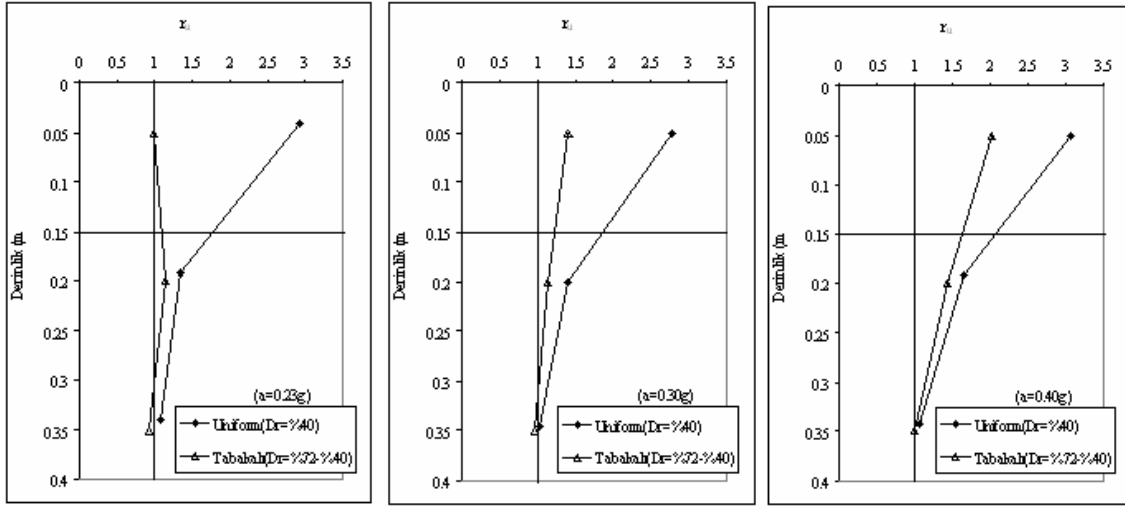
Artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle ve zamanla değişimini gösteren artık boşluk suyu basıncı izokronları, dinamik yükleme sırasında uygulanan sarsıntı şiddetine ve kumun sıkılık derecesine bağlı olarak düşey efektif gerilme değerini aşan artık boşluk suyu basınçlarının oluşabildiğini göstermiştir. Oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçları, kumun bu derinliklerde taşıma gücünün tamamen kaybolmasına neden olmuştur. Özellikle, sıkı bir kum tabakası altında gevşek kum çökellerinin yer aldığı model deneylerinde, gevşek alt kum tabakasında oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçlarının yol açtığı yukarı yönlü su hareketinin üstte yer alan sıkı kumdaki boşluk suyu basınçlarını artırarak, bu tabakanın da sıvılaşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Bu etki, tabakalı kumlarda dinamik yüklemeler sırasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının oluşumunu inceleyebilmek için gevşek bir kum tabakası ($Dr=40\%$) üzerinde, daha sıkı kum tabakalarının ($Dr=50\%$, $Dr=60\%$, $Dr=72\%$) yer aldığı durumların modellenmesi için gerçekleştirilen “Tabakalı kum” model deneylerinde elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri ile 40% rölatif sıkılığa sahip gevşek uniform kum tabakasında oluşan sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gösteren Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da verilen grafiklerde gözlenebilmektedir.



Şekil 8.4 Tabakalı ($Dr=\%50/Dr=\%40$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



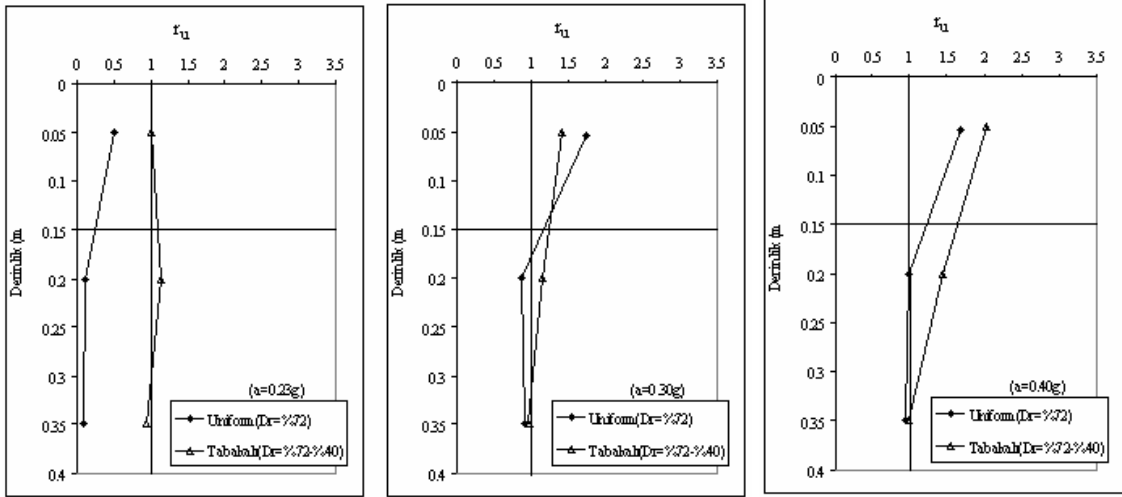
Şekil 8.5 Tabakalı ($Dr=\%60/Dr=\%40$) ve üniform sıkılıkta ($Dr=\%40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 8.6 Tabakalı ($Dr=72/Dr=40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=40$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da gösterilen grafiklerden, altta yer alan gevşek kum tabakasında ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının, üstte yer alan sıkı tabakanın mevcudiyetinden fazla etkilenmediği, ancak, alttaki gevşek tabakanın üstünde yer alan sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını artırıcı yönde etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu etkiyi daha iyi görebilmek amacı ile alt tabakanın gevşek ($Dr=40$), üst tabakanın ise alt tabakaya göre daha sıkı ($Dr=72$) olduğu tabakalı kum kolonları ile 72 rölatif sıklık derecesine sahip uniform kum kolonlarının davranışı farklı sarsıntı şiddetleri için karşılaştırmalı olarak Şekil 8.7’de sunulmuştur. Şekilde gösterilen grafiklerden uygulanan tüm ivme genliklerinde altta yer alan gevşek kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının üstteki sıkı kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarını artırarak, r_u değerlerinin bu tabakada sıvılaşma oluşturacak mertebelere ulaşmasına yol açtığı görülmektedir.

Uniform ve tabakalı kum kolonlarında üzerinde gerçekleştirilen model deneylerinde gevşek ve orta sıkı kum kolonları üzerinde yapılan deneylerde uygulanan tüm sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşma meydana gelirken, $0.40g$ ivme genliğine sahip kuvvetli sarsıntı etkisinde sıkı kum kolonunda bile sıvılaşma durumu olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun deneylerde kum kolonlarının $45cm$ yüksekliğinde olması ve tüm kum kolonu boyunca düşük düzey efektif gerilmelerin etkimesinden kaynaklanabileceği ve arazide geçerli efektif gerilme seviyelerindeki durumu tam olarak yansıtmayabileceği düşünülmektedir.



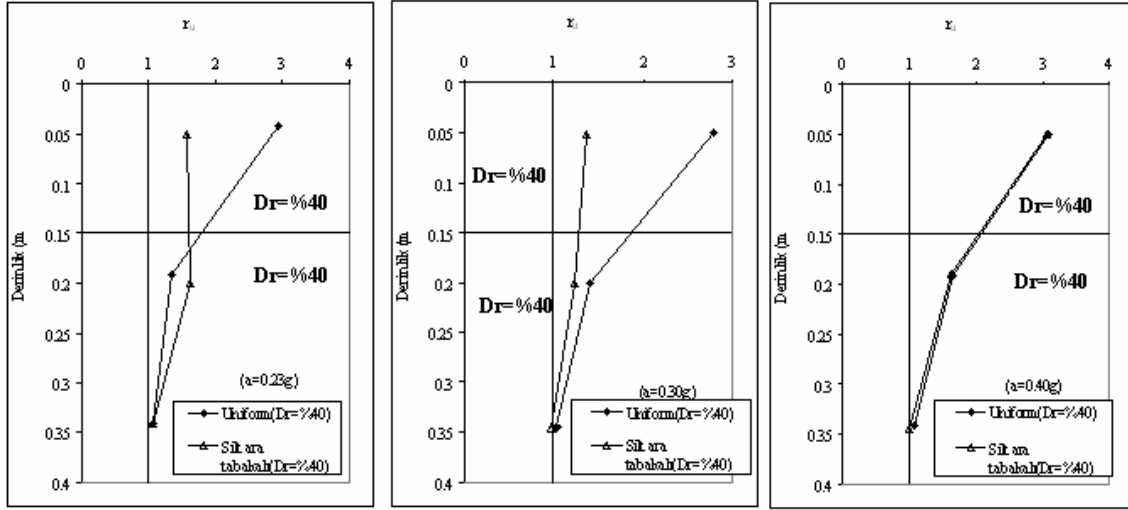
Şekil 8.7 Tabakalı ($Dr=72/Dr=40$) ve üniform sıklıkta ($Dr=72$) kum kolonları için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

8.2.2 Kum kolonu içinde silt ara tabakası bulunmasının etkileri

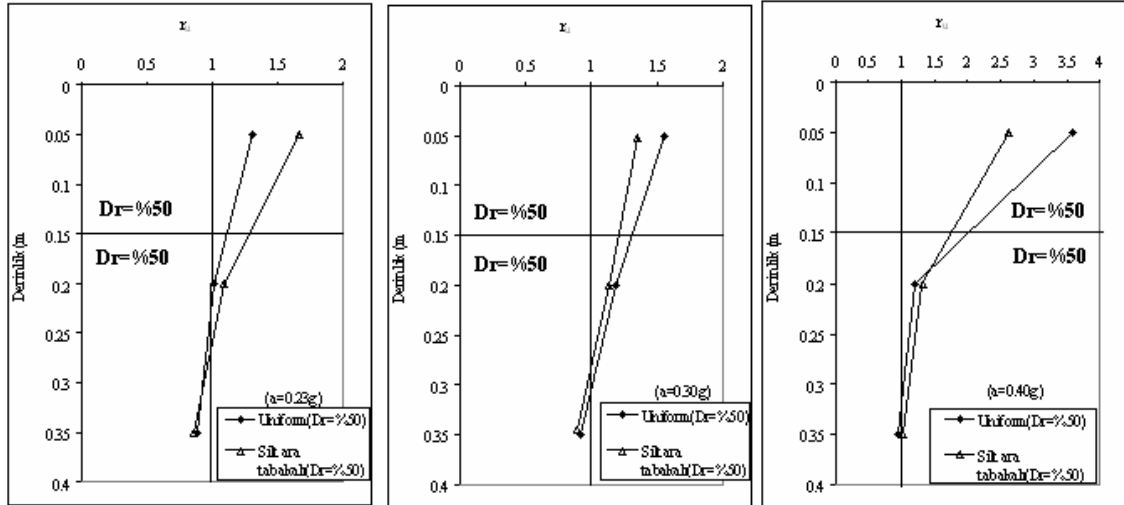
Arazide kum tabakaları içinde rastlanabilecek daha az geçirgen ara tabakaların kum tabakasının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile, silt ara tabakalı kum kolonlarından oluşan modeller hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Silt ara tabakalı kum kolonu deneylerinde, kum kolonu içerisinde geçirimsizliği daha az ince bir silt ara tabakası olması durumunda bu tabaka altında bir su filmi oluştuğu gözlenmiştir. Silt tabakası altındaki kumun sıklık derecesi azaldıkça oluşan su filmi kalınlığının arttığı gözlenmekte, dolayısıyla arazide geçirimsizliği düşük tabakalar (silt, kil) altında gevşek kum tabakaları yer alması durumunda su filmi oluşumunun zararlı etkilerinin daha fazla olacağı anlaşılmaktadır. Deneyler sırasında, su filmi kalınlığının genel olarak sarsıntı şiddeti ile birlikte arttığı, ancak çok şiddetli sarsıntılar etkisinde silt ara tabakası altındaki kum tabakasında oluşan yüksek artık boşluk suyu basınçlarının meydana getirdiği türbülansın etkisi ile su filminin silt danelerini de beraberinde taşıyarak zemin yüzeyine doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Oluşan su filminin kalınlığının sarsıntı şiddeti ile birlikte artması ve çok şiddetli sarsıntılarda zemin yüzeyine doğru hareket etmesi, sarsıntı şiddetinin su filmi oluşumu üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Silt ara tabakası altında su filmi oluşumunda dinamik yükleme sırasında silt tabakası altındaki kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basıncı seviyelerinin de önemli rol oynadığı görülmüştür. Su filmi oluşumunun $r_u=0.60$ değerini aştıktan sonra başladığı ve artık boşluk suyu basınçları başlangıç sıvılaşması ($r_u=1$) mertebelerine ulaşmadan su filmi oluşumunun belirgin bir şekilde farkedilebildiği görülmüş,

$r_u=1.20$ değerini aştıktan sonra ise yüzeye doğru hareket etmesinden dolayı su filminin deneysel olarak ölçümü sağlıklı bir şekilde yapılamamıştır.

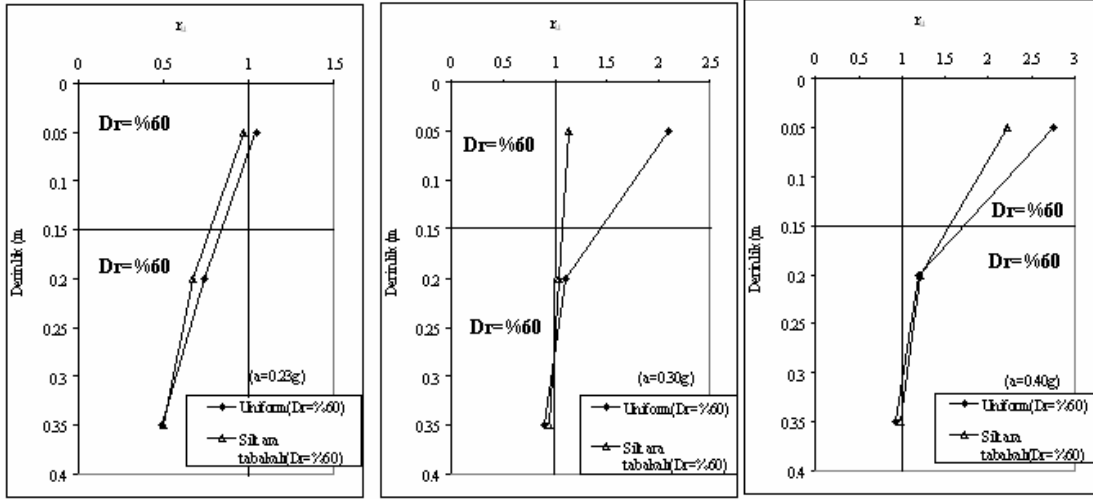
Silt ara tabakasının dinamik yüklemeler sırasında artık boşluk suyu basınçları oluşumu üzerindeki etkileri, aynı sıklıkta silt ara tabakalı kum kolonlarında ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimleri ile silt ara tabakası olmayan uniform kum modellerinde ölçülen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimlerini uygulanan üç farklı sarsıntı şiddeti için karşılaştırmalı olarak gösteren Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10 ve Şekil 8.11’de gözlenebilmektedir.



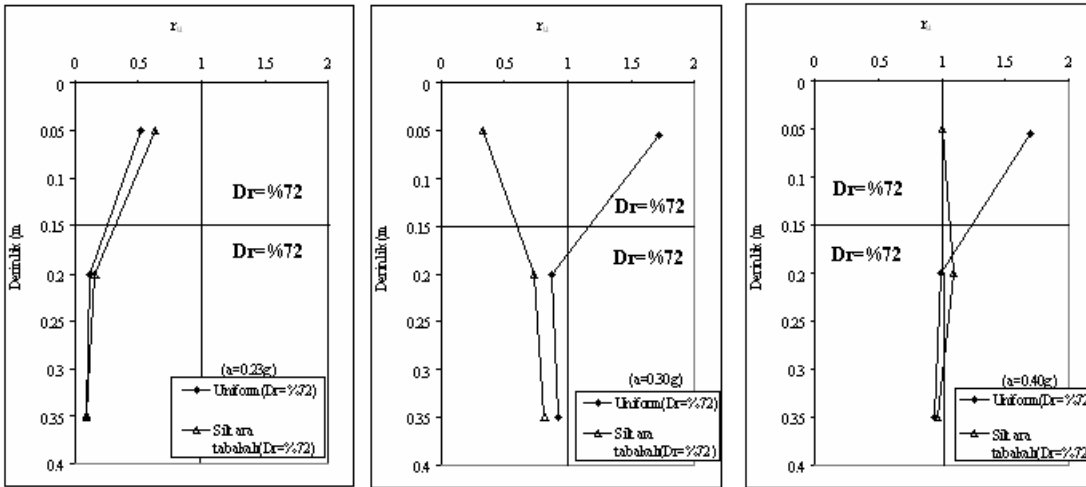
Şekil 8.8 $D_r=40\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 8.9 $D_r=50\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 8.10 $Dr=60\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 8.11 $Dr=72\%$ olan üniform ve silt ara tabakalı kum modelleri için maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Aynı sıklık derecesine sahip silt ara tabakası bulunan ve bulunmayan üniform sıklılıkta kum kolonlarından elde edilen maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimlerinden, tüm sıklık derecelerinde genel olarak silt ara tabakası altında ölçülen artık boşluk suyu basınçları ile üniform kum kolonunda aynı derinliklerde ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının birbirine yakın büyüklükte olduğu ve silt tabakasının mevcudiyetinin belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir. Silt ara tabakası üzerinde yer alan tabakalarda oluşan artık boşluk suyu basınçlarının ise üniform kum kolonunda ölçülenlerden daha az olduğu ve dolayısı ile silt tabakasının mevcudiyetinin üstteki tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde azaltıcı bir etkisi olduğu gözlenmektedir.

Silt ara tabakası mevcudiyetinin sıvılaşma sonrası artık boşluk suyu basıncı değişimleri üzerindeki etkisini incelemek için aynı sıklıkta silt ara tabakası içermeyen (üniform) ve silt ara tabakalı kum kolonlarında, silt tabakası altında ölçülmüş artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme süreleri(t_s) karşılaştırılmıştır. Deneysel gözlemler, kum tabakası içerisinde silt tabakası bulunması durumunda, dinamik yükleme sırasında silt tabakası altında oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme süresinin, diğer bir deyişle drenaj için gerekli sürenin genel olarak uzadığı ve dolayısı ile silt tabakasının kum tabakasının sıvılaşma sonrası davranışını etkilediğini göstermektedir. Bu etkinin arazide çok daha fazla olabileceği ve silt tabakası altında oluşan su filminin uzun süre sönümlenmemesinin, özellikle şevlerde çok ciddi problemlerin çıkmasına sebep olabileceği sonucuna varılmıştır.

Deneysel sonuçlar, arazide kum tabakaları içinde daha az geçirimli silt/kil ara tabakaları yer almasının olumsuz etkilerinin, oluşan boşluk suyu basınçlarını artırmak şeklinde değil, daha çok bu ara tabakalar altında su filmi oluşmasından ve oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sönümlenme süresinin uzamasından kaynaklanabileceğini göstermektedir.

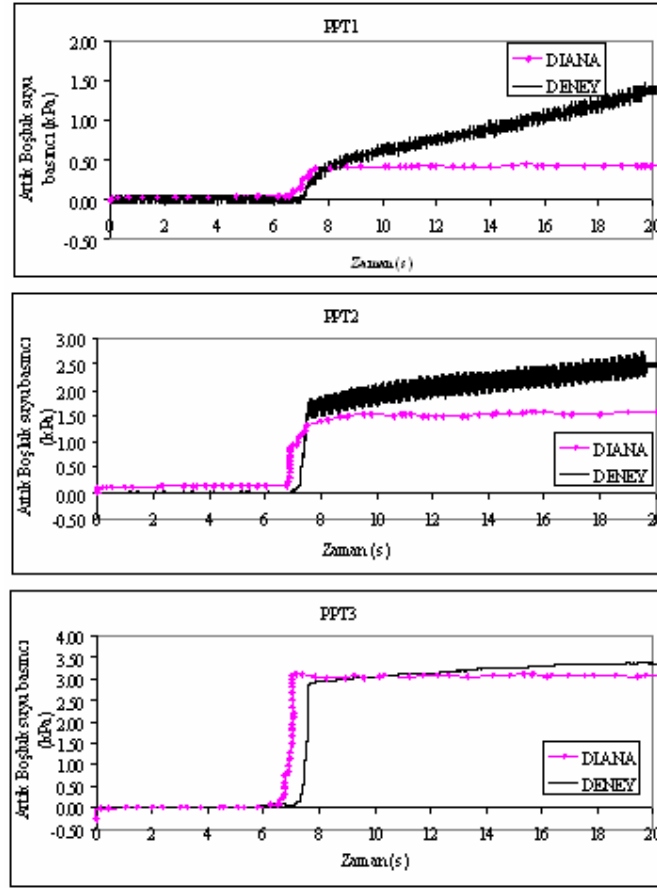
8.3 Nümerik Analiz Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında model deneylerde gözlemlenen davranışı nümerik olarak modelleyebilmek için dinamik analiz yapabilen DIANA programından faydalanılmıştır. Nümerik analizlerde plastisite teorisine dayalı, iki boyutlu ve drenajsız zemin koşullarında sıvılaşma analizleri için geliştirilmiş Towhata-Iai bünye modeli kullanılmış olup, modelde zeminde sıvılaşma sırasında kayma deformasyonlarının ve hacimsal deformasyonların birlikte olduğu varsayılmaktadır. Modelde asal gerilme eksenini rotasyonunun efektif gerilmeler üzerindeki etkisi, anizotropik konsolidasyon etkisi ve zeminin yüklenme tarihçesi dikkate alınabilmektedir.

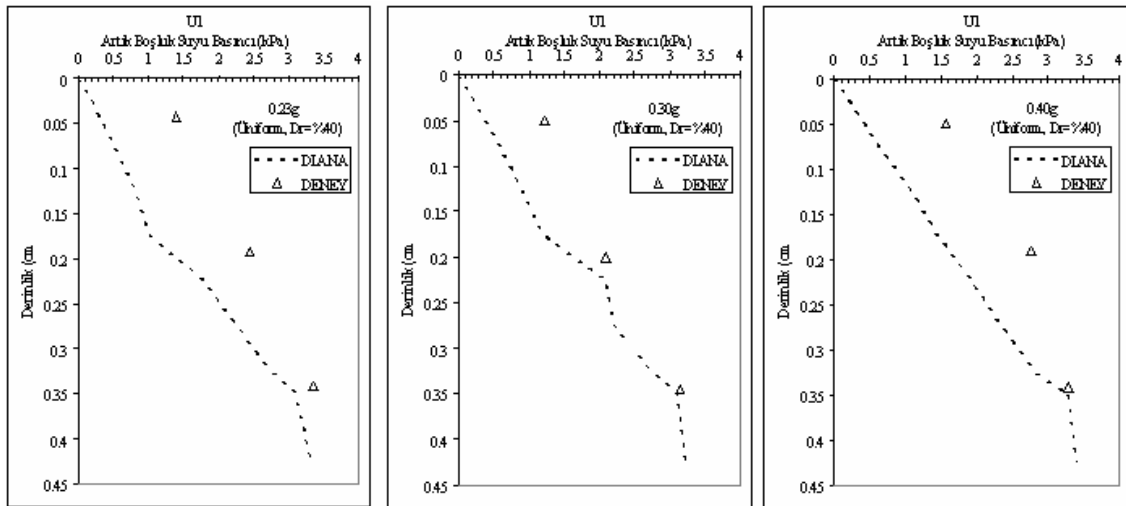
Suya doymuş kum tabakalarının sıvılaşma davranışını analiz etmek için kullanılan Towhata-Iai bünye modeli'nde geçen malzeme parametrelerinin sağlıklı olarak seçilebilmesi amacı ile DIANA programı ile gerçekleştirilen bir parametrik çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Model deneylerde kullanılan kum ve geçerli efektif gerilme seviyeleri için, bünye modelinde yer alan sıvılaşma parametrelerinden W_1 , P_1 ve C_1 için seçilen değerlerin artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinde etkili olduğu, S_1 ve P_2 parametrelerinin ise önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Özet olarak, W_1 ve P_1 parametrelerinin değerleri büyüdükçe hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı, bu parametreler için daha küçük değer kullanılması durumunda ise artık boşluk suyu basınçlarında artış meydana

geldiği görülmektedir. C_1 parametresinin ise elastik şekil değiştirme seviyelerinin aşılmasından sonra artık boşluk suyu basıncı oluşmasını sağlayan bir sınır değer işlevine sahip olduğu ve artık boşluk suyu basıncı artışlarının başlaması aşamasında etkili olduğu belirlenmiştir. Parametrik çalışma sonucunda elde edilen bilgiler ışığında, kumun sıklık derecesine göre seçilen malzeme parametreleri kullanılarak, farklı sıklık derecelerine sahip diğer laboratuvar model deneyleri için nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde, sıklık derecesine bağlı olarak seçilen malzeme parametreleri kullanılarak, Wildlife Sıvılaşma Alanı test sahasında Superstition Hill depreminde gözlenen arazi davranışı ve VELACS projesi kapsamında bir gevşek kum tabakası üzerinde gerçekleştirilen santrifüj model deneyi DIANA sonlu elemanlar programı ile analiz edilerek sonuçları gözlenen davranış ile karşılaştırılmıştır.

Parametrik analiz çalışmaları sonucunda sıklık derecesine bağlı olarak belirlenen sıvılaşma parametreleri kullanılarak suya doymun uniform kum kolonları, silt ara katmanlı kum kolonları ve farklı sıklıklarda hazırlanmış tabakalı kum kolonları üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar model deneyleri nümerik olarak modellenmiş ve deneysel olarak elde edilen artık boşluk suyu basıncı ölçümleri ile nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 8.12’de örnek olarak %40 rölatif sıklıkta üniform kum kolonunun 0.23g ivme genliğinde dinamik yüklemeler etkisinde davranışının analizinden elde edilen artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimleri, Şekil 8.13’de ise 0.23g, 0.30g ve 0.40g şiddetinde sarsıntılar etkisinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.12 %40 rölatif sıkılıkta kum kolonu modeli için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

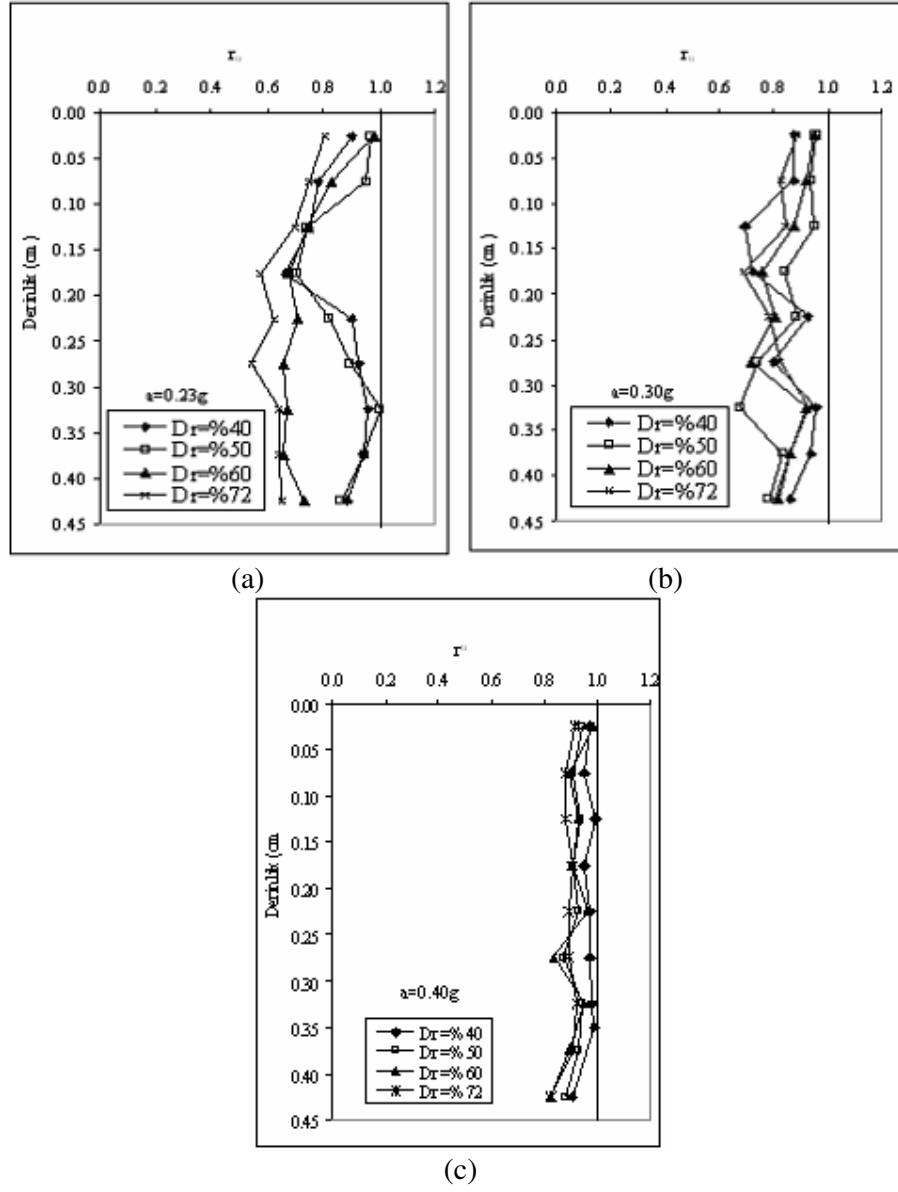


Şekil 8.13 $D_r=\%40$ sıkılıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

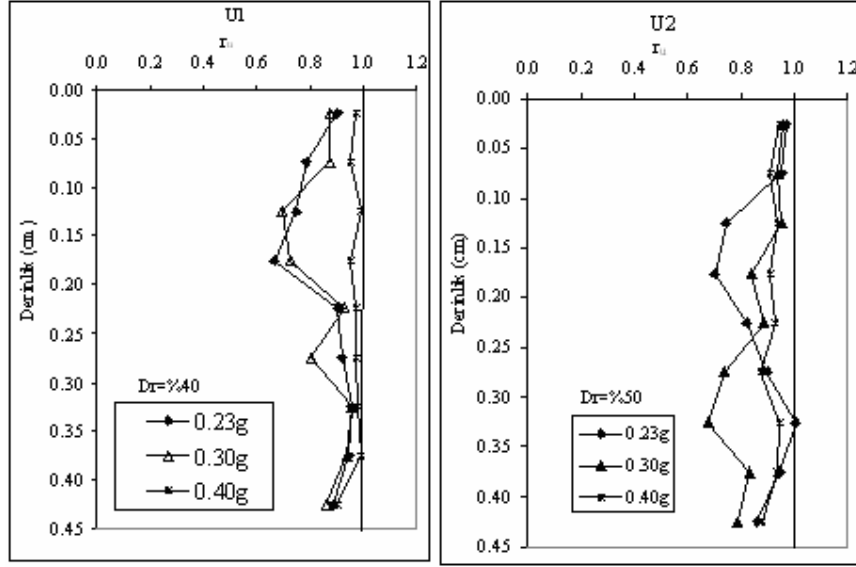
Nümerik analiz sonucunda elde edilen artık boşluk suyu basıncı oluşum grafikleri toplu olarak incelendiğinde, parametrik analiz sonucunda belirlenen malzeme parametreleri kullanılarak hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının deney sonuçları ile genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Buna karşın, bazı modellerde, en üst seviyede yer alan PPT1 sensörünün bulunduğu derinlikteki deneysel ölçümler ile nümerik analiz sonuçlarının iyi uyumlu olmadığı gözlenmiştir. Bunun muhtemelen bu derinlikteki sensörün yüzeye çok yakın olmasından ve kum kolonlarının hazırlanması sırasında üst tabakanın amaçlanandan daha gevşek kalmasından kaynaklanan deneysel hatalardan ve/veya boşluk suyunun zemin yüzeyine doğru hareketi sırasında sızıntı basınçlarının etkisi ile daha yüksek artık boşluk suyu basınçları oluşmasının nümerik modelde dikkate alınamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, artık boşluk suyu basınçları sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaşıncaya bünye modelinin yetersiz kalmasının da bir başka neden oluşturması beklenebilir. Nümerik analiz sonuçları ile deneysel boşluk suyu basıncı ölçümleri arasında uyumun yetersiz olduğu gözlenen diğer bazı deneylerin ise üst tabakanın gevşek ($D_r = \%40$), alt tabakanın daha sıkı ($D_r = \%72$ ve $\%60$) olduğu bazı tabakalı kum kolonu model deneyleri olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ise kullanılan malzeme parametrelerinin maksimum artık boşluk suyu basıncına ulaşıldıktan sonra kumun dilatasyon davranışını iyi modelleyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

8.3.1 Kumun sıklık derecesinin ve sarsıntı şiddetinin etkisi

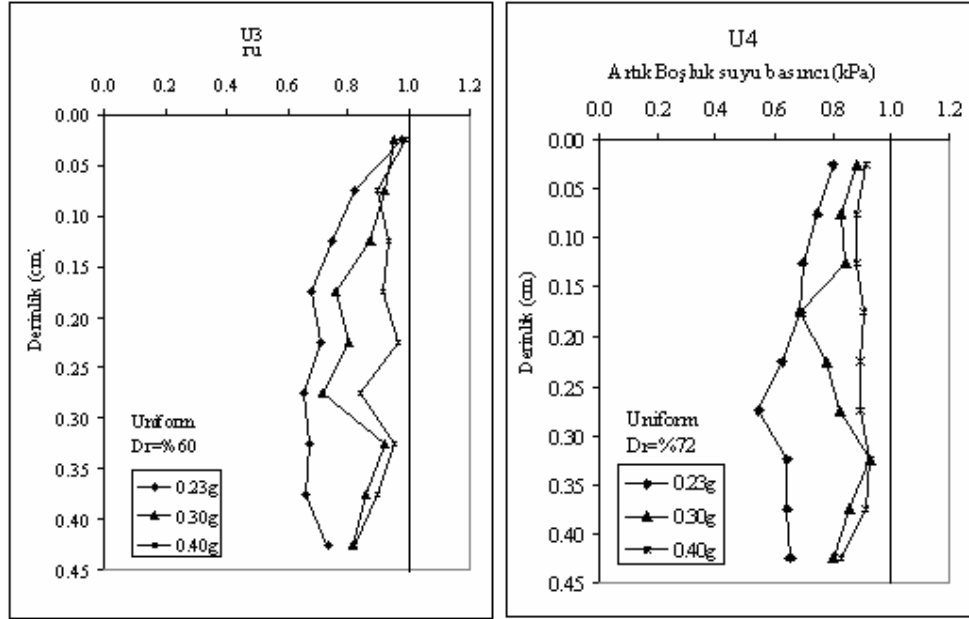
Model deneylerin nümerik analizinden hesap edilen artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddetine ve rölatif sıklığa bağlı olarak derinlikle değişimleri farklı sarsıntı şiddetlerine maruz bırakılmış uniform kum kolonları için, Şekil 8.14 ve Şekil 8.15’de gösterilmektedir. Şekillerde gösterilen grafiklerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının genel olarak rölatif sıklık arttıkça azaldığı, sarsıntı şiddeti arttıkça ise arttığı görülmektedir.



Şekil 8.14 Farklı rölatif sıklıklarda hazırlanmış uniform kum kolonları üzerinde uygulanan farklı ivme genliklerinde nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi



Şekil 8.15a %40 ve %50 rölatif sıkılıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

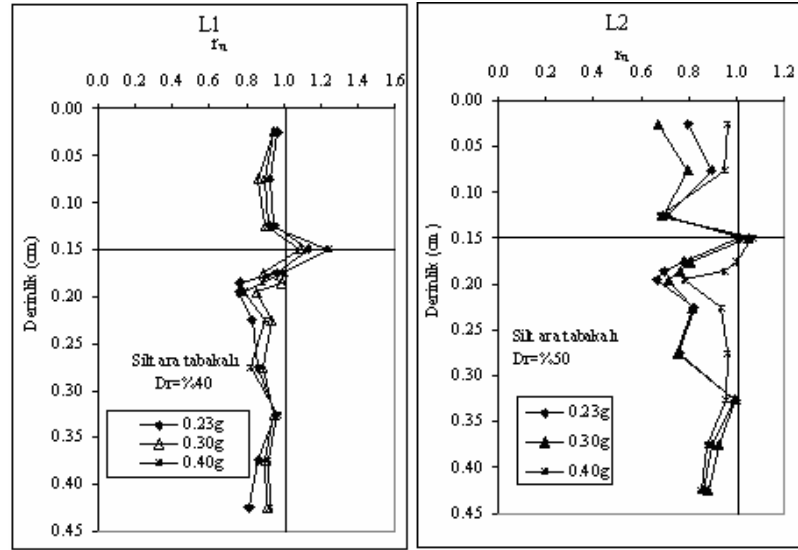


Şekil 8.15b %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda uniform kum kolonlarında nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

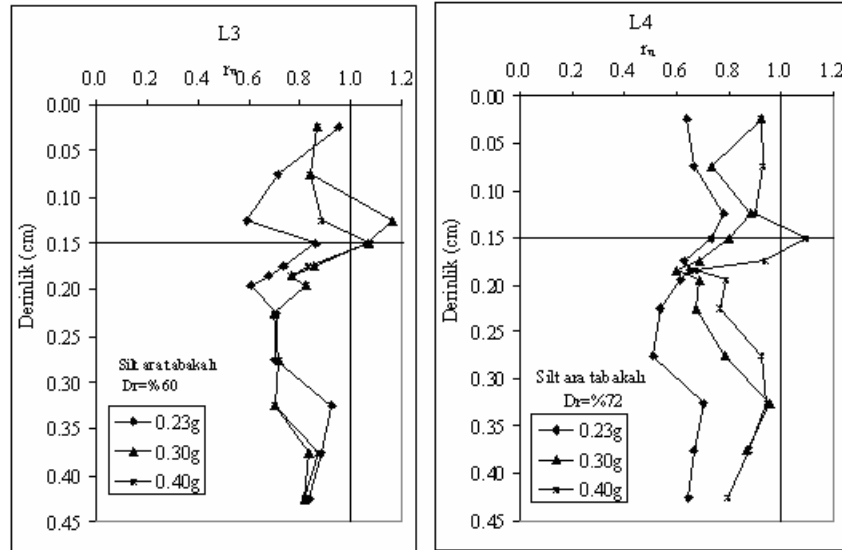
8.3.2 Kum kolonu içinde silt ara tabakası bulunmasının etkileri

Kum tabakaları içinde rastlanabilecek daha az geçirgen ara tabakaların kum tabakalarının sıvılaşma davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile gerçekleştirilen silt ara tabakalı kum kolonlarından oluşan model deneylerin dinamik davranışının nümerik olarak

modellenmesi ile hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle ve sarsıntı şiddeti ile değişimleri Şekil 8.16'da gösterilmiştir. Grafiklerden, silt ara tabakasının olduğu seviyede belirgin bir boşluk suyu basıncı artışı olduğu, artan ivme şiddeti ile birlikte daha büyük boşluk suyu basınçları oluştuğu ve sıkılık derecesinin daha yüksek olduğu kum kolonlarında silt tabakasının mevcudiyetinin ve uygulanan sarsıntının ivme genliğinin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu daha sıkı kum kolonlarında silt ara tabakası üzerindeki kesimde hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşmaya yol açacak mertebelerde, alt kesimlerde ise daha düşük kaldığı gözlenmektedir.

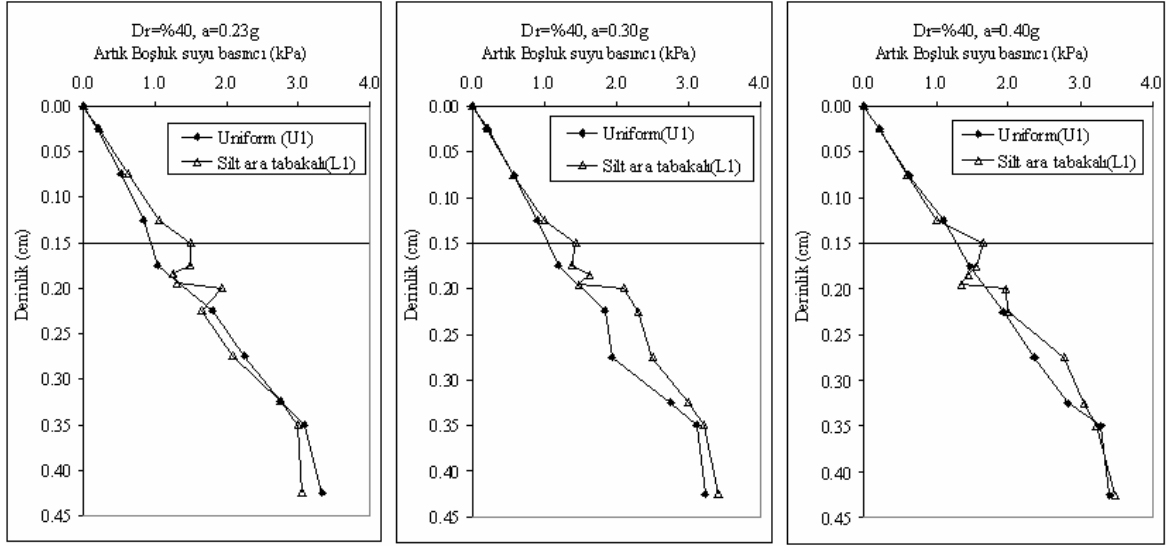


Şekil 8.16a %40 ve %50 rölatif sıkılıklarda silt ara tabakalı kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

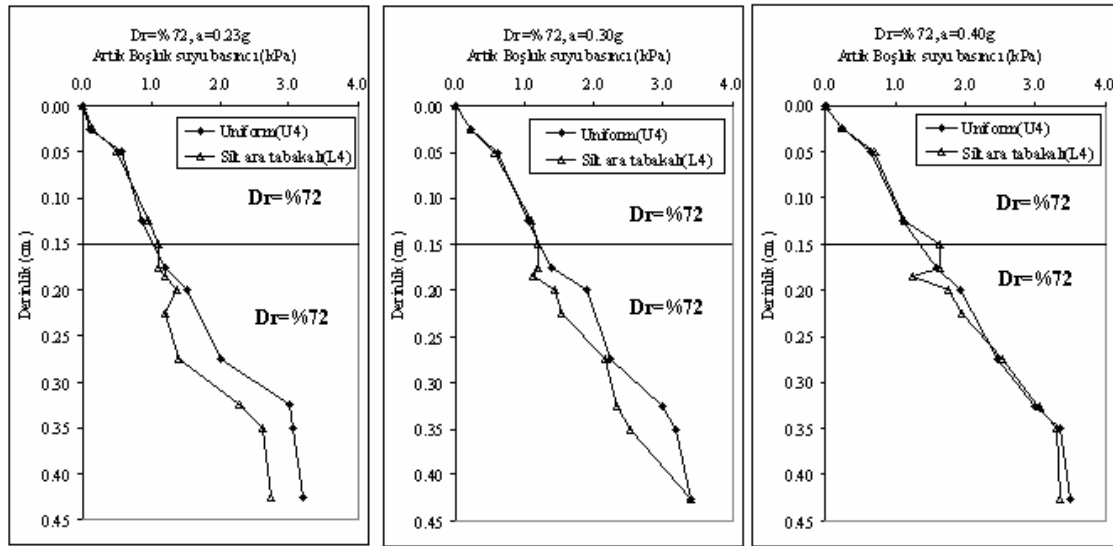


Şekil 8.16b. %60 ve %72 rölatif sıkılıklarda silt ara tabakalı kum modellerinin nümerik analizinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının farklı sarsıntı şiddetleri etkisinde derinlikle değişimi

Silt ara tabakasının dinamik davranış üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek amacı ile, silt ara tabakası içeren ve içermeyen %40 ve %72 rölatif sıkılıkta kum kolonlarının nümerik analizinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri Şekil 8.17 ve Şekil 8.18’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



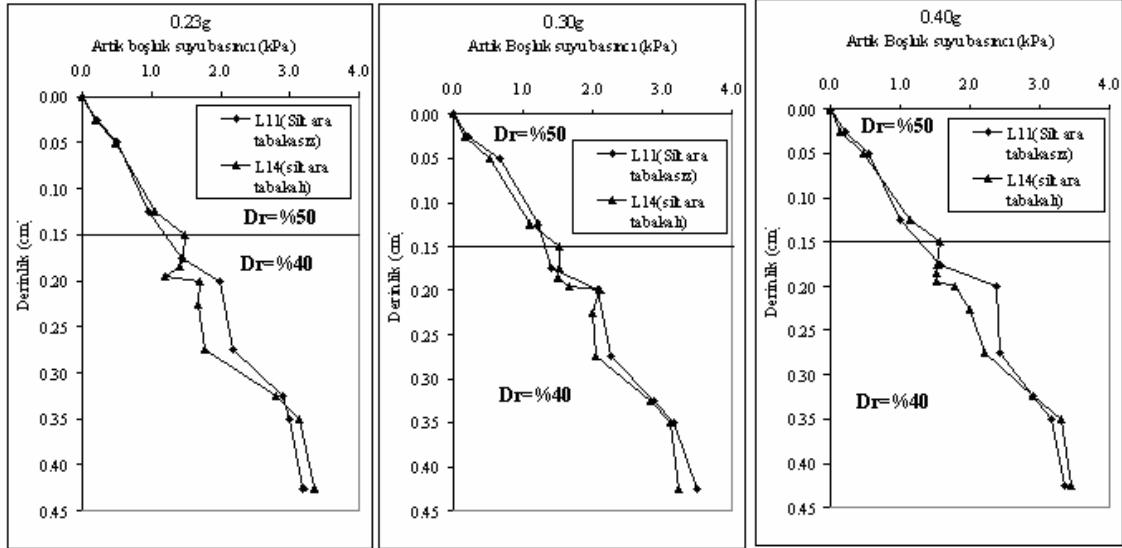
Şekil 8.17 $Dr=\%40$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi



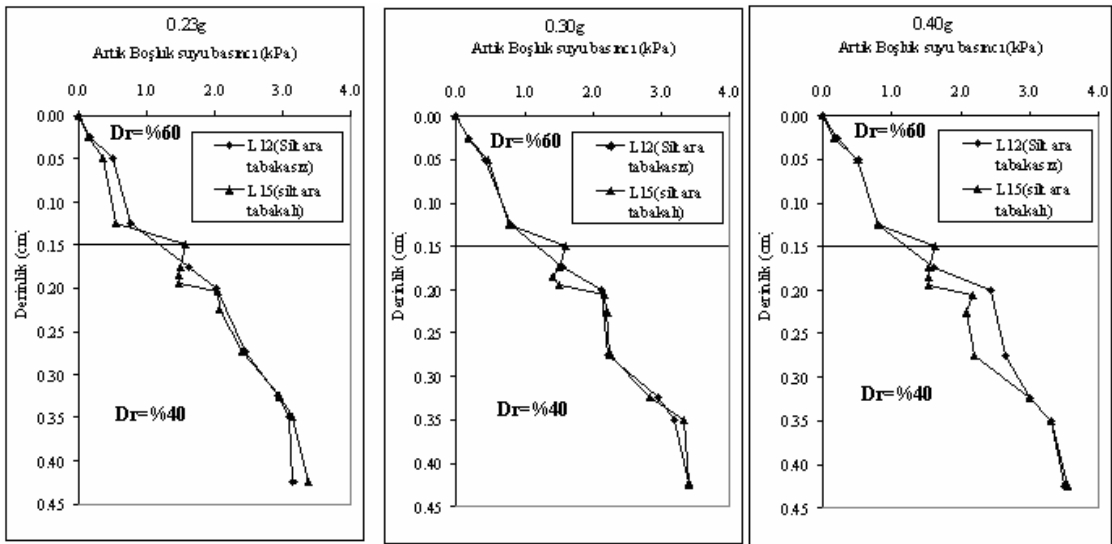
Şekil 8.18 $Dr=\%72$ rölatif sıkılıkta uniform ve silt ara tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

Ayrıca, gevşek bir kum tabakası üzerinde yer alan daha sıkı bir kum tabakasından oluşan ve arasında ince bir silt tabakası içeren veya içermeyen tabakalı kum zeminlerin dinamik davranışları nümerik olarak analiz edilmiş ve hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarının

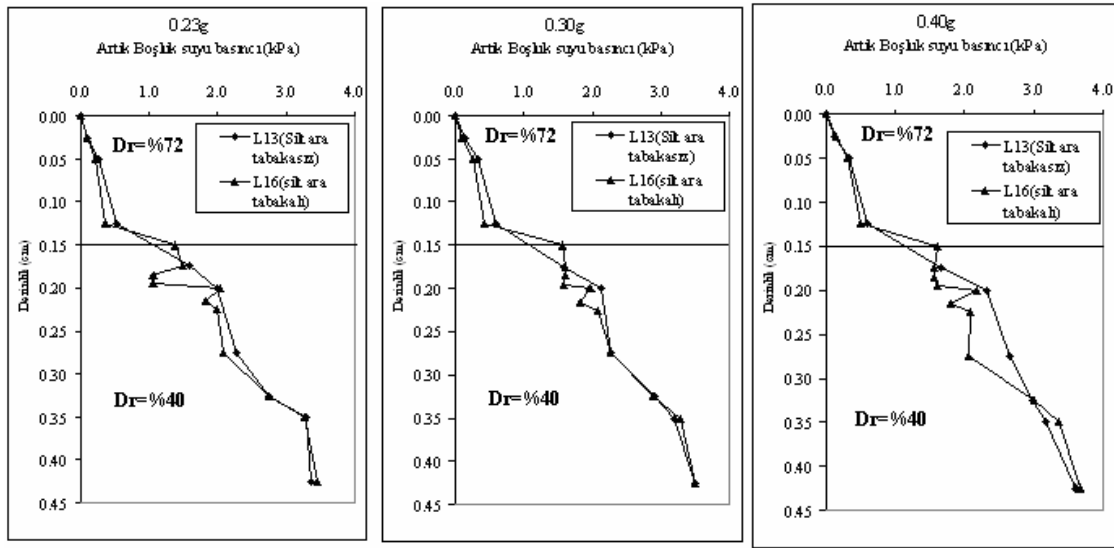
derinlikle değişimleri farklı sarsıntı şiddetleri için Şekil 8.19, Şekil 8.20 ve Şekil 8.21 'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu tabakalı kum kolonları için hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle ve sarsıntı şiddeti ile değişimleri ise Şekil 8.22'de gösterilmiştir.



Şekil 8.19 Dr=%50/Dr=%40 tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

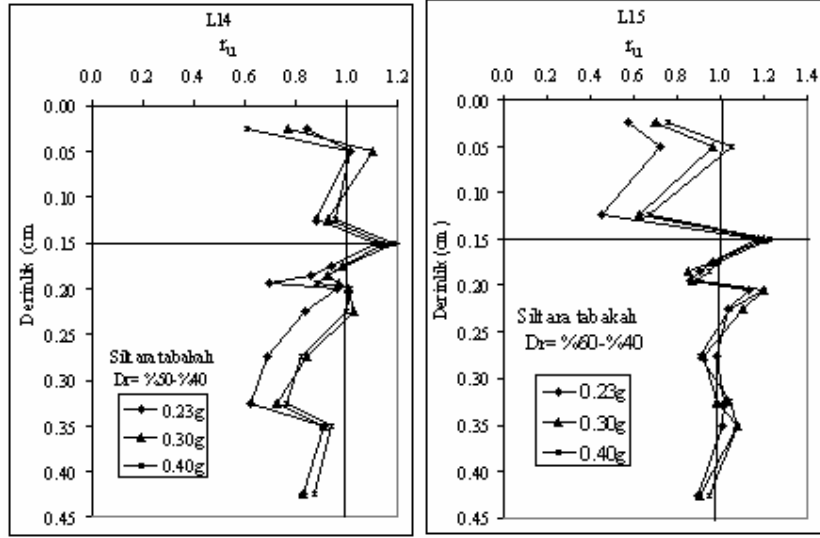


Şekil 8.20 Dr=%60/Dr=%40 tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

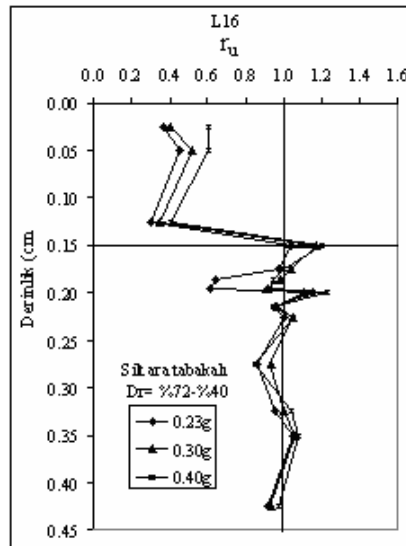


Şekil 8.21 $Dr=72\%/Dr=40\%$ tabakalı kum kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi

Şekillerde verilen grafiklerden görüldüğü gibi silt ara tabakası içermeyen kum kolonları için hesaplanan artık boşluk suyu basınçları derinlikle düzenli bir şekilde artmakta iken, silt ara tabakalı modellerde silt tabakası altında artık boşluk suyu basıncında genel olarak bir miktar ani artış olduğu görülmektedir. Altaki gevşek tabakada oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının silt tabakasının mevcudiyetinden ve üstteki tabakanın sıkılık derecesinden fazla etkilenmediği görülmektedir. Ayrıca, silt tabakasının mevcudiyetinin üstteki daha sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde belirgin bir azaltıcı etkisi olduğu görülmektedir. Artan ivme şiddetinin artık boşluk suyu basıncı oranı üzerindeki etkisi sıkı kum tabakasından oluşan üst kesimlerde daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, silt ara tabakalı modellerin nümerik analiz sonuçları silt ara tabakasının etkisi yönünden deneysel sonuçlarda gözlemlenen davranışı yeterince yansıtamamıştır. Bu durumun silt ara tabakası kalınlığının 1cm gibi oldukça ince bir tabaka olması ve sonlu elemanlar analizinde çok iyi modellenememesinden kaynaklanabileceği düşünülebilir. Ayrıca, kuma göre geçirimsizliği daha az olan bu ince tabakanın permeabilitesinin nümerik modelde dikkate alınabilmesi gerekirken, kullanılan Towhata-Iai bünye modeli zeminin geçirgenliği ile ilişkili bir malzeme parametresi içermemekte ve nümerik analizde sadece drenajsız koşullar göz önüne alınabilmektedir.



Şekil 8.22a ($Dr= \%50\text{-}\%40$) ve ($Dr= \%60\text{-}\%40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

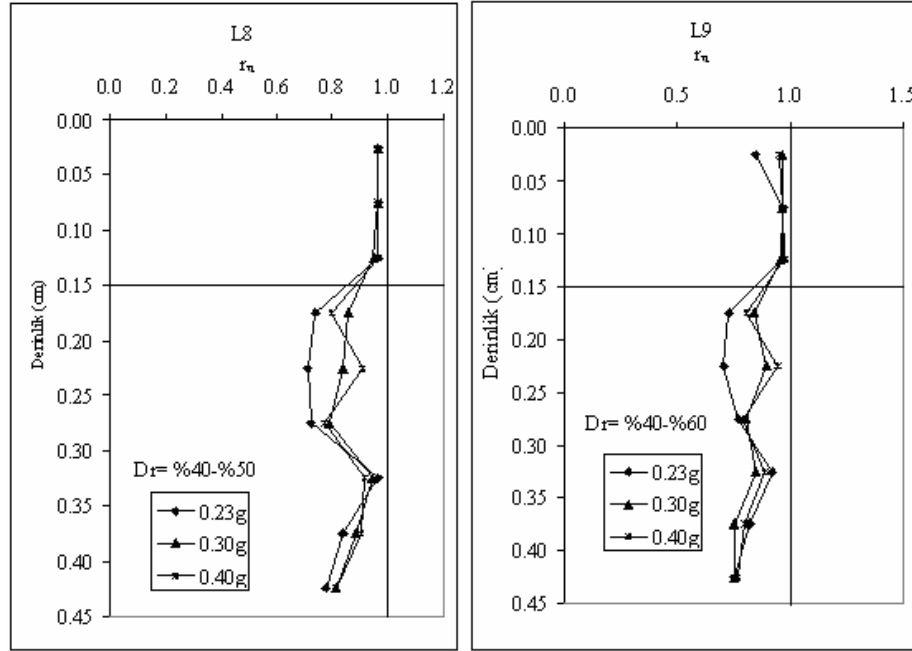


Şekil 8.22b ($Dr= \%72\text{-}\%40$) silt ara tabakalı model deneylerinde nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

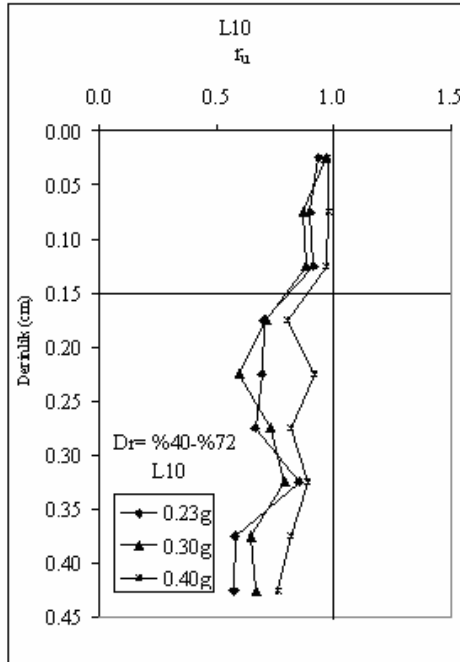
8.3.3 Tabakalı kum kolonlarının dinamik davranışı

Farklı sıklıklarda tabakalardan oluşan kum kolonlarının davranışını incelemek için üst tabakanın alt tabakaya göre daha gevşek veya daha sıkı olduğu kum kolonlarından oluşan model deneylerinin davranışı nümerik olarak analiz edilmiştir. Şekil 8.23’de üstte yer alan %40 rölatif sıklıktaki bir tabaka altında daha sıkı tabakalardan oluşan kum kolonları için hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi gösterilmiştir.

Üstteki gevşek tabakada oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının bütün sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaştığı ve alt tabakanın sıklık derecesinden pek fazla etkilenmediği görülmektedir.

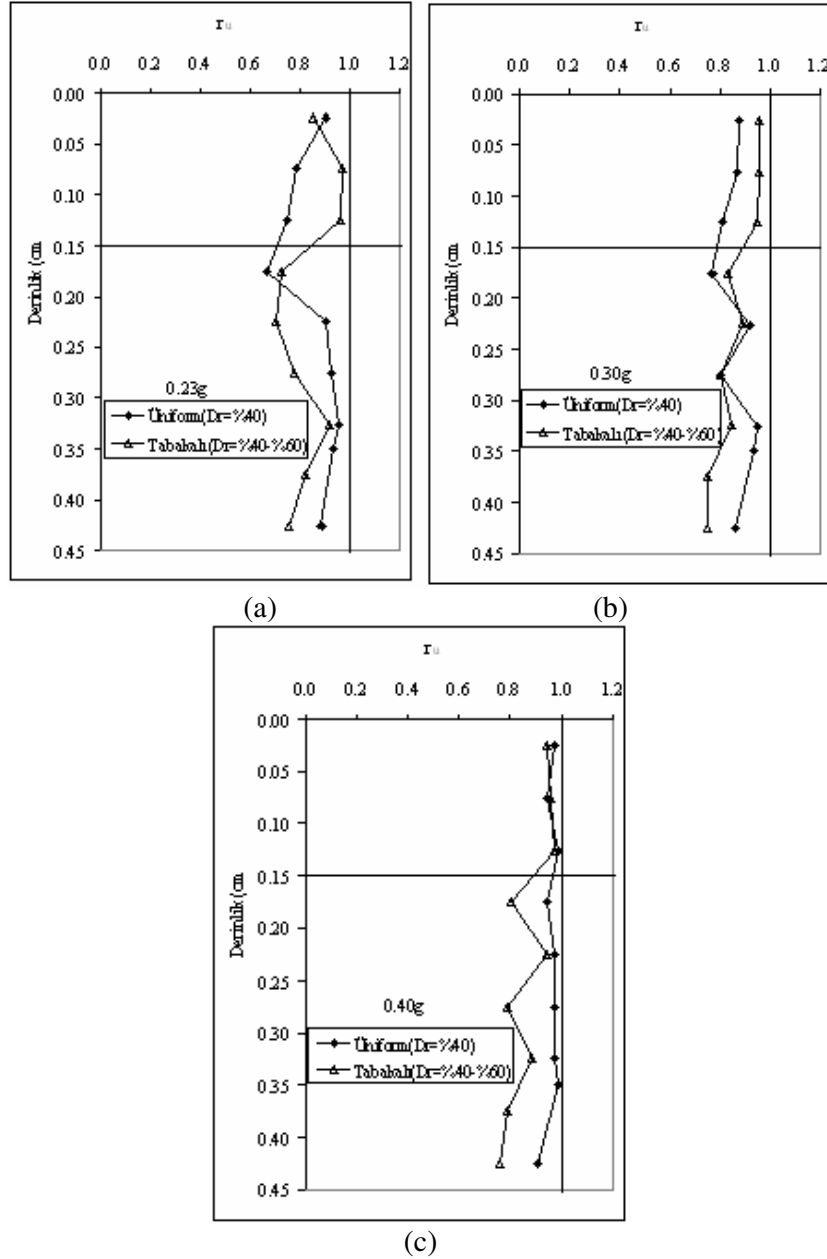


Şekil 8.23a. Tabakalı kum kolonu ($D_r = \%40/\%50$ ve $D_r = \%40/\%60$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 8.23b. Tabakalı kum kolonu ($D_r = \%40/\%72$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

Bu durum gevşek kum tabakası ($Dr=\%40$) altında daha sıkı ($Dr=\%60$) bir tabakanın yer aldığı zemin koşullarının dinamik davranış analizlerinden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle ve sarsıntı şiddeti ile değişimlerini, $\%40$ rölatif sıkılığa sahip üniform sıkılıkta gevşek bir kum tabakası için hesaplanan değişimlerle birlikte gösteren Şekil 8.24'de de gözlenmektedir.

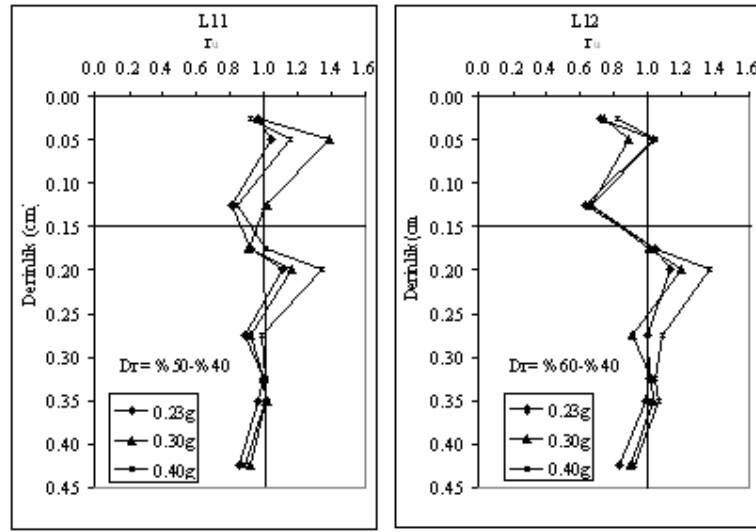


Şekil 8.24 Tabakalı ($Dr=\%40/Dr=\%60$) ve üniform kum ($Dr=\%40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

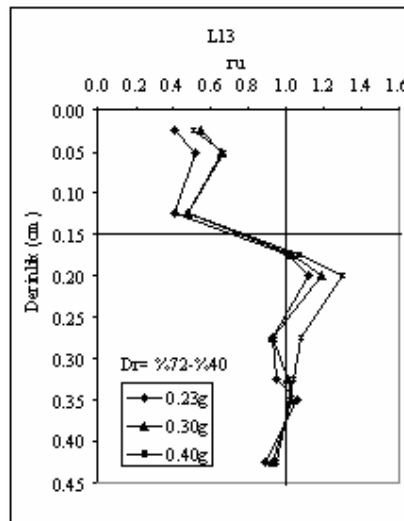
Şekil 8.24'de görüldüğü gibi üstte yer alan $\%40$ rölatif sıkılıktaki tabakada oluşan boşluk suyu basıncı artışlarının, tabakalı kum zeminlerin model deney sonuçları için yapılan benzer karşılaştırmaların aksine, alt tabakanın sıkılık derecesinden fazla etkilenmediği ve uygulanan

bütün sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaştığı ve kum kolonunun tümüyle $D_r=40\%$ sıklıkta olmasından daha olumsuz bir durum oluşturduğu gözlenmektedir. Üst tabakaya göre daha sıkı olan alt tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları kum kolonunun tümü ile 40% rölatif sıklıkta olması durumundaki artık boşluk suyu basınçları ile karşılaştırıldığında ise, beklenildiği gibi genel olarak sıklık derecesi arttıkça artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı görülmektedir.

Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı kum tabakalarının yer aldığı kum kolonları için dinamik yüklemeler sırasında oluşacağı hesaplanan artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimleri Şekil 8.25’de gösterilmiştir.

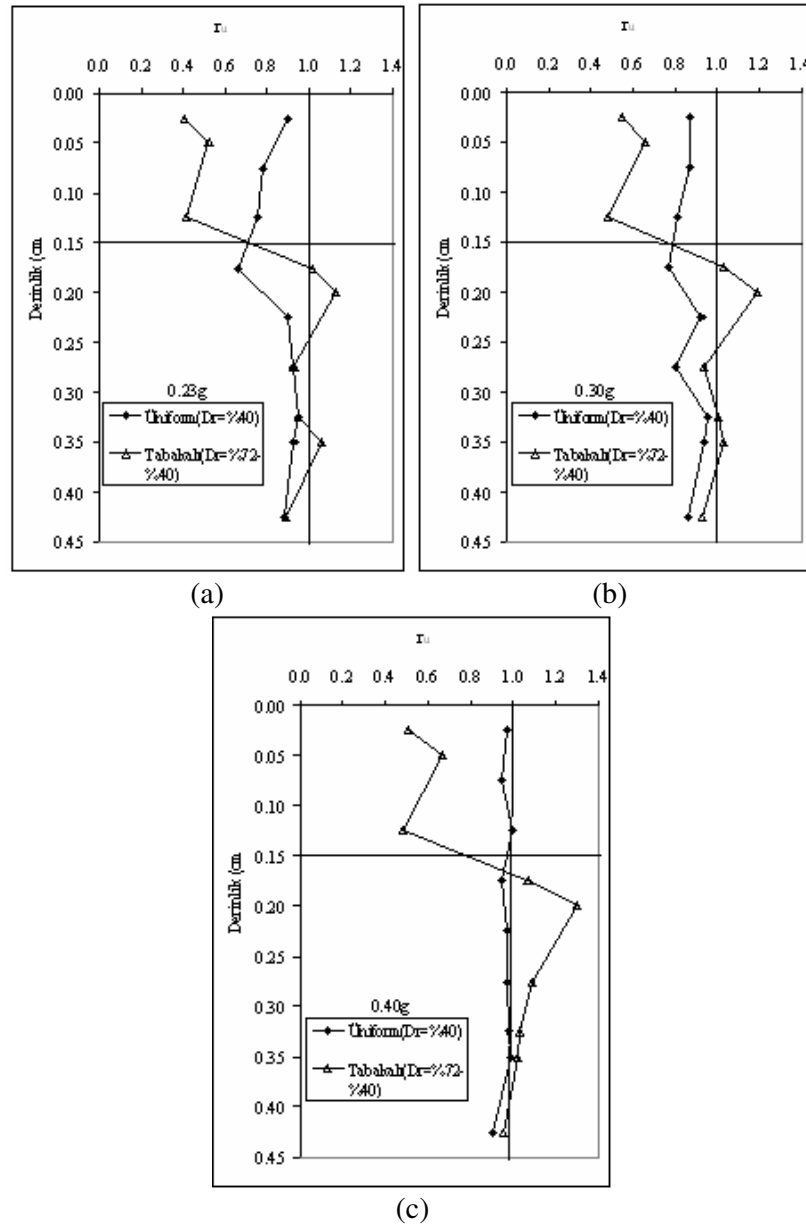


Şekil 8.25a. Tabakalı kum kolonu ($D_r=50\%/40\%$ ve $D_r=60\%/40\%$) model deneyleri için nümerik analizden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi



Şekil 8.25b. Tabakalı kum kolonu ($D_r=72\%/40\%$) model deneyleri için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının sarsıntı şiddeti ve derinlikle değişimi

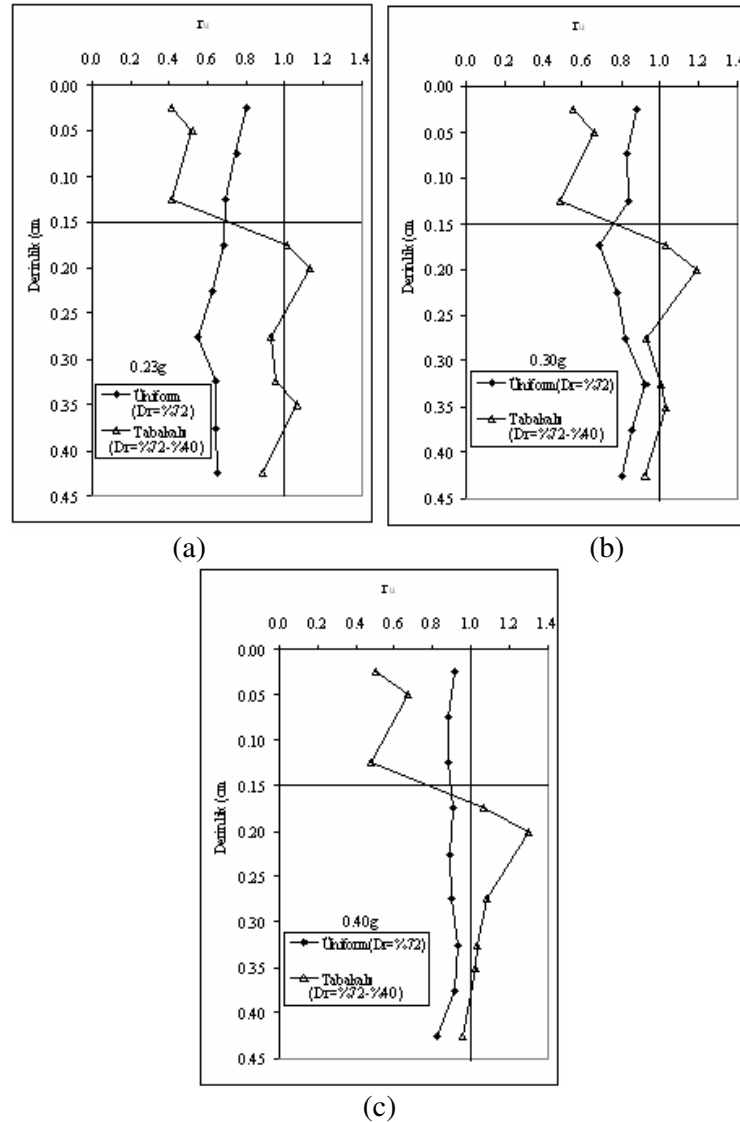
Şekil 8.25’de gösterilen grafiklerden artık boşluk suyu basınçlarının artan ivme genliği ile genel olarak artan bir eğilimde olduğu ve üstte daha sıkı bir tabakanın mevcudiyetinin alt tabakada oluşan boşluk suyu basınçları üzerinde artırıcı yönde etkisi olduğu, bunun yanında alttaki gevşek tabakanın üstte yer alan daha sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 8.26’da gevşek bir kum tabakası ($D_r=\%40$) üstünde sıkı ($D_r=\%72$) bir tabakadan oluşan kum kolonu için nümerik analiz sonucu hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranının derinlikle ve sarsıntı şiddeti ile değişimi üniform sıkılıkta gevşek ($D_r=\%40$) bir kum tabakası için hesaplanan değişimlerle birlikte gösterilmiştir.



Şekil 8.26 Tabakalı ($D_r=\%72/D_r=\%40$) ve üniform kum ($D_r=\%40$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Şekil 8.26'dan üstte yer alan daha sıkı tabakanın mevcudiyetinin alt tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını arttırıcı yönde etkilediği ve alttaki gevşek tabakanın ise fiziksel model deneylerinde gözlemlenenin aksine, üstte yer alan daha sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde etkisi olduğu görülmektedir.

Altta yer alan gevşek kum tabakasının üstteki sıkı kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerindeki etkisi, alt tabakanın gevşek ($Dr=\%40$), üst tabakanın ise sıkı ($Dr=\%72$) olduğu tabakalı kum kolonları ile $\%72$ rölatif sıkılık derecesine sahip uniform kum kolonları için hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle ve sarsıntı şiddeti ile değişimlerinin gösterildiği Şekil 8.27'de daha iyi görülmektedir. Alttaki gevşek tabakanın, üstte yer alan sıkı tabakada oluşan boşluk suyu basınçları üzerindeki azaltıcı yönde etkisi açık olarak görülmektedir.



Şekil 8.27 Tabakalı ($Dr=\%72/Dr=\%40$) ve üniform kum ($Dr=\%72$) kolonları için nümerik analizlerden hesaplanan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının derinlikle değişimi

Nümerik analizlerin sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde, 45 cm yüksekliğinde olan model deneyi kum kolonlarında derinlik boyunca efektif gerilme seviyesinin oldukça düşük olmasından dolayı, uygulanan titreşimli yükler etkisinde oluşan maksimum artık boşluk suyu basıncı oranlarının özellikle gevşek kum kolonlarında tüm tabakada sıvılaşmaya yol açacak seviyelere yaklaştığı ve derinlikle çok fazla değişmediği görülmüştür. Arazide 20m kalınlıkta bir kum tabakası için yapılan analizlerde ise r_u değerinin beklenildiği gibi derinlikle azaldığı görülmüştür. Üst tabakanın gevşek, alt tabakanın sıkı ve orta sıkı yerleşimde olduğu tabakalı kum kolonlarında ise, üstteki gevşek kesimlerde sarsıntı şiddetinin etkisi belirgin bir şekilde görülmezken, sıkı ve orta sıkı yerleşime sahip alt kesimlerde sarsıntı şiddeti arttıkça artık boşluk suyu basınçlarındaki artışın daha belirgin olduğu gözlenmiştir.

Model deneylerde bir çok deneyde $r_u > 1.0$ olan artık boşluk suyu basıncı oranı değerleri ölçülürken nümerik analizlerde hesaplanan r_u değerlerinin genellikle 1.0 değerini pek aşmadığı görülmüştür. Bunun iki nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Birincisi, model deneylerde en üst seviyede ölçülen artık boşluk suyu basınçlarının kum kolonunda yüzeye doğru oluşan su akımından etkilenmesinin drenajsız koşulların dikkate alındığı nümerik modelde dikkate alınmamasından, ikinci nedeni ise nümerik modelde sıvılaşma sonrası ($r_u > 1.0$) durumun modellenememesi olduğuna inanılmaktadır.

Suya doymun üniform ve tabakalı kum zeminlerde sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışın incelendiği bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve nümerik modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar toplu olarak değerlendirilerek, dinamik yüklemeler etkisinde kumlarda artık boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinde sıklık derecesinin, sarsıntı şiddetinin ve tabakalı zemin durumunun etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Model deneyler ve nümerik analiz çalışmalarından elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Bir deprem sırasında tekrarlı yükler etkisi ile sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasında rölatif sıklığın ve sarsıntı şiddetinin önemli rol oynadığı bilinmektedir. Bu amaçla, farklı sıklıklarda hazırlanmış üniform kum kolonları üzerinde üç farklı ivme genliğine sahip dinamik yüklemeler altında model deneyler gerçekleştirilmiş ve bu model deneyler nümerik olarak modellenmiştir. Üniform kum kolonlarında model deneylerden ve nümerik analizlerden belirlenen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının genel olarak rölatif sıklık arttıkça azaldığı, sarsıntı şiddeti arttıkça ise arttığı görülmüştür. Sarsıntı şiddetinin artık boşluk suyu basıncı oranları üzerindeki etkisi model deneylerde daha belirgin olarak gözlenirken, nümerik analizlerde

birbirine yakın sıklık derecesine sahip kum kolonlarında yakın değerlerde artık boşluk suyu basınçları hesap edilmiştir. Yüksek sarsıntı şiddeti etkisinde gerek model deney sonuçları gerekse nümerik analiz sonuçları bütün sıklık derecelerinde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşmaya yol açacak mertebelerde olduğunu göstermiştir.

2. Alt ve üst tabakanın farklı rölatif sıklıklarda olduğu tabakalı kum zeminlerin depremler sırasında dinamik davranışını incelemek için gerçekleştirilen model deneyler ve nümerik analizler ise tabakalı kum zeminlerde oluşan artık boşluk suyu basınçlarının rölatif sıklığa ve sarsıntı şiddetine bağlı değişimlerinin üniform kum kolonlarından farklı olduğunu göstermiştir. Buna göre tabakalı kumlarda gerçekleştirilen model deney ve nümerik analiz sonuçlarının değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.
 - a. Gevşek bir kum tabakası altında daha sıkı bir kum tabakasının yer aldığı tabakalı kum model deney gözlemleri ve nümerik analiz sonuçları, üstteki gevşek tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarının uygulanan tüm sarsıntı şiddetlerinde alt tabakanın sıklık derecesine bağlı olmaksızın sıvılaşmaya yol açacak mertebelere ulaştığını göstermiştir. Üstteki gevşek tabakaya göre daha sıkı olan alt tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarının ise uygulanan ivme genliği ve kumun sıklık derecesi ile beklenen yönde değiştiği ve üstte daha gevşek bir tabaka bulunmasının çok belirgin bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür.
 - b. Gevşek bir kum tabakası üzerinde daha sıkı kum tabakalarının yer aldığı zemin koşullarının modellenmesi amacı ile gerçekleştirilen model deney gözlemleri, alttaki gevşek tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarının üstünde yer alan daha sıkı tabakanın mevcudiyetinden fazla etkilenmediğini, ancak alttaki gevşek tabakanın üstteki sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarını artırıcı yönde etkisi olduğunu göstermiştir. Nümerik analiz sonuçları ise, üstte daha sıkı bir tabakanın mevcudiyetinin alt tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde artırıcı bir etkisi olduğunu, buna karşın alttaki gevşek tabakanın, üstünde yer alan daha sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde rol oynadığını göstermiştir. Deneysel gözlemler ve nümerik analiz sonuçları arasındaki bu uyumsuzluğun deneyler sırasında üstteki sıkı tabakadaki boşluk suyu basınçlarını artırdığı gözlemlenen yukarı yönlü su hareketinin nümerik modelde modellenememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

3. Arazide zemin profili içinde geçirimsizliği kuma göre daha düşük olan zemin tabakalarının bulunması durumunu modellemek için, ince bir silt tabakası içeren üniform sıkılıkta ve tabakalı kum kolonları üzerinde gerçekleştirilen model deney çalışmalarından ve nümerik analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.
- Silt ara tabakalı model deneylerde dinamik yükleme esnasında silt ara tabakası altında uygulanan sarsıntı şiddetine bağlı olarak bir su filmi oluşabildiği gözlenmiştir. Su filmi oluşumunun sarsıntı şiddeti yanında silt tabakası altında yer alan kumun sıkılık derecesinden ve oluşan artık boşluk suyu basıncı oranı değerlerinden etkilendiği gözlenmiştir. Sarsıntı şiddeti arttıkça, su filmi kalınlığının arttığı, ancak yüksek sarsıntı şiddetlerinde su filminin yüzeye doğru hareket ederek kaynamaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Silt ara tabakalı kum kolonlarının dinamik davranış analizlerinde ise su filmi oluşumu modellenememekle birlikte, silt ara tabakası altında hesaplanan artık boşluk suyu basınçlarında genel olarak bir miktar artış olduğu görülmüştür. Bu artışın büyüklüğünün sarsıntı şiddeti arttıkça genel olarak arttığı ve model deneylerde gözlemlendiği gibi gevşek ve orta sıkı kum kolonlarında daha fazla olduğu, sıkı kum kolonlarında ise aynı sıkılıktaki üniform kum kolonlarında hesaplanan değerlere yakın olduğu görülmüştür.
 - Üniform sıkılıkta hazırlanmış silt ara tabakalı model deneylerde genel olarak dinamik yüklemeler etkisinde oluşan artık boşluk suyu basıncı oranlarının sarsıntı şiddeti arttıkça arttığı, rölatif sıkılık arttıkça ise azaldığı gözlenirken, düşük sıkılıktaki kumlarda uygulanan tüm ivme genliklerinde artık boşluk suyu basınçlarının sıvılaşmaya yol açacak değerlere ulaştığı gözlenmiş, daha sıkı yerleşimli kum kolonlarında ise artık boşluk suyu basınçları üzerinde ivme genliğinin etkisi daha açık olarak görülmüştür. Gerek model deney çalışmaları gerekse nümerik analiz sonuçları, silt ara tabakasının silt tabakası üzerindeki kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarını azaltıcı yönde rol oynadığını göstermiştir.
 - Silt ara tabakasının üstünde gevşek, altında ise daha sıkı kum tabakalarının bulunduğu model deney gözlemleri ve nümerik analiz sonuçlarından silt tabakası altındaki kum tabakasında sarsıntı şiddeti arttıkça daha yüksek boşluk suyu basınçları oluştuğu, kumun sıkılık derecesi arttıkça da oluşan artık boşluk suyu basınçlarının azaldığı, üst kum tabakasında ise oluşan artık boşluk suyu basınçlarının tüm sarsıntı şiddetlerinde sıvılaşmaya yol açacak mertebelerde olduğu görülmüştür.

- d. Silt tabakasının üstünde sıkı, altında ise gevşek kum tabakaları bulunan tabakalı kum zeminlerin modellendiği model deney çalışmalarında, silt ara tabakası altında bir su filmi oluştuğu, nümerik analiz sonuçları ise silt ara tabakası altında büyüklüğü sarsıntı şiddeti ile artan bir miktar ani boşluk suyu basıncı artışları meydana geldiğini göstermiştir. Model deneylerde üstte yer alan sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde silt ara tabakasının etkisi belirgin olarak gözlenmemiş olmasına karşın, nümerik analiz sonuçları silt ara tabakasının mevcudiyetinin üstteki daha sıkı tabakada oluşan artık boşluk suyu basınçları üzerinde azaltıcı bir etkisi olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan model deneyler silt ara tabakasının, alttaki gevşek kum tabakasında oluşan artık boşluk suyu basınçlarında artışa yol açtığını gösterirken nümerik analizler ise bir etkisi bulunmadığını göstermiştir.

Gerçekleştirilen deneysel gözlemlerin ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçların tabakalı kumlarda dinamik yüklemeler etkisinde boşluk suyu basıncı artışları ve sıvılaşmanın oluşumunun anlaşılması bakımından oldukça yol gösterici olduğu düşünülmektedir. Tabakalı kum kolonlarının sıvılaşma davranışı üzerinde, rol oynayan etkenleri ve mekanizmaları daha iyi araştırabilmek amacı ile, rijit duvar etkisinin azaltıldığı ve daha yüksek gerilme seviyeleri altında deney yapma imkanı veren bir deney sistemi ile deneysel araştırmalar yapılmasının ve sonuçların karşılaştırılmasının, ayrıca tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş model deneylerin farklı bünye modelleri ile iki boyutlu ve üç boyutlu olarak modellenerek sonuçlarının karşılaştırılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Nümerik analiz sonuçlarının kuvvetli depremler sırasında arazide kaydedilecek boşluk suyu basıncı ölçümleri ile karşılaştırılmasının çok yararlı olacağı açıktır.

KAYNAKLAR

- Adalier, K., (1992), “ Post-Liquefaction Behavior of Soil Systems.” Rep. Dept. of Civil Engineering and also MS Thesis dissertation, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y.
- Akiyama, T.,(1982), “ Evaluation of Martin-Seed Simplified Procedure Using Data From Dynamic Centrifuge Tests” MIT, Dept. of Civil Engineering., Research Report R82-28.
- Alarkon-Guzman, Chameu, J.L., A., Leonards, G.A.,(1986), “ A New Apparatus for Investigating the Stress –Strain Characteristics of Sand”, ASTM Geotechnical Testing Journal, 9, 204-212.
- Alarkon-Guzman, A., Leonards, G.A., Chameu, J.L.,(1988), “ Undrained Monotonic and Cyclic Strength of Sands”, J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 114,1089-1109.
- Altun, S., (2003), “Burulmalı Kesme Deney Aleti ile Zeminlerin Dinamik Davranış Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ambraseys, N., Sarma, S., (1969), “ Liquefaction of Soils Induced by Earthquakes”, Bulletin of Seismological Society of America, 59 (2), 651-664.
- Ampadu, S.K., Tatsuoka, F.,(1993), “ A Hollow Cylinder Torsional Simple Shear Apparatus Capable of Wide Range of Shear Strain Measurement” ASTM Geotechnical Testing Journal, 16, 3-17.
- Ansal, A.M, Krizek, R.J ve Bazant, Z.P., (1978), “Endochronic Constitutive Law for Soils”, Proceedings of 6th European Conf. on Earthquake Engineering, Dubrovnik, Yugoslavia, V.3, 9-14
- Ansal, A.M., Krizek, R.J ve Bazant, Z.P., (1980), “Prediction of Soil Behavior by Endochronic Theory” Limit Equilibrium, Plasticity, and Generalized Stress-Strain Behavior in Geotechnical Engineering, ASCE, 286-327.
- Ansal, A.M., (1981), “Zeminlerin Dinamik Kayma Gerilmeleri Altında Davranışları” Doçentlik Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ansal, A.M., (1982) “ Kumlu Zemin Tabakalarında Sıvılaşma”, Deprem araştırma bülteni, Yıl 9, Sayı 37, 21-102.
- Ansal, A.M., Erken, A.,(1985), “ Killerin Tekrarlı Gerilmeler Altındaki Davranışı”, Deprem Araştırma Bülteni, 48, 9-81.
- Ansal, A.M., İyisan, R., Yıldırım, H., (2001), “ The Cyclic Behavior of Soils and Effects of Geotechnical Factors in Microzonation”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 445-452.
- Arulanandan K., Muraleetharan, K.K., (1988), “ Level Ground Soil-Liquefaction Analysis Using in-Situ Properties:II” J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 114(7), 771-790.
- Arulanandan K., Scott, R.F., (1993), “ VELACS: Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies”, Vol.1, 2, Conference Proceedings, Davis, California, October, Balkema, Rotterdam.

- Badia, V.M., (2003), "Finite Element Modelling of Embankment Founded on Liquefiable Foundation Subjected to Seismic Excitation" Master of Science Thesis, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus.
- Bazant Z.P., Kriezek, R.J., (1976), "Endochronic Constitutive Law for Liquefaction of Sand", ASCE, Vol. 102, No. EM2, pp. 225-238.
- Bazant Z.P., Ansal, A.M., Kriezek, R.J., (1982), "Endochronic Models for Soils", Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley and Sons, Ltd. New York, N.Y., 419-438.
- Biegenousky, W.A., Marcuson, W.F. III., (1976), "Laboratory Standard Penetration Tests on Reid Bedford Model and Ottawa Sands" Research Report S-76-2, U.S Army Engineeris Waterways Experiment Statipni Vicsburg, MS.
- Brennan, A.J., Madabhushi, S.P.G., (2005), "Liquefaction and Drainage in Stratified Soil", J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 131(7), 876-884.
- Dafalias, Y.F., Popov, E.P., (1975), "A model of Nonlinearly Hardening Material for Complex Loading" Acta Mecha., Vol.21, 173-192.
- Carter J.P., Booker, J.R., Wroth, C.P., (1982), "A Critical State Model For Cyclic Loading", Proceedings of Int. Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading", Balkema, 219-252.
- Castro, G., (1975), "Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands", J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 101, 552-569.
- Castro, G. Poulos, S.J., (1977), "Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility" J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 103, 501-516.
- Chen, Y.C., Ishibashi, I., Jenkins, J.T., (1988), "Dynamic Shear Modulus and Fabric: Part I, Depositional and Induced Anisotropy", Geotechnique, 38, 25-32.
- Coelho, P.A.L.F., Haigh, S.K., Madabhushi, S.P.G., (2003), "Boundary Effects in Dynamic Centrifuge Modelling of Liquefaction in Sand Deposits" 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle.
- Dafalias, Y.F., Herrmann, L.R., (1980) "A Bounding Surface Soil Plasticity Model" Proceedings of Int. Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading", Balkema, 335-345.
- Dobry, R., Taboada, V., Liu, L., (1995), "Modelling of liquefaction Effects During Earthquakes" Proc. 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, Vol.2, 1291-1324.
- Drucker, D.C, Prager, W., (1952), "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design", Quarterly of Applied Mathematics", 10, 157.
- Drucker, D.C., Gibson, E., Henkel, D.J., (1955), "Soil Mechanics and Work Hardening Theories of Plasticity", ASCE, Transactions, Paper No. 2864., 338-346.
- Elgamal, A.W., Dobry, R., Adalier, K., (1989), "Small-scale Shaking Table Tests of Saturated Layered Sand-Silt Deposits", 2nd U.S-Japan Workshop on Soil Liquefaction, Buffalo, N.Y., NCEER Rep. No. 890032, 233-245.

- Erken, A. ve Ansal, A.,(1994), "Liquefaction Characteristics of Undisturbed Sands, Performance of Ground and Soil Structures, Thirteenth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 165-170.
- Fiegel, G.L., Kutter, L.B., (1994), " Liquefaction mechanism for layered soils", J. Geotech. Geoenvironmental. Eng., ASCE, 120(4), 129-137.
- Finn, W.D.L., Emery, J.J., Gupta, Y.P.,(1971), " Liquefaction of Large Samples of Saturated Sand on a Shaking Table" Proceedings of the 1st Canadian Conference on Earthquake Engineering, 97-110.
- Finn, W.D.L., Lee, K.W., Martin, G.R.,(1977), " An Effective Stress Model for Liquefaction", ASCE, Vol. 104, No. GT3, pp. 517-533.
- Florin ,V., and Ivanov, P.L.,(1961), " Liquefaction of Saturated Sandy Soils", Proc. of 5th Intl.Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., Paris, Vol.1, pp.107-111.
- Ghaboussi, J., Dikmen, S. U., (1978), "Liquefaction Analysis of Horizontally Layered Sands" Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. 3, 341-356.
- Ghaboussi, J. veDikmen, S.Ü., (1979), "Lass-III, Computer Program for Seismic Response and Liquefaction of Layered Ground Under Multi-Directional Shaking", The National Science Foundation, Contract ENV 76-00626.
- Ghaboussi, J., Momen, H., (1982), " Modelling and Analysis of Cyclic Behavior of Sands" Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley and Sons, Ltd. Mew York, N.Y., 313-342.
- Gray, H., (1944), "Simultaneous Consolidation of Contiguous Layers of Unlike Compressible Soils" Soils Proc. Am. Soc. Civ. Eng., 70-149.
- Hardin, B.O., Richart, F.E., (1963), " Elastic Wave Volcities in Granular Soils" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.89, 33-65
- Hardin, B.O, Drenevich, V.P., (1972a), " Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves" ASCE, Vol. 98, 667-692.
- Hardin, B.O, Drenevich, V.P., (1972b), " Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects" ASCE, Vol. 98, 603-624.
- Hassib, M.H., (1951), " Consolidation Charactersitics of Granular Soils" Columbia University, New York.
- Hill, R.,(1950), " The Mathematical Theory of Plasticity", Clarendon Press, Oxford, England.
- Hirari, H., Satake, M., (1985), " Dynamic Analysis of Level Ground By an Elastic-Plastic Constitutive Model" Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan, Vol1., April, 365-372.
- Houdge, P.G.J.,(1957) " Piecewise Linear Plasticity", Proc. 9th International Congress on Appl. Mechanics, Vol.8, 65-72.
- Houishan, L., Taiping, Q., (1984) " Liquefcation Potential of Saturated Sand Deposits underlying foundation of Structure" Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, Prentice Hall, Engkewood Cliffs, N.J.
- Housner, G.W., (1958), " The Mechanism of Sandblows", Bulletin of Seismological Society

of America, 48 (April),155-161.

Husmand,B., Scott, F., Crouse, C.B., (1988), “ Centrifuge Liquefaction Tests in a Laminar Box”, *Geotechnique*, 38(2), 253-262.

Husmand,B., Scott, F., Crouse, C.B., (1992), “ In-place Calibration of USGS Pore Pressure Transducers at Wildlife Liquefaction Site”, California, USA,Proc.,10WCEE:1263-1268.

Iai, S.,Matsunaga, Y., Kameoka, T., (1992), “ Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility”, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, 1-15.

Ishibashi, I., Chen, Y.C., Jenkins, J.T., (1988), “ Dynamic Shear Modulus and Fabric: Part II, Stress Reversal, *Geotechnique*, 38, 33-37.

Ishibashi, I., Zhang, X.,(1993), “ Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay”, *Soils and Foundations*, 33, 182-191.

Ishihara, K., Lysmer, J., Ysuda, S., Hirao, H.,(1976), “ Prediction of Liquefaction in Sand Deposits During Earthquakes”, *Soils and Foundations* Vol.16(1), 1-16.

Ishihara, K.,(1981), “ Pore Water Rises During Earthquakes”, *Proceedings of the International Conference on Recent Advances of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol.3, 1-4.

Ishihara, K., Yoshimine, M., (1992), “ Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquakes”, *Soils and Foundations*, 32, 173-188.

Ishihara, K., (1993), “ Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes” *Geotechnique*, 43 (3), 351-415.

Ishihara, K., (1996), *Soil Behavior in Earthquake Geotechnics*, Oxford Science Publications.

Ishihara, K., Towhata, I., (1990), “One Dimensional Soil Response Analysis During Earthquakes Based on Effective Stress Method”, *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo*, Vol. 35, No.4, 665-700.

Jefferies, M., (1997), “ Plastic Work and Isotropic Softening in Unloading” *Geotechnique*, Vol.47, No.5, 1037-1042.

Kokusho, T., Esashi Y., Sakurai, A., (1982), “ Numerical Simulation on Liquefaction”, *CRIEPI Report*, NO. 381023.

Kokusho, T., (1987), “ In-situ Dynamic Soil Properties and Their Evaluations” *Proceedings of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Kyoto, Japan, Vol.2, 215-240.

Kokusho, T., Watanabe, K., (1997), “ Water Film Effect on Lateral flow in Liquefied Ground” *Proc. of Earthquake Engineering Symposium*, Japan Society for Civil Engineers, 545-548.

Kokusho, T., (1999), “ Water Film in Liquefied Sand and Its Effect On Lateral Spread”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 125(10), 817-826.

Kokusho, T., (2000), “Mechanism For Water Film Generation and Lateral Flow in Liquefied Sand”, *Soils and Foundations* Vol.40, No.5, 99-111.

Kokusho, T., (2002), “ Mechanism for Post Liquefaction water film generation in layered

sand”, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 128(2), 129-137.

Kovacs, W.D., Seed, H.B., Chan, C.K., (1971), “ Dynamic Modulus and Damping Ratio for a Soft Clay”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 97, 59-75.

Kreig, R.D., (1985), “ A Practical Two Surface Plasticity Theory”, J. Appl. Mech., Vol. 47, No. E3, 641-646.

Lade, P., Duncan, J.M., (1975), “ Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil”, ASCE, Vol. 101, No. GT10, 1037-1053.

Lade, P., (1977), “ Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soils With Curved Yield Surfaces”, International Journal of Solids Structures, Vol.13, 1019-1035.

Lambe, P.C. (1981), “ Dynamic Centrifuge Modelling of a Horizontal Sand Stratum”, Sc.D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass. USA.

Lanzo, G., Vucetic, M., Doroudian, M., (1997), “Reduction of Shear Modulus at Small Strains in Simple Shear”, Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.123, 1035-1042.

Lee, K.L., Albasia, A., (1974), “ Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.100, 387-406.

Liou, C.P., Streeter V.L., Richart, F.E. Jr., (1977), “ Numerical Model for Liquefaction”, ASCE, Vol. 103, No. GT6, 589-606.

Liu, H., Qiao, T., (1984), “ Liquefaction Potential of Saturated Sand Deposits Underlying Foundation of Structure” Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.3, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 199-206.

Lin, M.L., Huang, T.H., You, J.C., (1996), “The Effects of Frequency on Damping Properties of Sand” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 15, 269-278.

Lo Presti, D.C.F., Pallara, O., Lancellotta, R., Armandi, M., Maniscalco, R., (1993), “Monotonic and Cyclic Loading Behavior of Sands at Small Strains” ASTM Geotechnical Testing Journal, 16, 409-424.

Matsuoka, H., (1974), “ A microscopic Study on Shear Mechanism of Granular Materials”, Soils and Foundations, Vol.14, No.1, 29-43.

Matsuoka, H., Nakai, T., (1977), “ Stress-Strain Relationship of Soil Based on the SMP” Proc. of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Specialty Session 9, 153-162.

Mroz, Z., (1967), “On the Description Anisotropic Work Hardening” Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.15, 163-175.

Nagase, H., (1985), “ Behavior of Sand in Multi-Directional Irregular Loading”, Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Tokyo.

Nagase, H., Ishihara, K., (1988), “ Liquefaction Induced Compaction and Settlement of Sand During Earthquake” Soils and Foundations Vol.28, 66-76.

Nishi, K., Tohma, J., Kanatani, M., (1985), “ Effective Stress Response Analysis for Level Sand Deposits with Cyclic Mobility”, Proc. of 5th Numerical Conference in Geomechanics, Nagoya, 389-397.

- Nishi, K., Kanatani, M., Matsui, I., Tohma, J., (1986), “ Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 1)- Development of Estimation Method of Stability of Sandy , Gravely Ground Based on Dynamic Analysis”, CRIEPI Report, No. U86002.
- Nishi, K., Kanatani, M., (1986), “Evaluation of Stability of Foundation Ground During Earthquake (Part 2)- Settlement and Bearing Capacity of Sandy , Gravely Ground Structure Under Erathquake Motion”, CRIEPI Report, No. U86003.
- Nishi, K., Kanatani, M., (1990), “ Constitutive Relations For Sand Under Cyclic Loading Based on Elasto-Plasticity Theory”, Soils and Foundations Vol.30, No.2, 43-59.
- Ohtsuki, A., Watanabe, K., Takewaki, N., (1986), “Two-Dimensional Effective stress Analysis of Liquefaction of Irregular Ground Including Soil Structure Interaction”, Proc. of JSCE, Vol. 368/I-5, pp.363-372.
- Oka, F., Murase, T., (1981), “ Liquefaction Analysis of Sand Deposits Based on Cyclic Elasto-plasticity” Proc., Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Vol. 1, 151-154.
- Oka, F., Sekiguchi, K., Goto, H., (1981), “ A Method of Analysis Earthquake-Induced Liquefaction of Horizontally Layered Sand Deposits”, Soils and Foundations Vol.21, No.3, 1-7.
- Özaydın, K., (1982), Zemin Dinamiği, Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No.1, İstanbul.
- Poorooshasb, H.B., Holubec, I., Sherbourne A.N., (1966), “ Yielding and Flow of Sand in Triaxial Compression: Part I”, Canadian Geotechnical Journal 3(4), 179-190.
- Poulos, S.J., (1981), “ The Steady State Deformation”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.107, 553-562.
- Poulos, S.J., Castro, G., France, J.W., (1985), “ Liquefaction Evaluation Procedure”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.111, 772-782.
- Popescu, R., Prevost, J.H., (1995), “Comparison between VELACS Numerical “Class A: Predictions and Centrifuge Experimental Soil Test Results”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.14, No.2, 1995, pp.79-92.
- Prager, W., (1955), “ The Teheory of Plasticity –a Survey of Recent Achievement”, Proc. of Institution of Mechanical Engineer, Vol. 169, 41-47.
- Prevost, J., Hoeg, K., (1975), “ Effective Stress-Strain-Strength Model for Soils”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.101, GT3, 259-278.
- Puebla H., Byrne, P.M., (1996), “ Static Liquefaction Case History: Analysis and Field Observations”, Proc. of XIV. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, Vol.1, 177-180.
- Puebla H., Byrne, P.M., Phillips, R., (1997), “ Analysis of CANLEX Liquefaction Embankments: Prototype and Centrifuge Models”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.34, No. 5, 641-657.
- Puzrin, A.M., Burland, J.B., (1998) “ Nonlinear Model of Small-Strain Behavior of Soils”, Geotechnique, 48, 217-233.

- Puzrin, A.M., Shiran, A., (2000), "Effects of the Constitutive Relationship on Seismic Response of Soils, Part I, Constitutive Modelling of Cyclic Behavior of Soils" *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 305-319.
- Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., Daily III, W.D., (1998), "Shear Modulus and Damping Relations for Gravels", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 124, 396-405.
- Roscoe, K.H., Burland, J.B., (1968), "On the Generalized Stress-Strain Behavior of wet Clay" *Engineering Plasticity*, J. Heyman and F. Leckie Eds., Cambridge University Press, Cambridge, England, 535-609.
- Sato T., Shibata, T., Kasaka, M., (1980), "Dynamic Behavior and Liquefaction of Saturated Sandy Soil", *International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, Vol.2, 513-522.
- Schiffman, R.L., Gibson, R.E., (1964), "Consolidation of Non-Homogenous Clay Layers" *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol.90, SM5, 1-30.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., (1972), "Shake - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Soils", Report No. EERC-72/12, University of California, Berkeley.
- Schofield, A., Wroth, P., (1968), "Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill.
- Scott, R.F., (1986), "Solidification and Consolidation of a Solidified Sand Column" *Soils and Foundations*, Vol.26(4), 23-31.
- Scott, R.F., Zuckerman, K.A., (1972), "Sandblows and Liquefaction in the Great Alaskan Earthquake of 1964." *Engineering Publication 1606*, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 170-189.
- Seaman, L., Breroff, G.N., Kriebel, H.W., (1963), "Stress Propagation in Soils Part III" Report by Stanford Research Institute to Defense Atomic Support Agency, DASA-1266-3.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., (1966), "Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.92, SM6, 105-134.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., (1967), "Analysis of Liquefaction: Niigata Earthquake" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, SM3, pp. 83-108.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., (1970), "Soil Moduli and Damping Factors For Dynamic Response Analysis", Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering and Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, SM9, pp. 1249-1273
- Seed, H. B., Lee, K.L., Idriss, I. M., (1975), "The slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971" *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.101, No. GT7, 651-688.
- Seed, H.B., Martin, P.P., Lysmer, J., (1975), "The Generation and Dissipation of Pore Water Pressures During Soil Liquefaction", *Earthquake Engineering Research Center*, University of

California, Berkeley, August.

Seed, H.B., Martin, P.P., Lysmer, J., (1976), “ Pore Water Changes During Soil Liquefaction” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.102, GT4, 323-346.

Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., Tokimatsu, K., (1986), “ Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils”, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 112 , 1016-1032.

Sekiguchi, H., Ohta, H. (1977), “ Induced Anisotropy and Time Dependency in Clay” Specialty Session 9, 9th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 229-238.

Shiomi, T., Tamamoto, S., Matsumoto, T., (1984), “ Application of Numerical method on Liquefaction Problems” Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan, April, 1393-1400.

Uchiada, K., Hasegawa, T., (1987), “ Dynamic Plastic Deformation Analysis of Embankment Structures”, Proc. 8th Asian Regional Conference, ISSMFE, 273-276.

Tanaka, T., Yasunaka, M., Tani, N., Kawaguchi, N., Koga, Y., (1983), “ Shaking Table Tests and Liquefaction Analysis of Soil Structures” Symposium on Earthquake Damage of Soil Layers and Foundation, 71-84.

Tatsuoka, F., Muramatsu, M., Sasaki, T., (1982), “Cyclic Undrained Stress –Strain Behavior of Dense Sands By Torsional Simple Shear Test”, Soils and Foundations, 22, 55-69.

Tatsuoka, F., Sasaki, T., Yamada, S., (1984), “Settlements in Saturated Sand Induced by Cyclic Undrained Simple Shear” Proc., 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, Vol.3, 95-102.

Terzaghi K., Frohlich, O.K., (1936), “ Theorie der Setzung von Tonschichten”, Deuticke, Vienna, 91-96.

Özener Tohumcu, P., Berilgen, M., Özyaydin, K., (2006), “Investigation of Liquefaction in Layered Sands By Means of Shaking Table Tests The 6th International Conference in Geotechnics(6th ICMPG), Hong Kong, Vol.1, pp. 475-480.

Tokimatsu, K., Seed, H.B., (1987), “ Evaluation of Settlements in Sands Due to Earthquake Shaking” Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 113 (8), 861-878.

Towhata, I., Ishihara, K., (1985), “Shear Work and Pore Water Pressure in Undrained Shear”, Soils and Foundations, Vol.25, No.3, September, pp. 73-84.

Towhata, I., Ishihara, K., (1985), “ Modelling Soil Behavior Under Principal Stress Axes Rotation”, Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan, Vol.1., April, 523-530.

Teymur, B., (2002), “The Significance of Boundary Conditions in Dynamic Centrifuge Modelling”, Ph.D Thesis, Cambridge University, Newnham College.

Tonaroğlu, M., (2006), “Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

TNO Building and Construction Research, (2005), “DIANA User’s Manual”, Delft, The Netherlands, Release 91.

- Valanis, K.C. (1971), “ A Theory of Viscoplasticity Without a Yield Surface”, I, II Arch. Mech. Stosowanej, 23, 4, Warszawa, 517-551.
- Valanis, K.C., Read, H.E., (1982), “ A New Endochronic Plasticity Model for Soils”, Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley and Sons, Ltd. New York, N.Y., 375-417.
- Vermeer, P.A., (1978), “ A Double Hardening Model for Sand”, Geotechnique, Vol.28, No.4, 413-433.
- Vucetic, M., Dobry, R., (1991), “ Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response”, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 117, 89-107.
- Vucetic, M., (1994), “Cyclic Threshold Strains in Soils” Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 120, 2208-2228.
- Wang, G.X., Kuwano, J., (1999), “ Modelling of Strain Dependency of Shear Modulus and Damping of Clay”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering”, 18, 463-471.
- Yasuda, N., Matsumoto, N., (1993), “ Dynamic Deformation Characteristics of Sands and Rockfill Materials”, Canadian Geotechnical Journal, 30, 747-757.
- Yoshimi, Y., (1967), “ An Experimental Study of Liquefaction of Saturated Sands” , Soils and Foundation, Vol.7, No.2, pp.20-32.
- Yamauchi, T., Sakai, A., (1985), “ Prediction of Pore Water Pressure Based on State Variables of Sand Under Cyclic Stresses”, Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan, Vol.1., April, 1401-1407.
- Yamazaki, F., Towhata, I., Ishihara, K., (1985), “ Numerical Model for Liquefaction Problem Under Multi-Direction Shearing on Horizontal Plane” Proceedings of 5th Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Japan, Vol.1., April, 399-406.
- Yoshida, N., Iai, S., (1998), “Nonlinear Site Response and Its Evaluation and Prediction”, Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp.71-90.
- Yoshimi, Y., (1967), “ An Experimental Study of Liquefaction of Saturated Sands” , Soils and Foundation, Vol.7, No.2, pp.20-32.
- Yoshimi, Y., Tokimatsu, K., (1978), “ Two-Dimensional pore Pressure changes in Sand Deposits During Earthquakes”, Proc. 2ND. Int. Conf. on Microzonation, Vol.2.
- Yoshimi, Y., Kuwabara, F., (1973), “ Effects of Subsurface Liquefaction on the Strength of Surface Soil” Soils and Foundations, Vol.13, No.2, 67-81.
- Youd, T.L., Carter, B., (2005), “Influence of Soil Softening and Liquefaction on Spectral Acceleration” Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 131 (7), 811-825.
- Ziegler, H., (1959), “ A Modification of Prager's Hardening Rule”, Quart. Appl. Math., 17, 55-65.

EKLER:

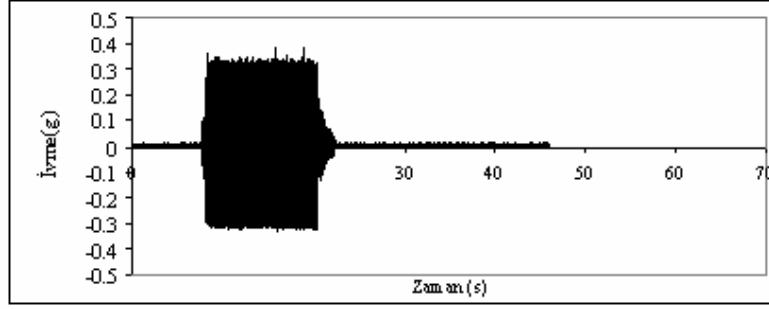
Ek 1. Sarma Tablası Deney Sonuçları

Ek 2. Artık boşluk suyu basıncı-zaman kontürleri

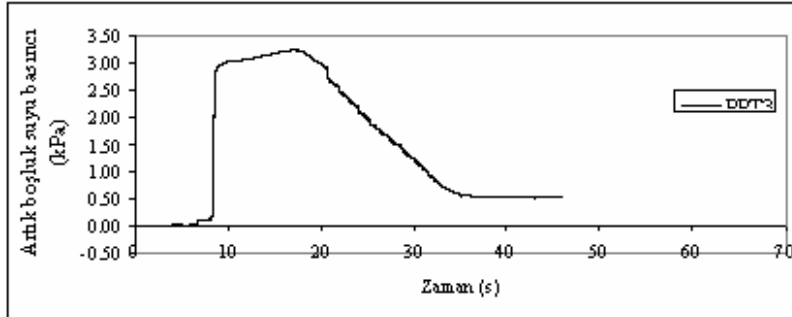
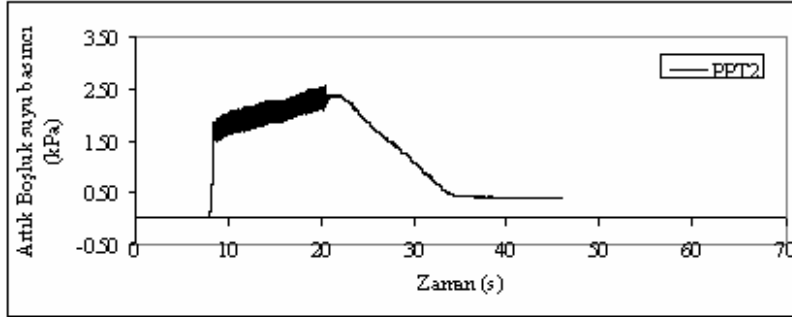
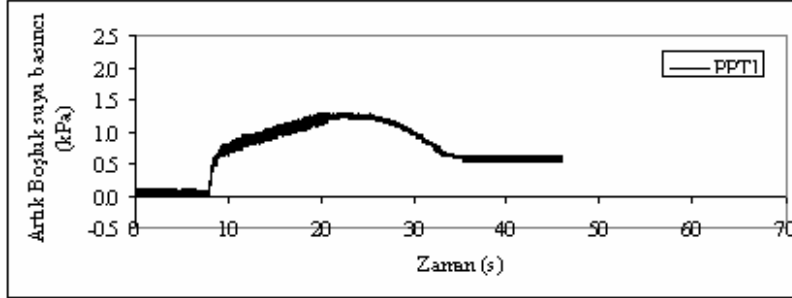
Ek.3. Nümerik analiz sonuçları

Ek.4 Maksimum Artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri

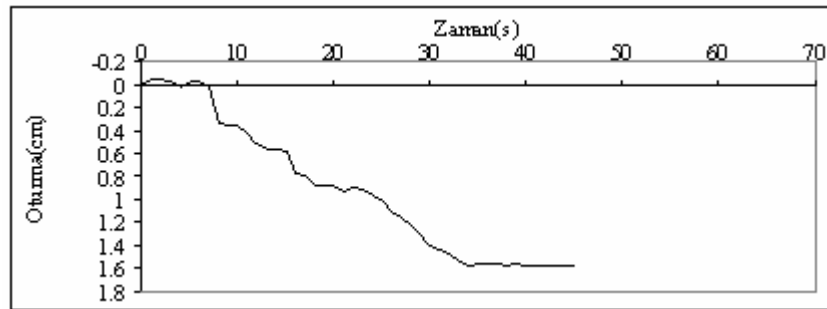
Ek 1. Sarma Tablası Deney Sonuçları



(a)

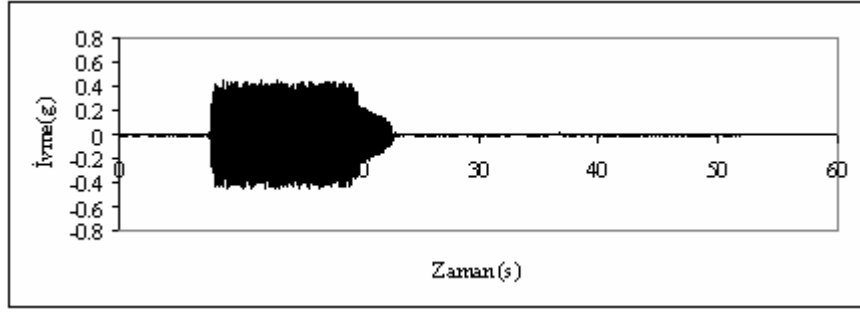


(b)

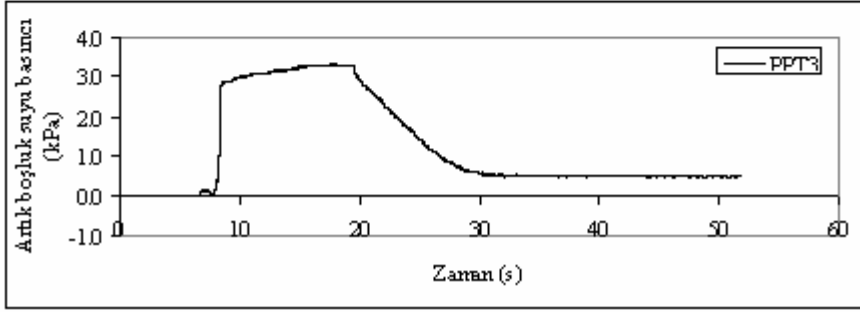
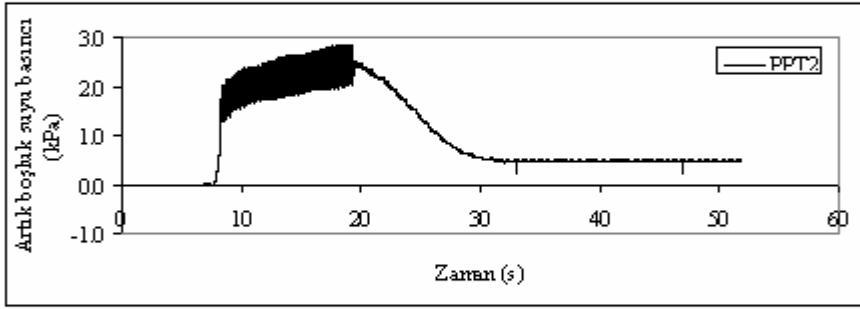
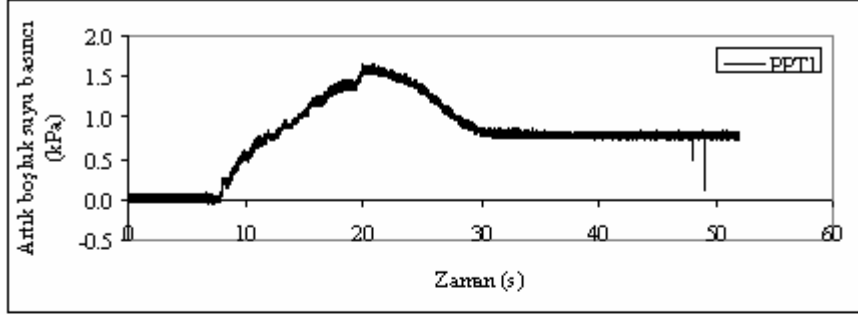


(c)

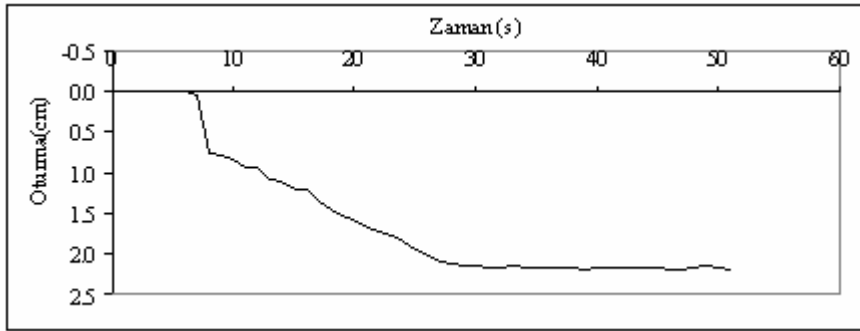
Şekil Ek 1.1 U1-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

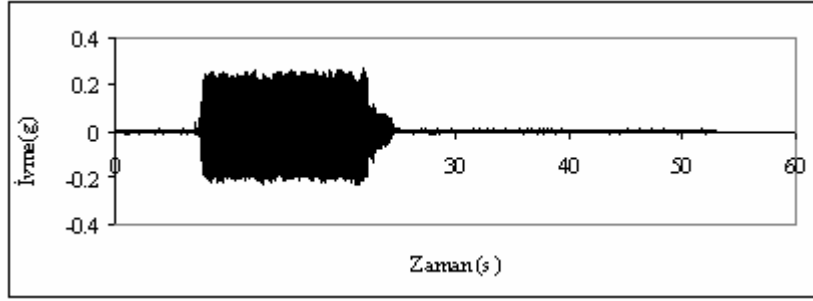


(b)

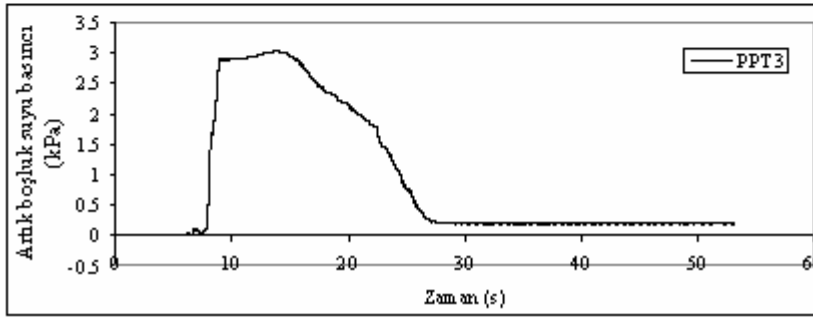
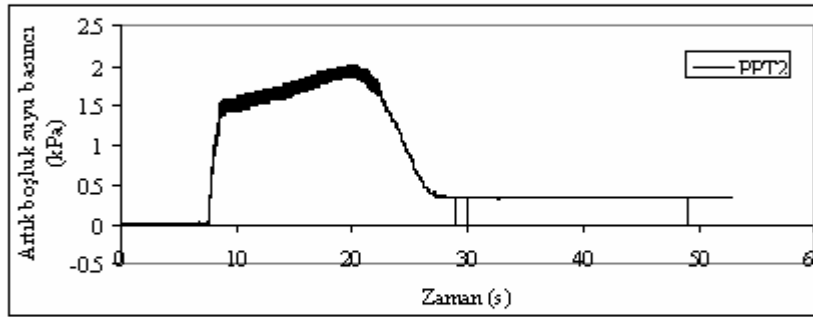
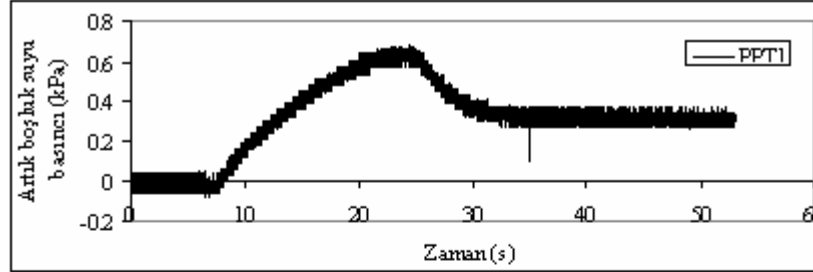


(c)

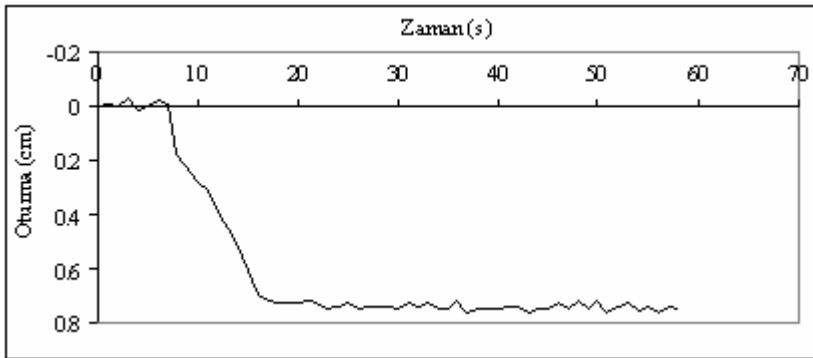
Şekil Ek 1.2 U1-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

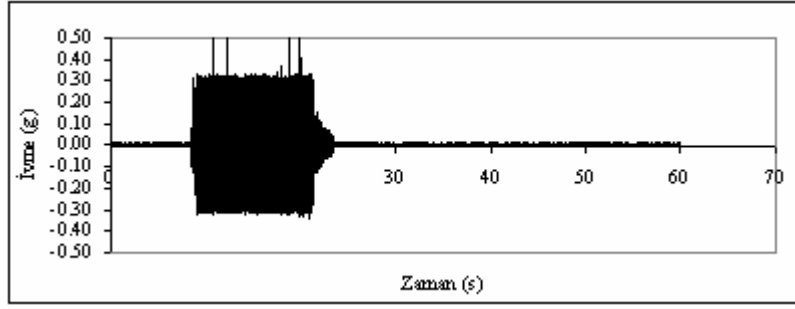


(b)

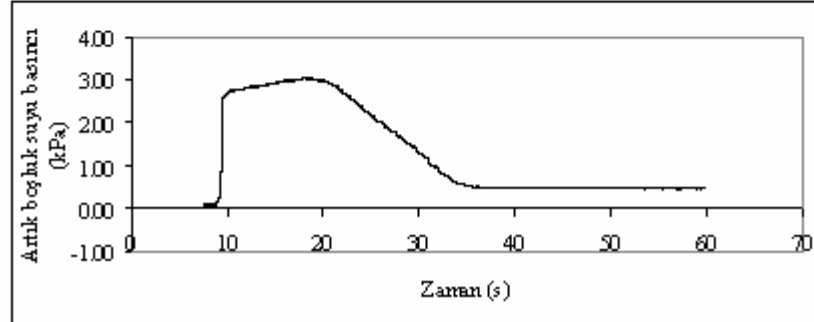
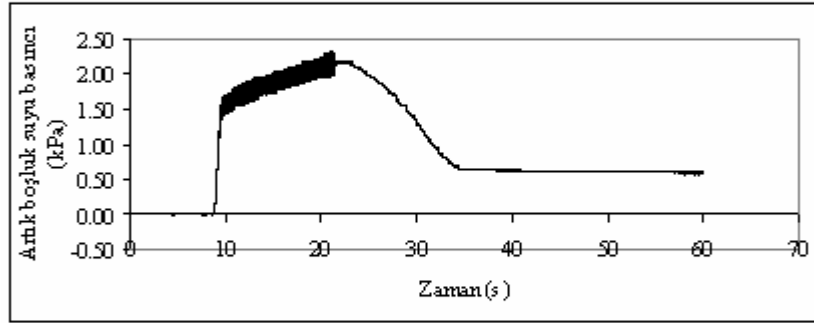
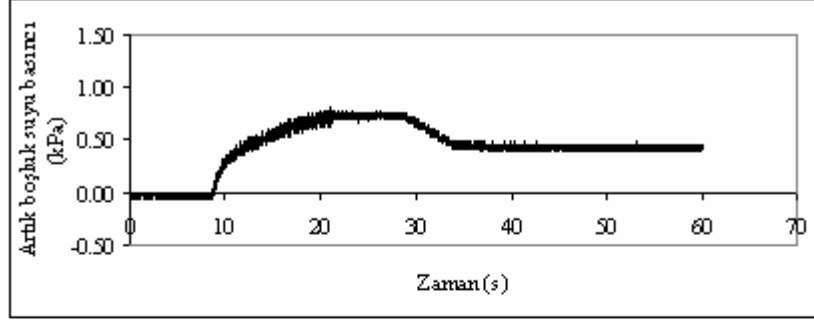


(c)

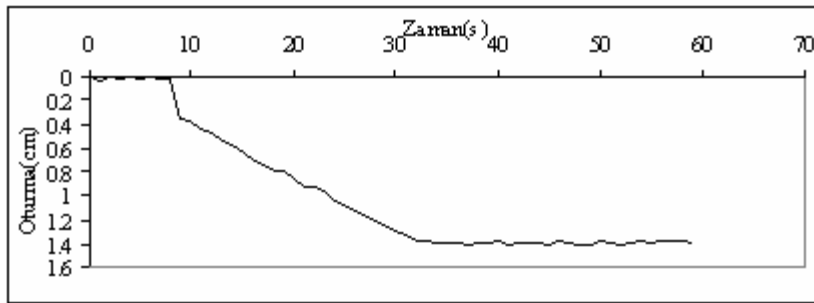
Şekil Ek 1.3 U2-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

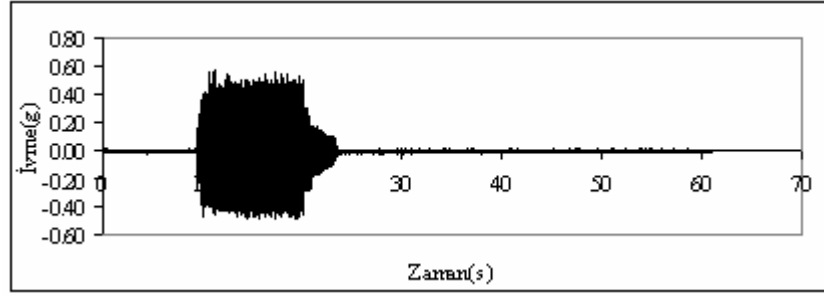


(b)

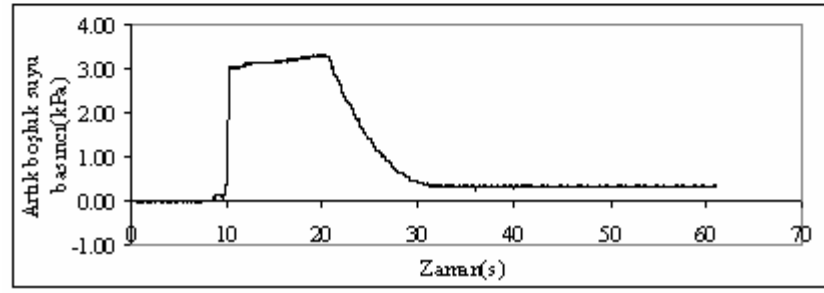
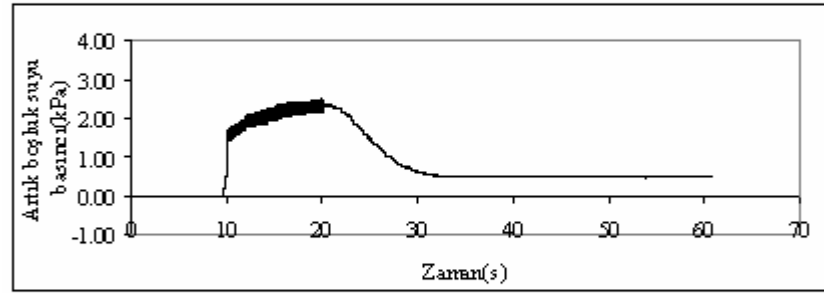
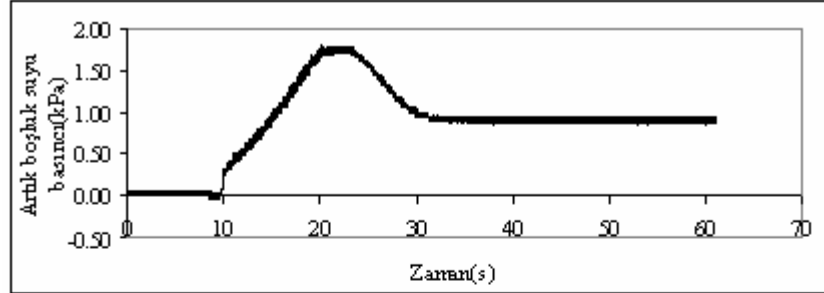


(c)

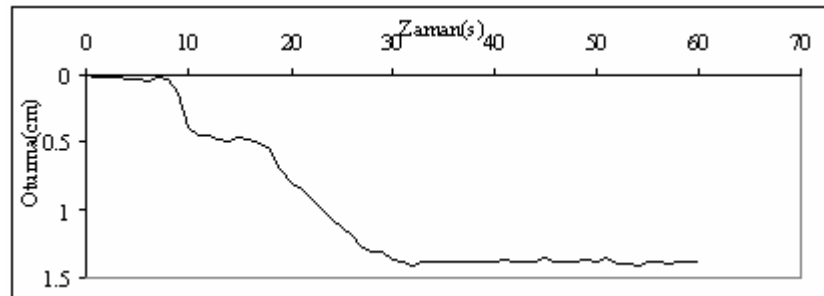
Şekil Ek 1.4 U2-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

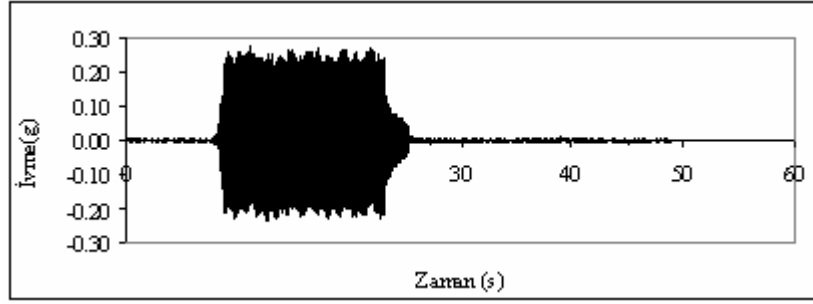


(b)

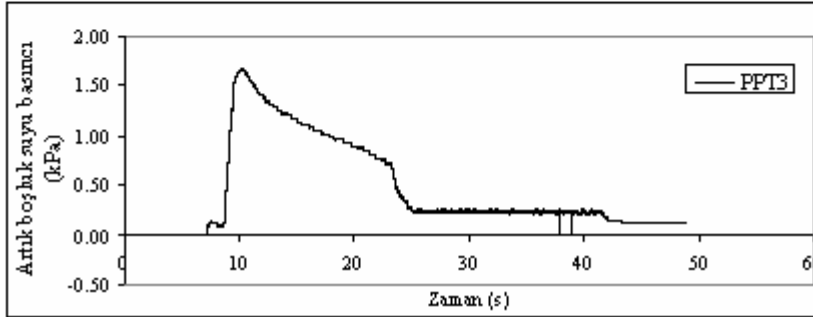
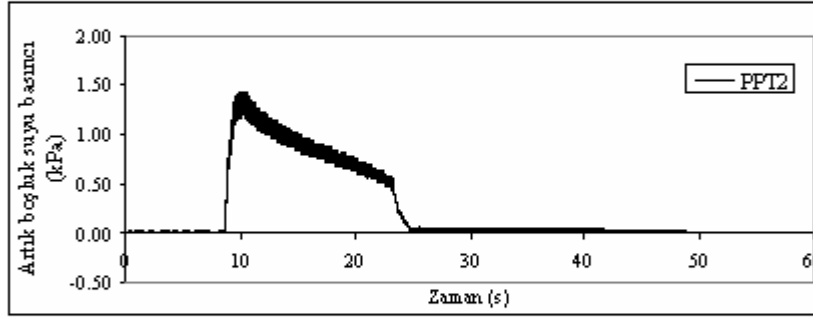
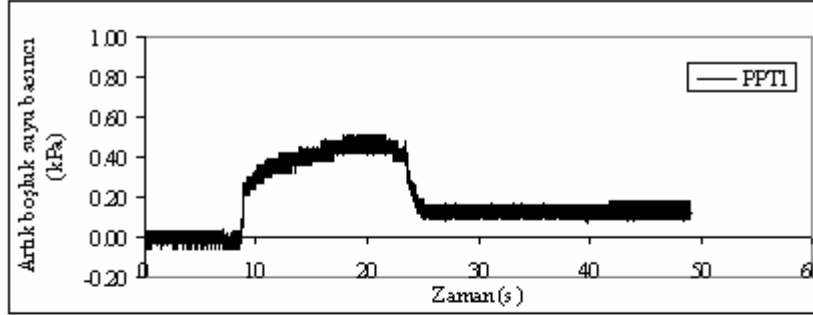


(c)

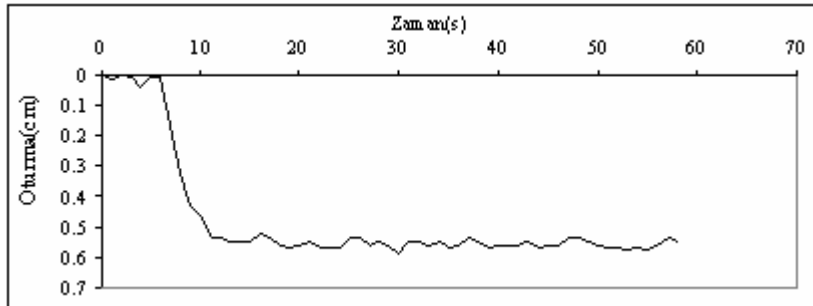
Şekil Ek 1.5 U2-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

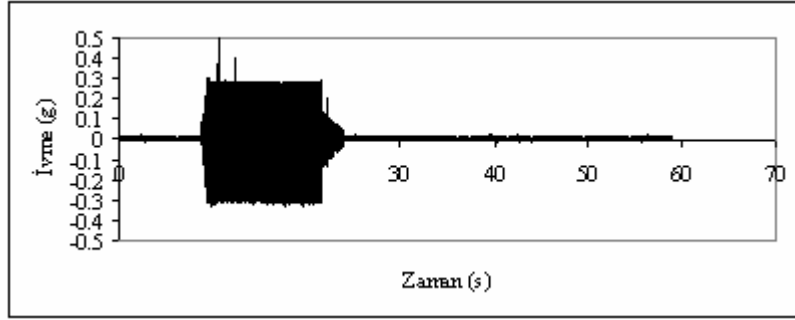


(b)

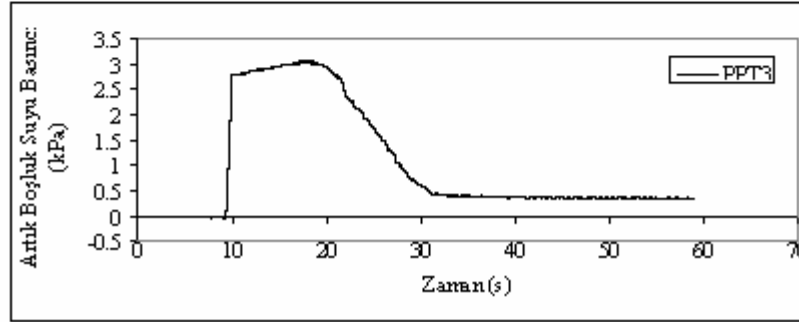
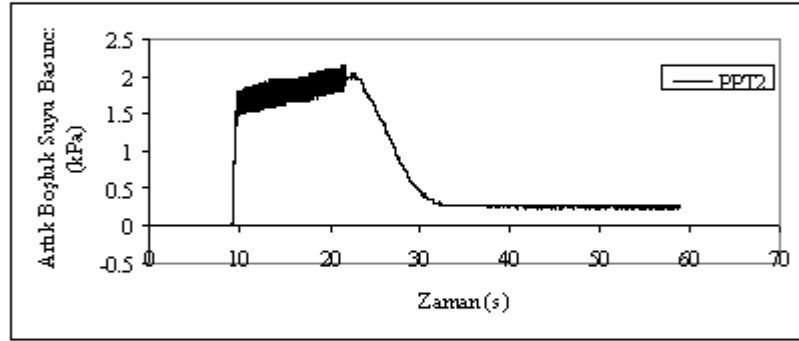
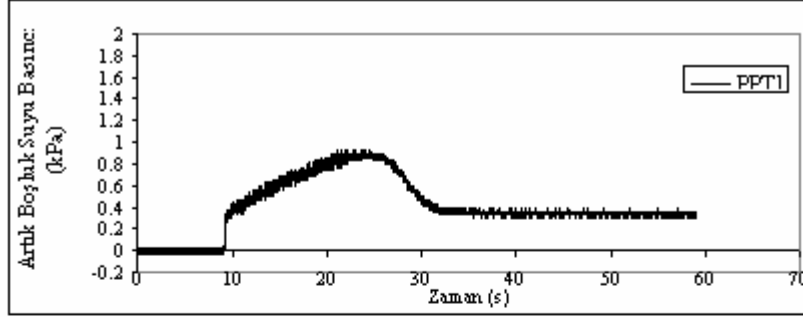


(c)

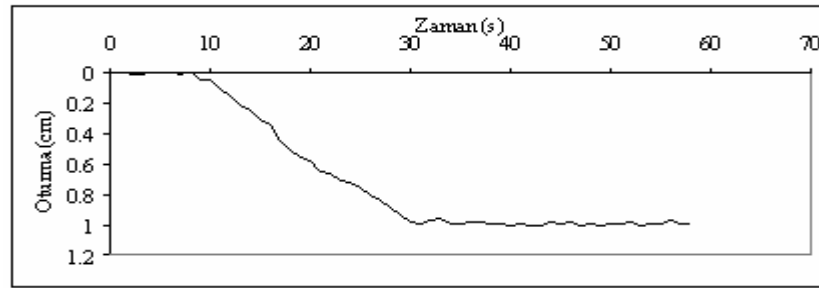
Şekil Ek 1.6 U3-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

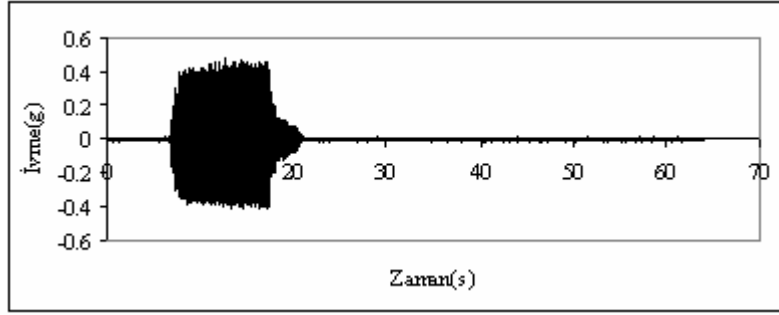


(b)

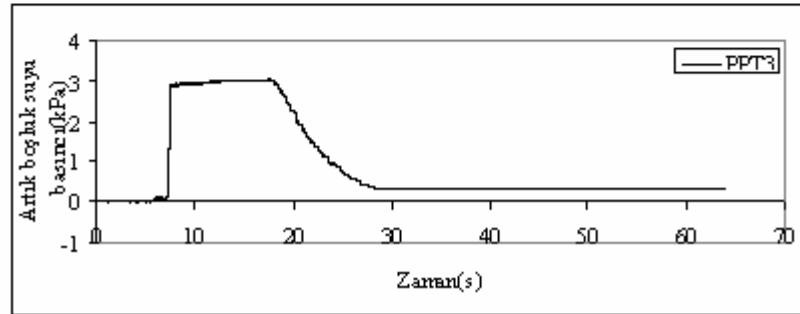
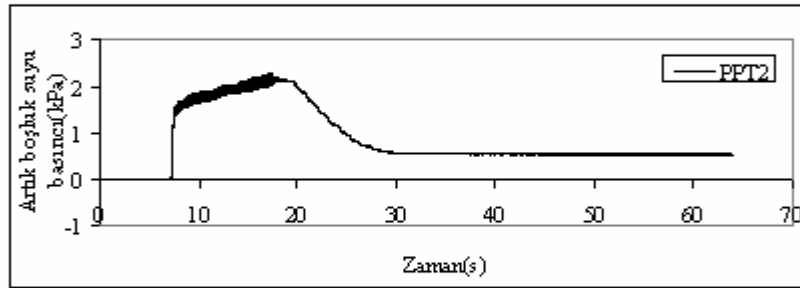
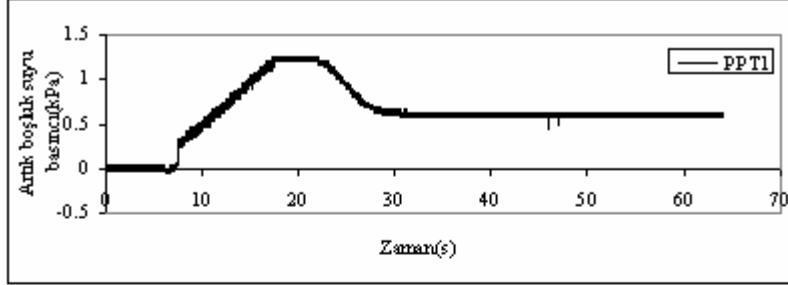


(c)

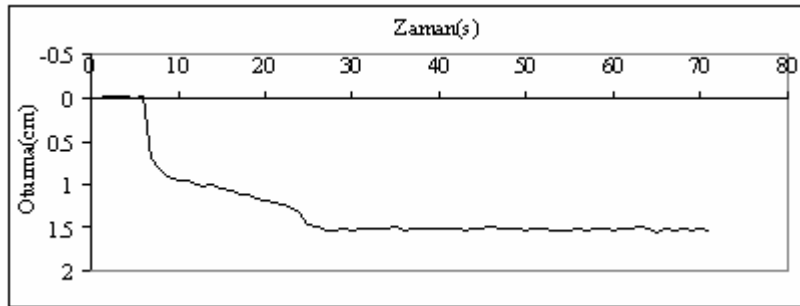
Şekil Ek 1.7 U3-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

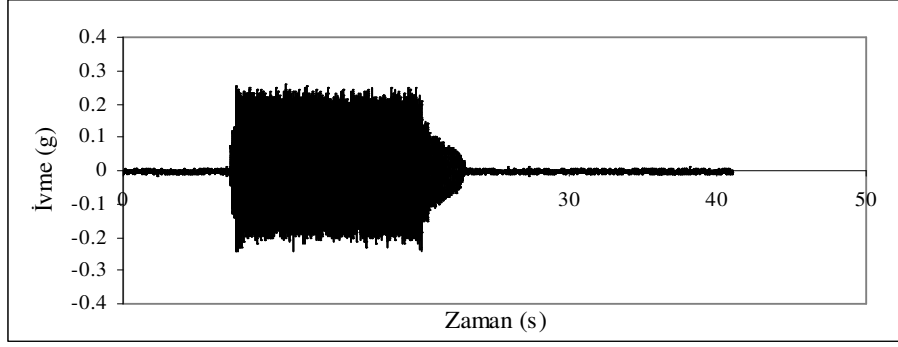


(b)

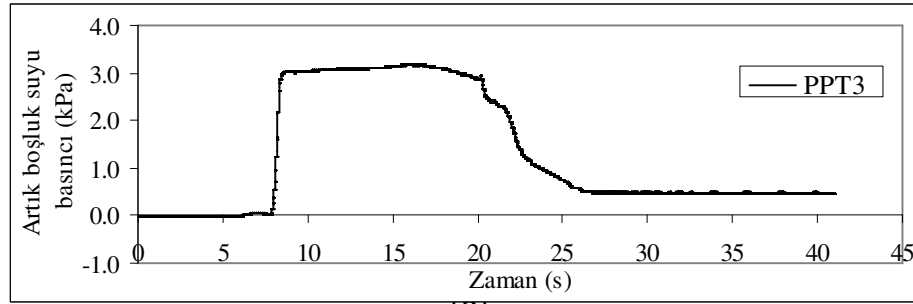
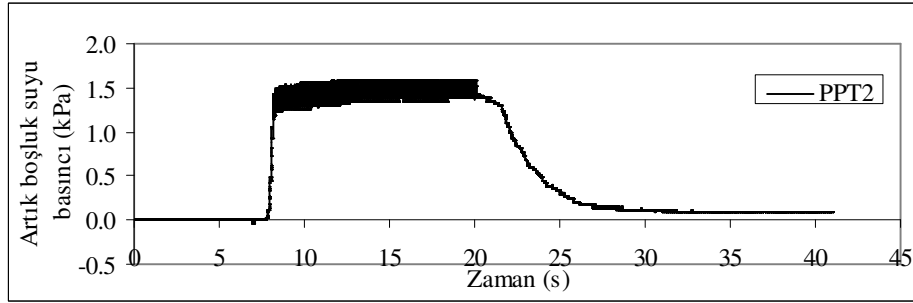
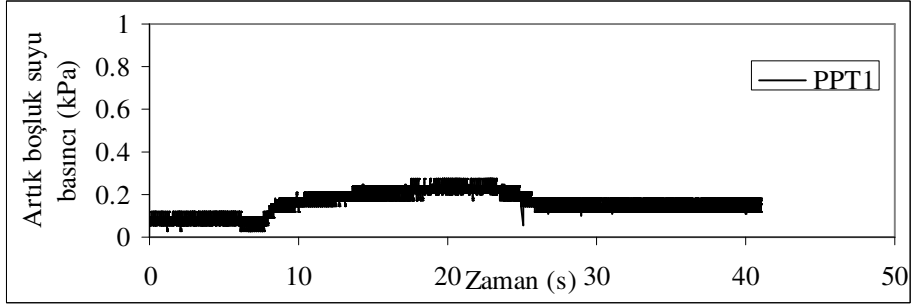


(c)

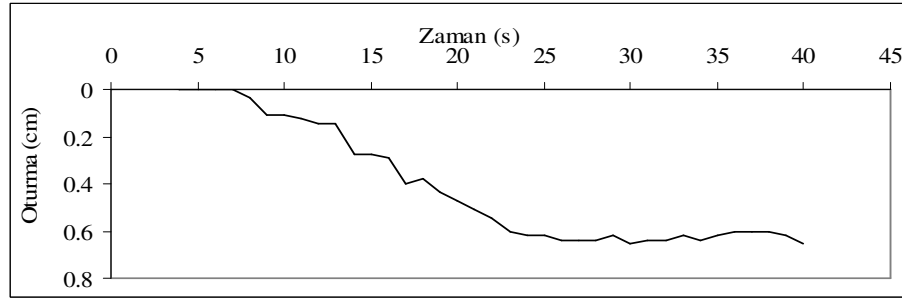
Şekil Ek 1.8 U3-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

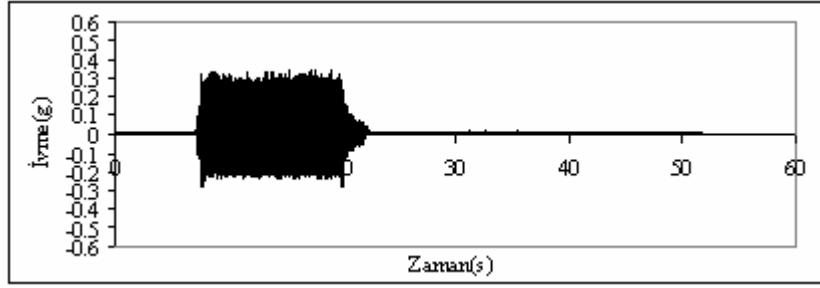


(b)

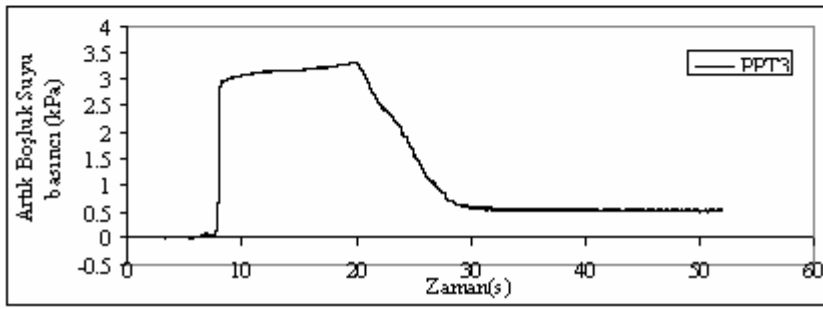
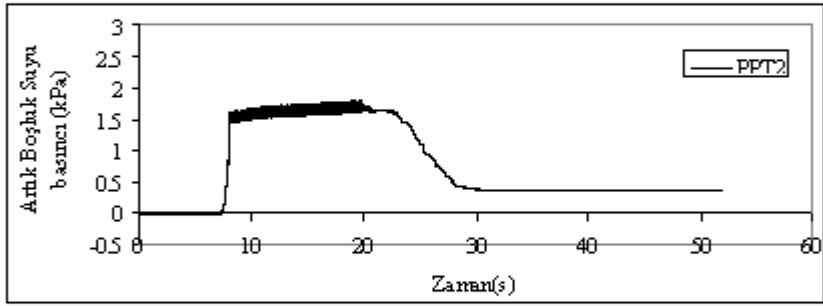
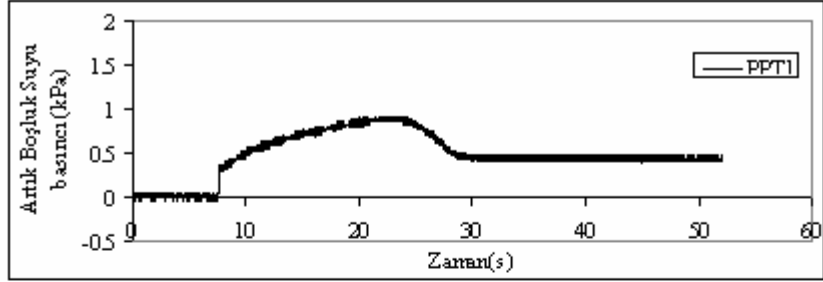


(c)

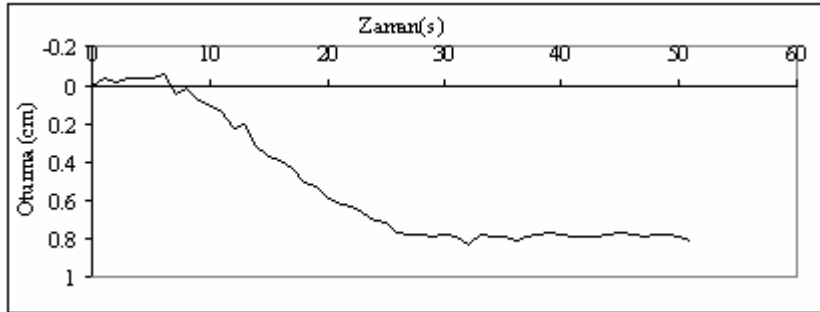
Şekil Ek 1.9 U4-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

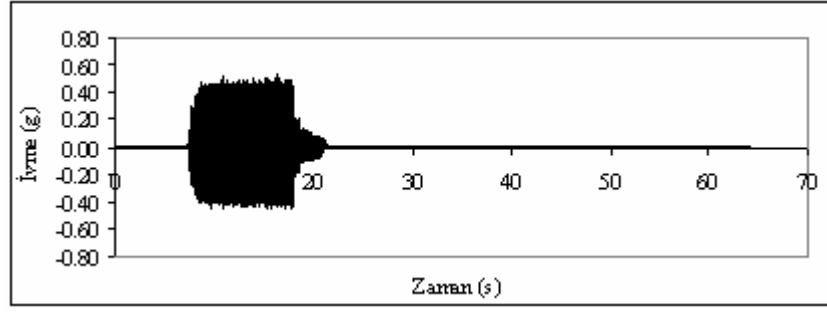


(b)

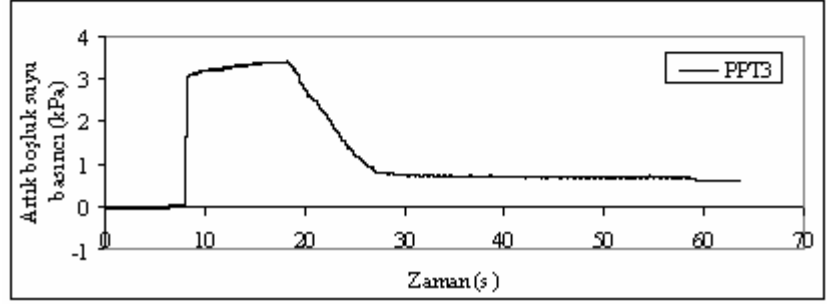
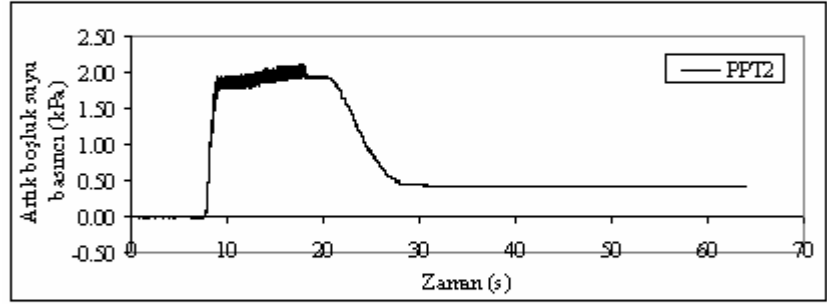
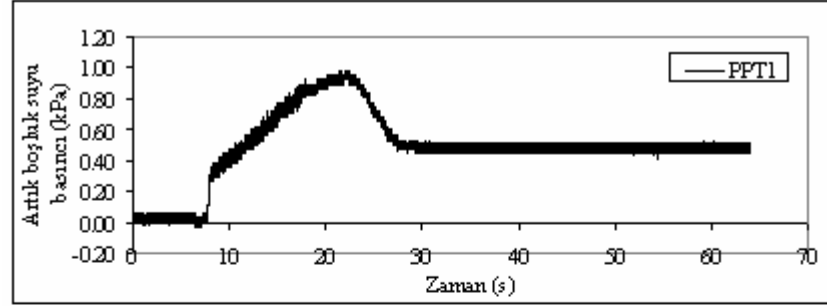


(c)

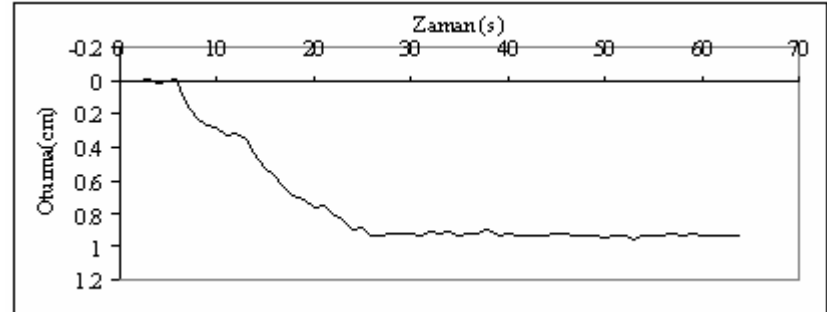
Şekil Ek 1.10 U4-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

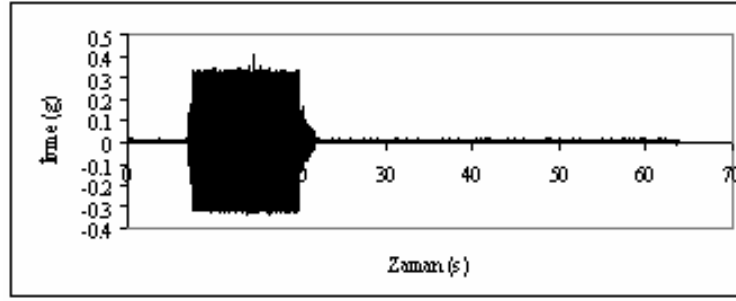


(b)

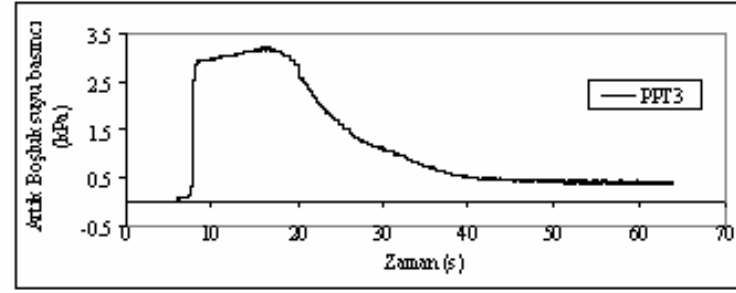
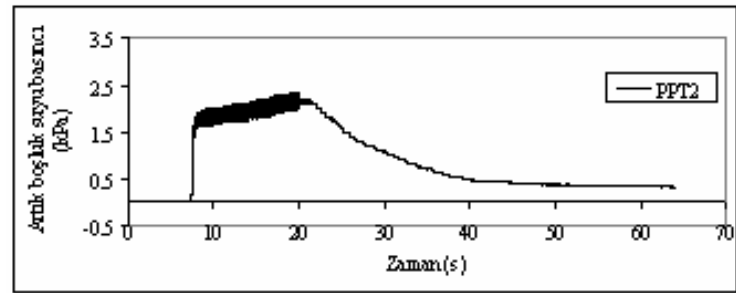
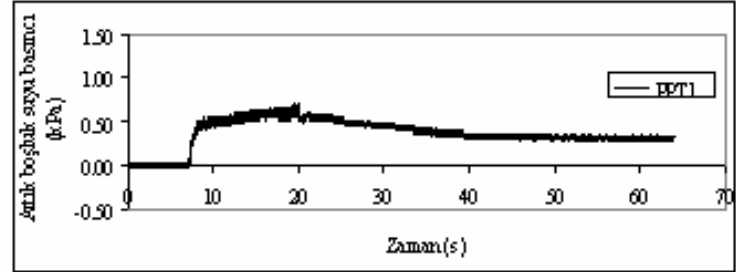


(c)

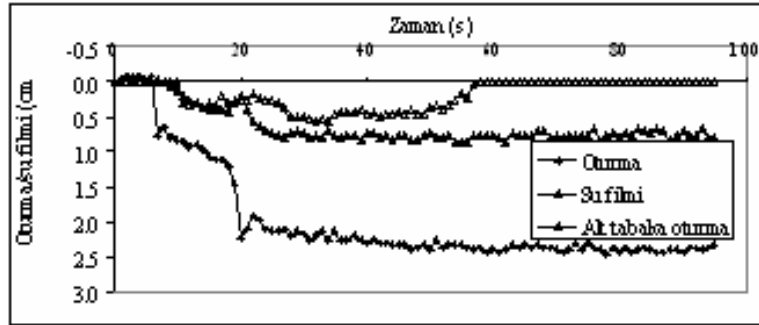
Şekil Ek 1.11 U4-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman değişimi



(a)

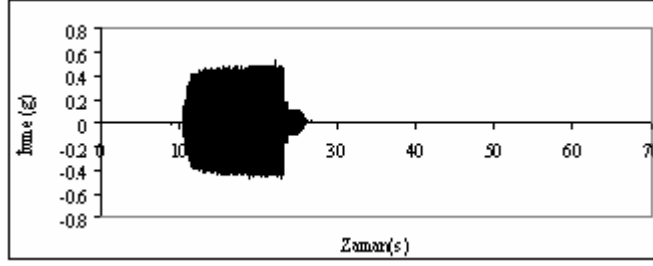


(b)

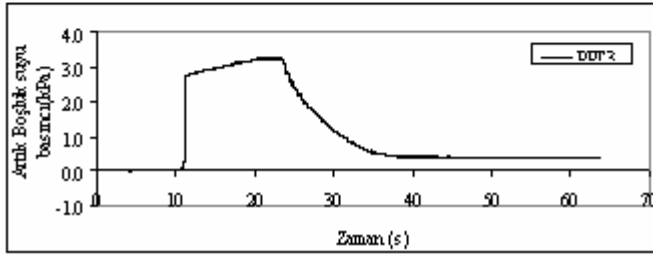
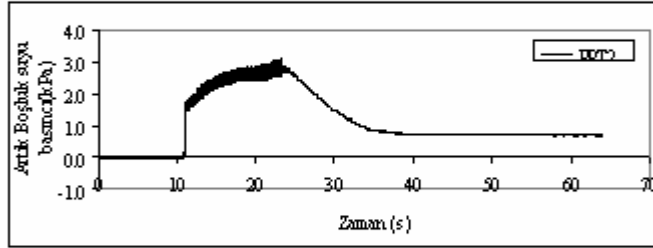
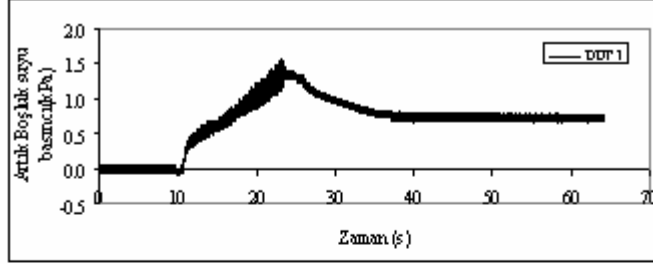


(c)

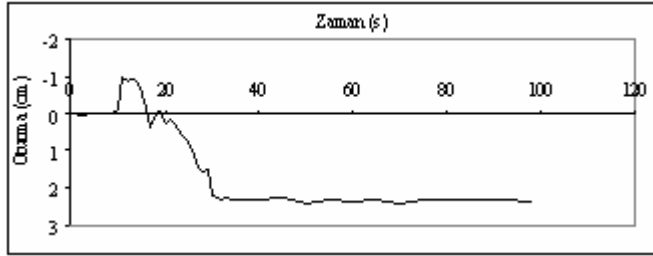
Şekil Ek 1.12 L1-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

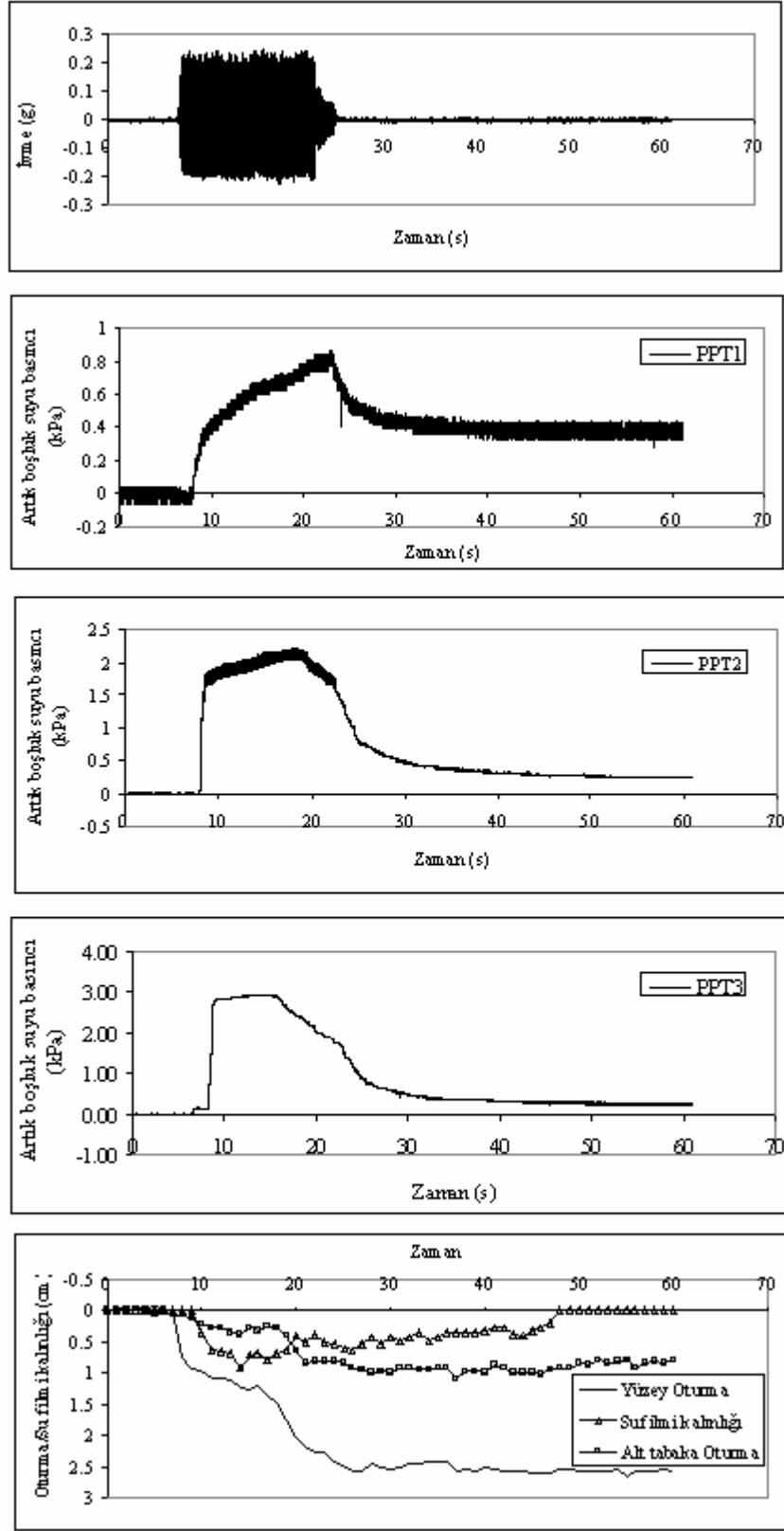


(b)

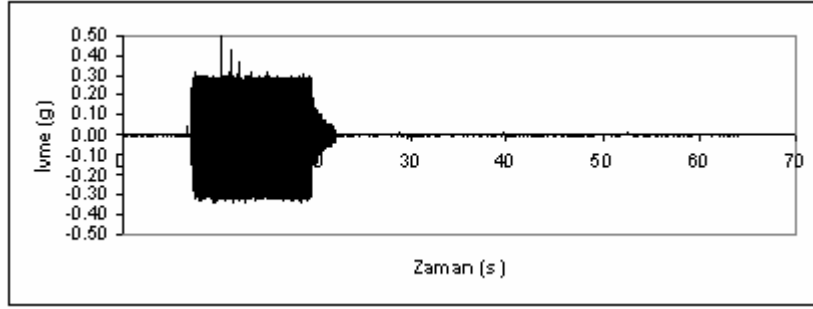


(c)

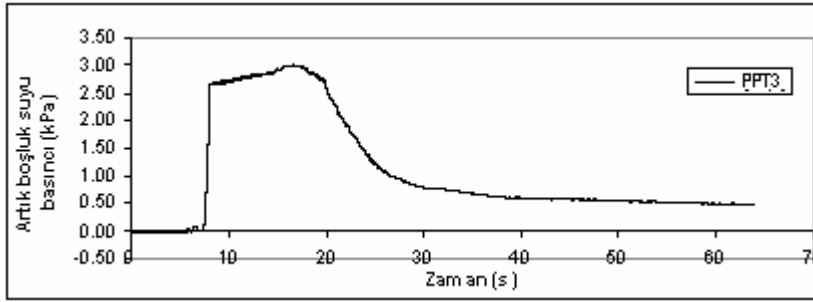
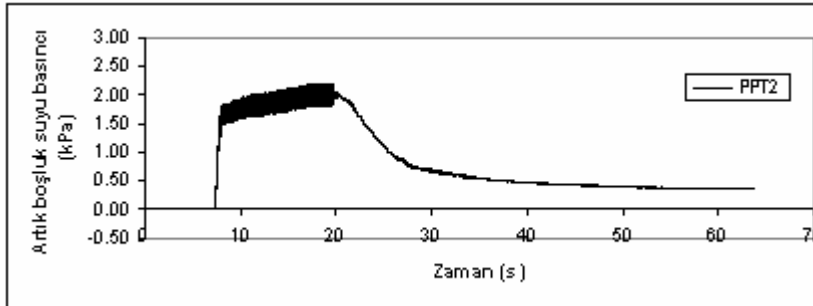
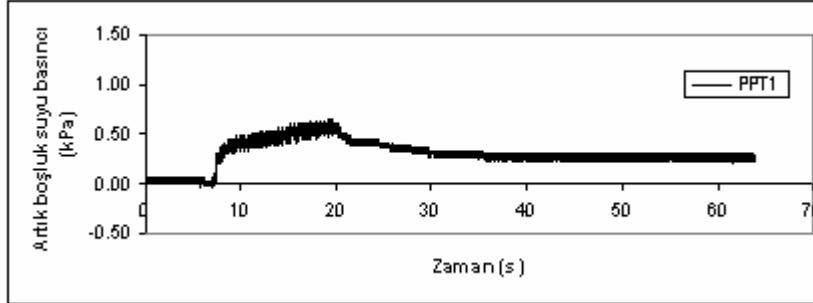
Şekil Ek 1.13 L1-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma ve su filmi kalınlığı-zaman değişimi



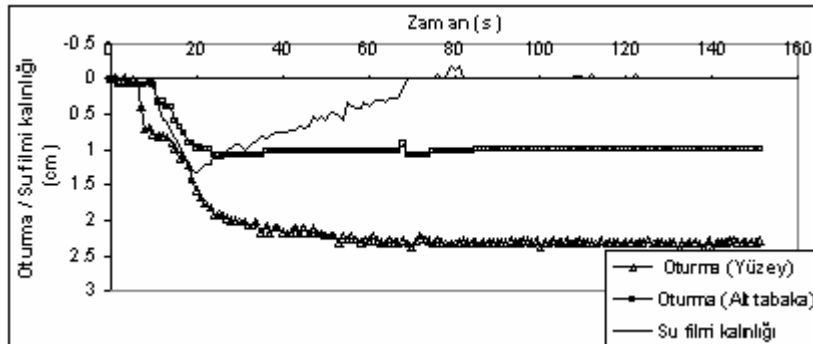
Şekil Ek 1.14 L2-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

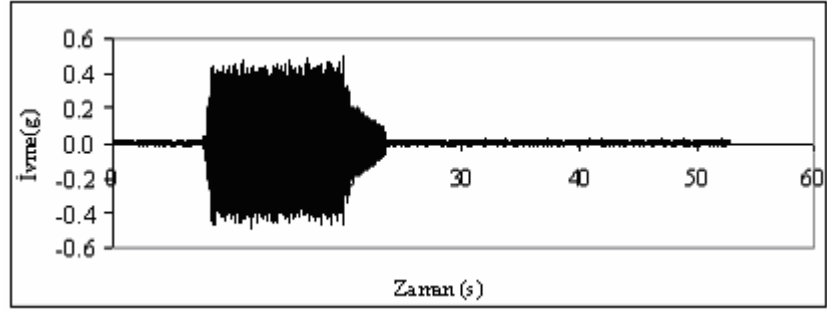


(b)

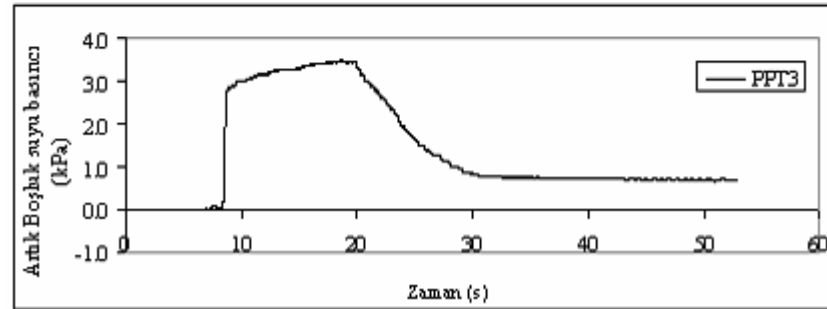
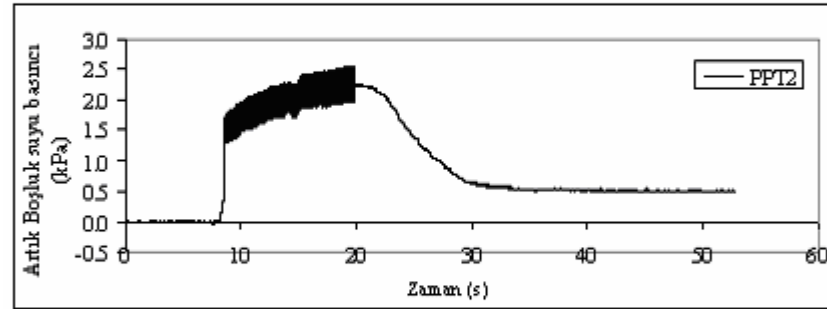
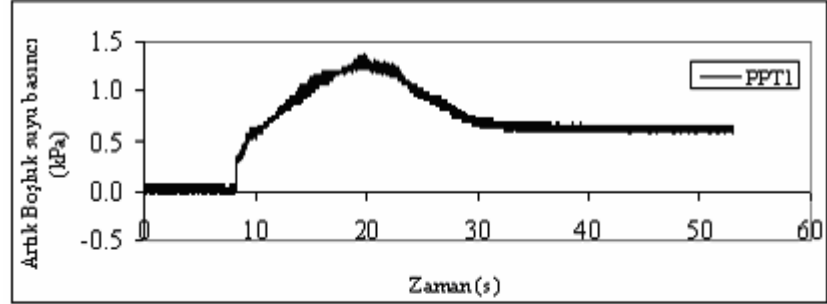


(c)

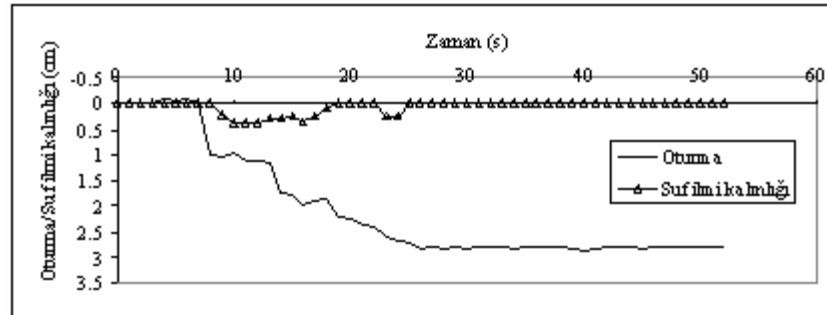
Şekil Ek 1.15 L2-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

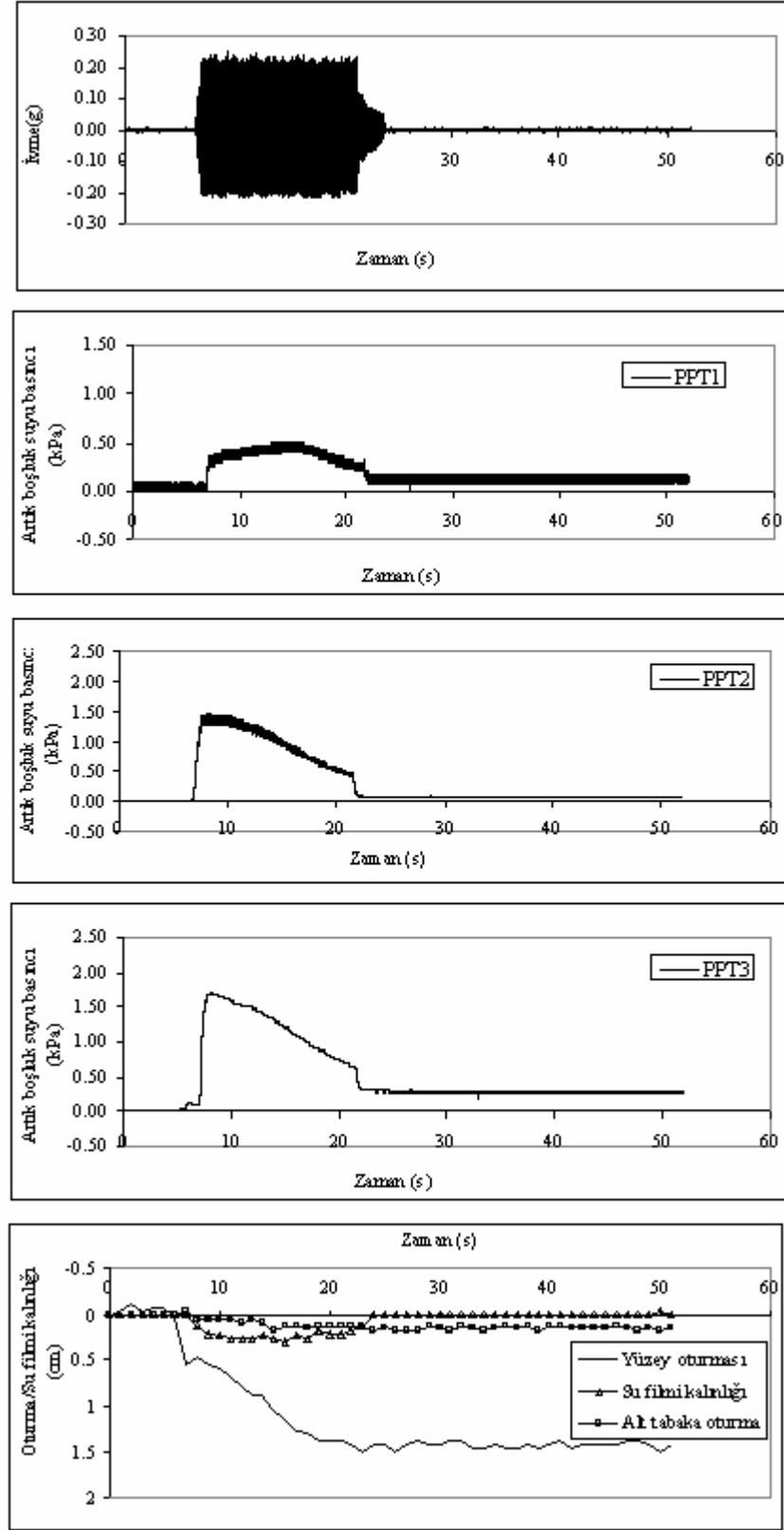


(b)

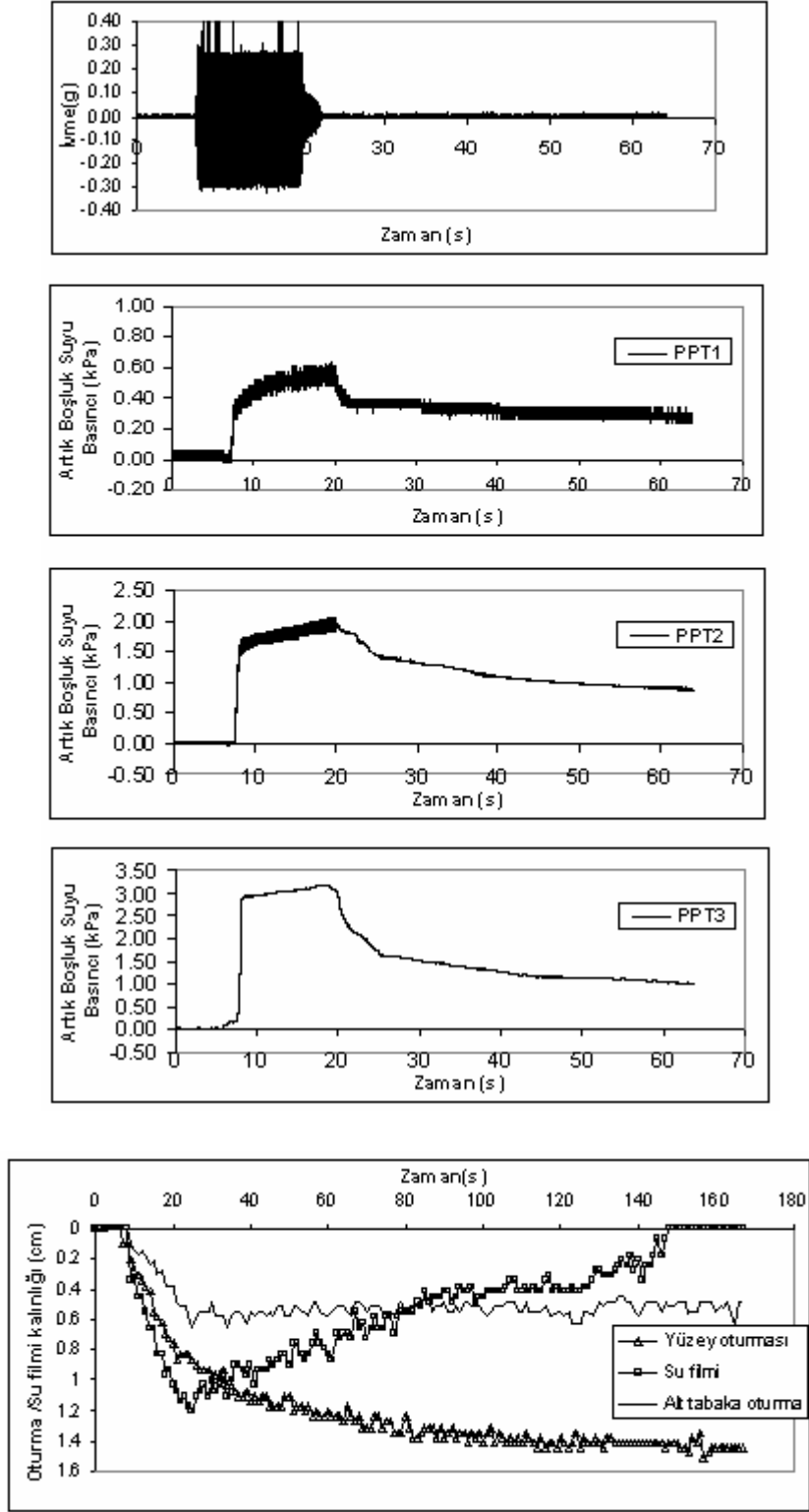


(c)

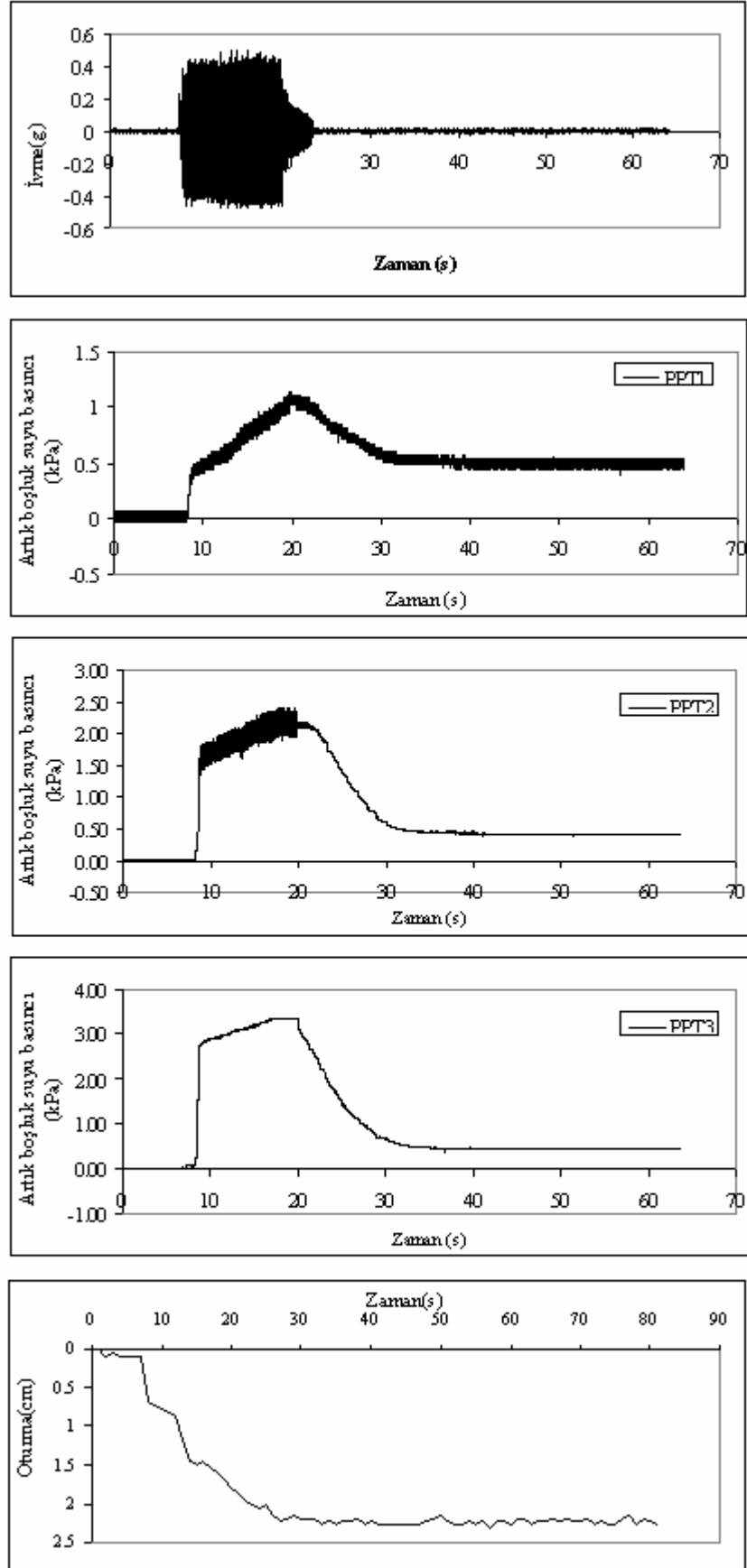
Şekil Ek 1.16. L2-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



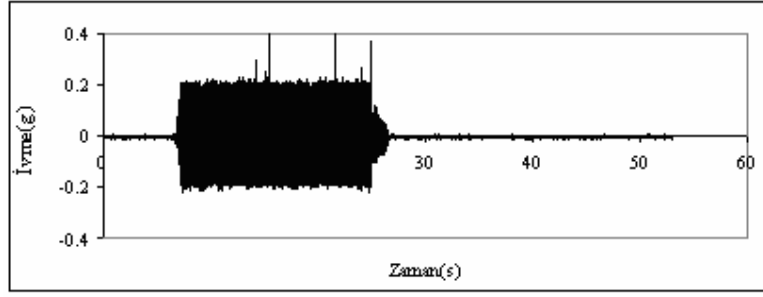
Şekil Ek 1.17. L3-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



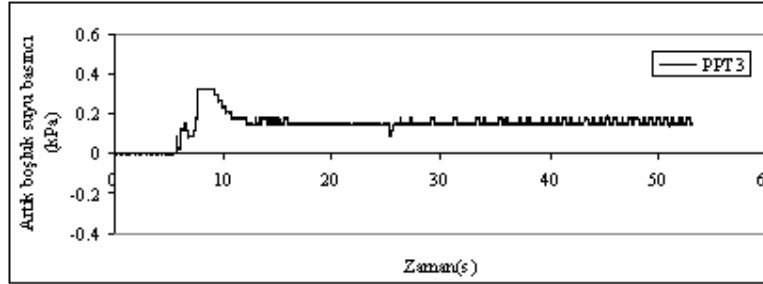
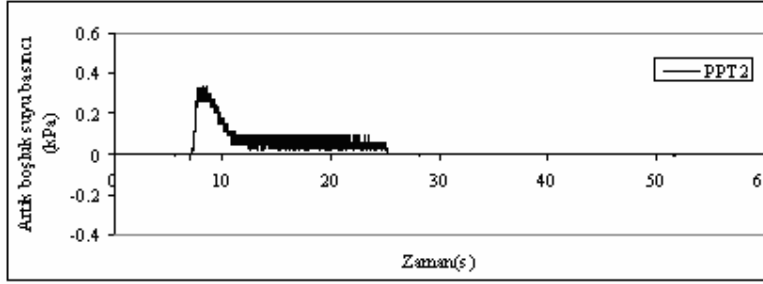
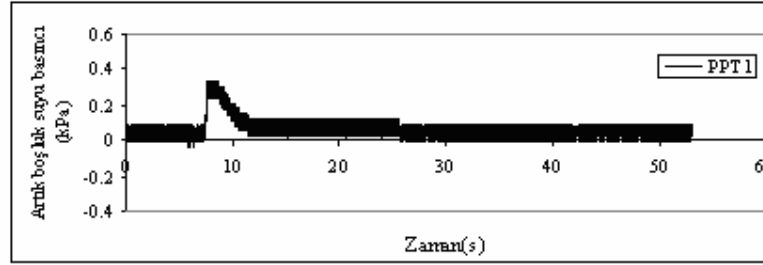
Şekil Ek 1.18 L3-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



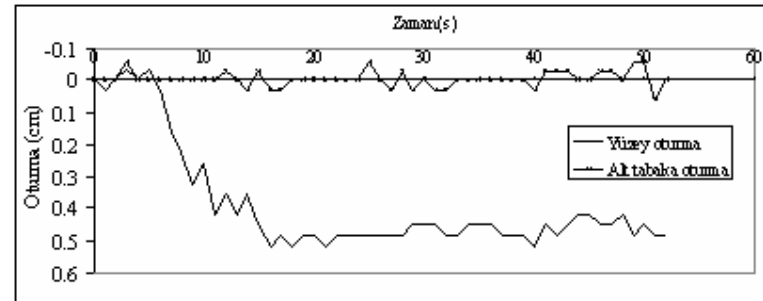
Şekil Ek 1.19 L3-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

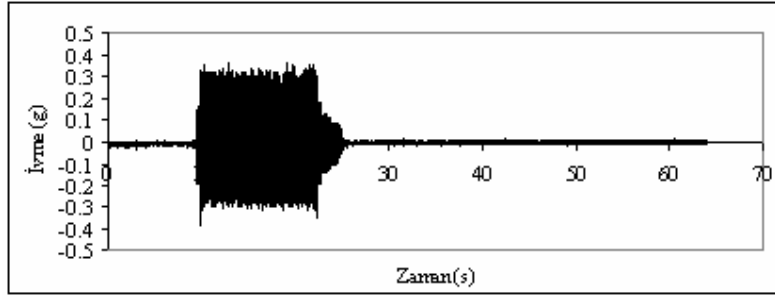


(b)

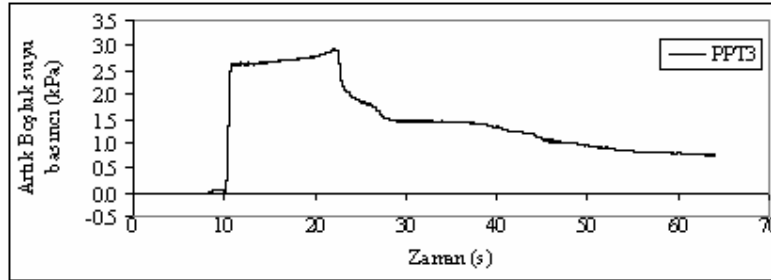
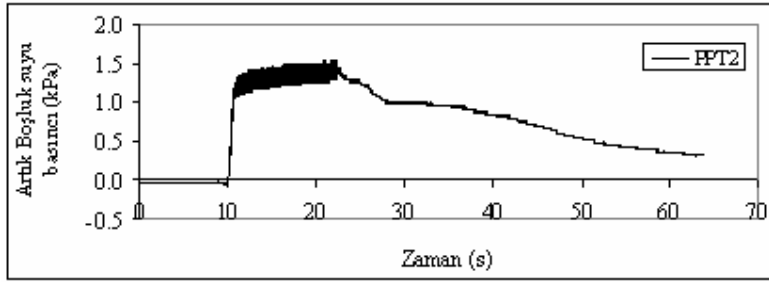
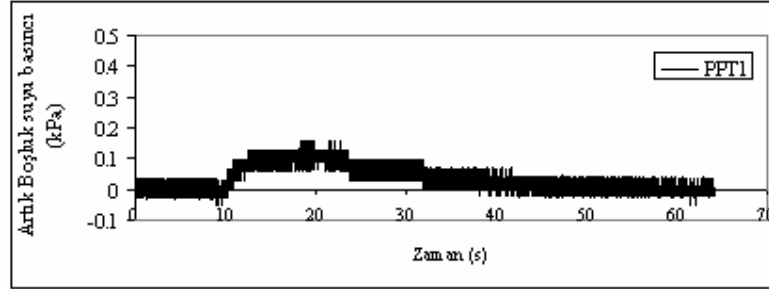


(c)

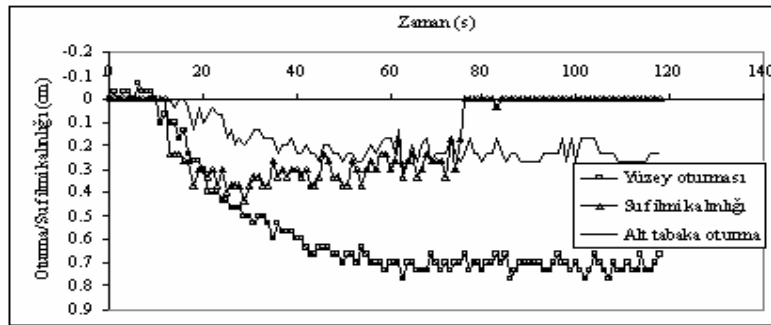
Şekil Ek 1.20 L4-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve alt tabaka oturma-zaman değişimleri



(a)

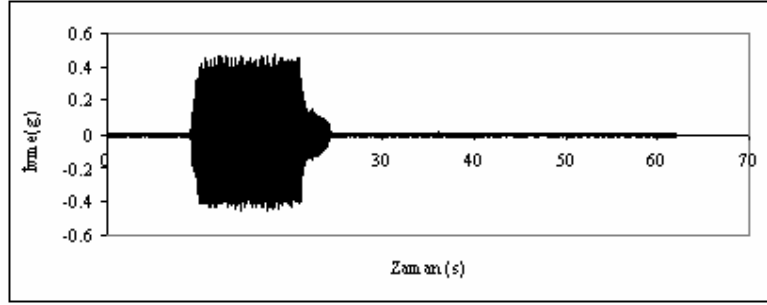


(b)

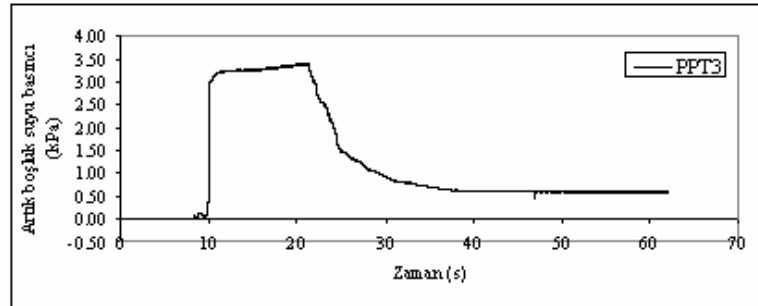
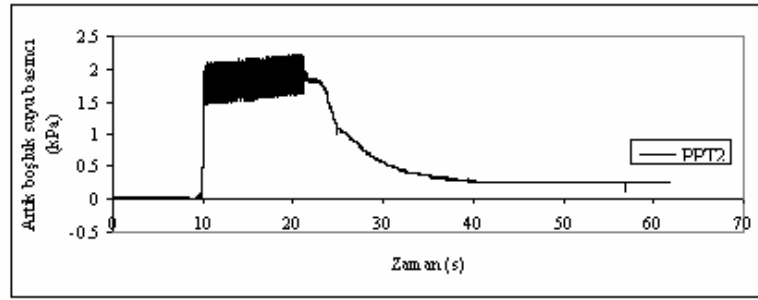
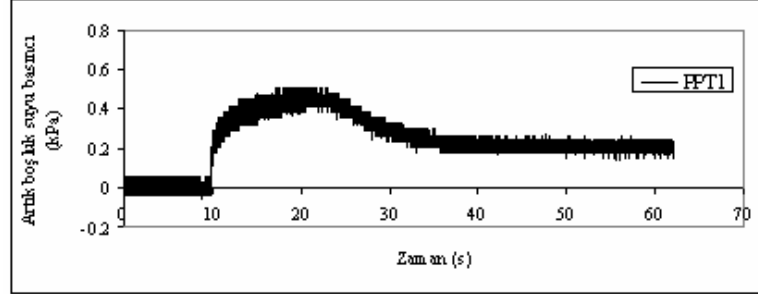


(c)

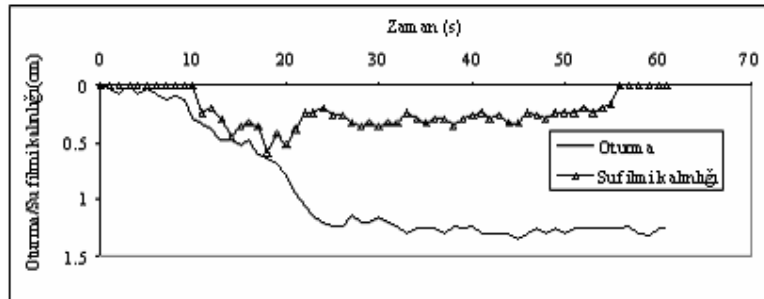
Şekil Ek 1.21 L4-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

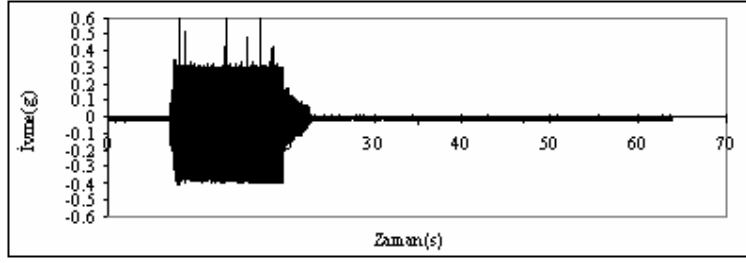


(b)

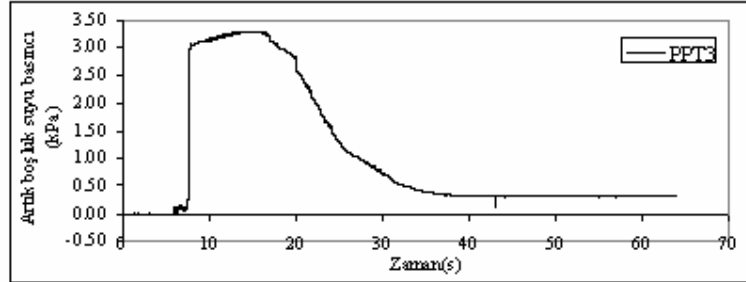
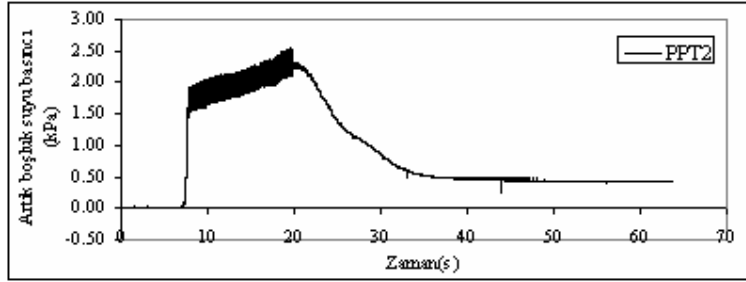
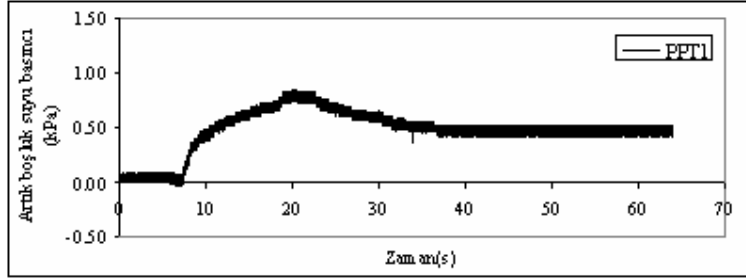


(c)

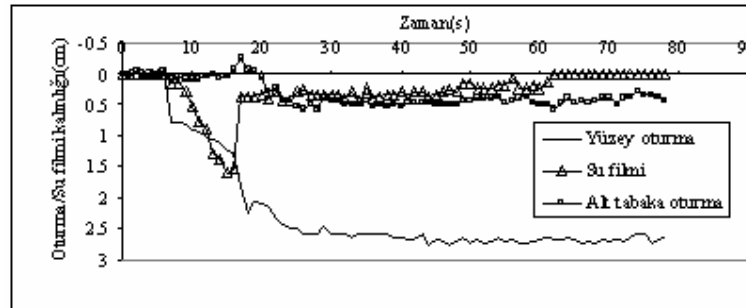
Şekil Ek 1.22 L4-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

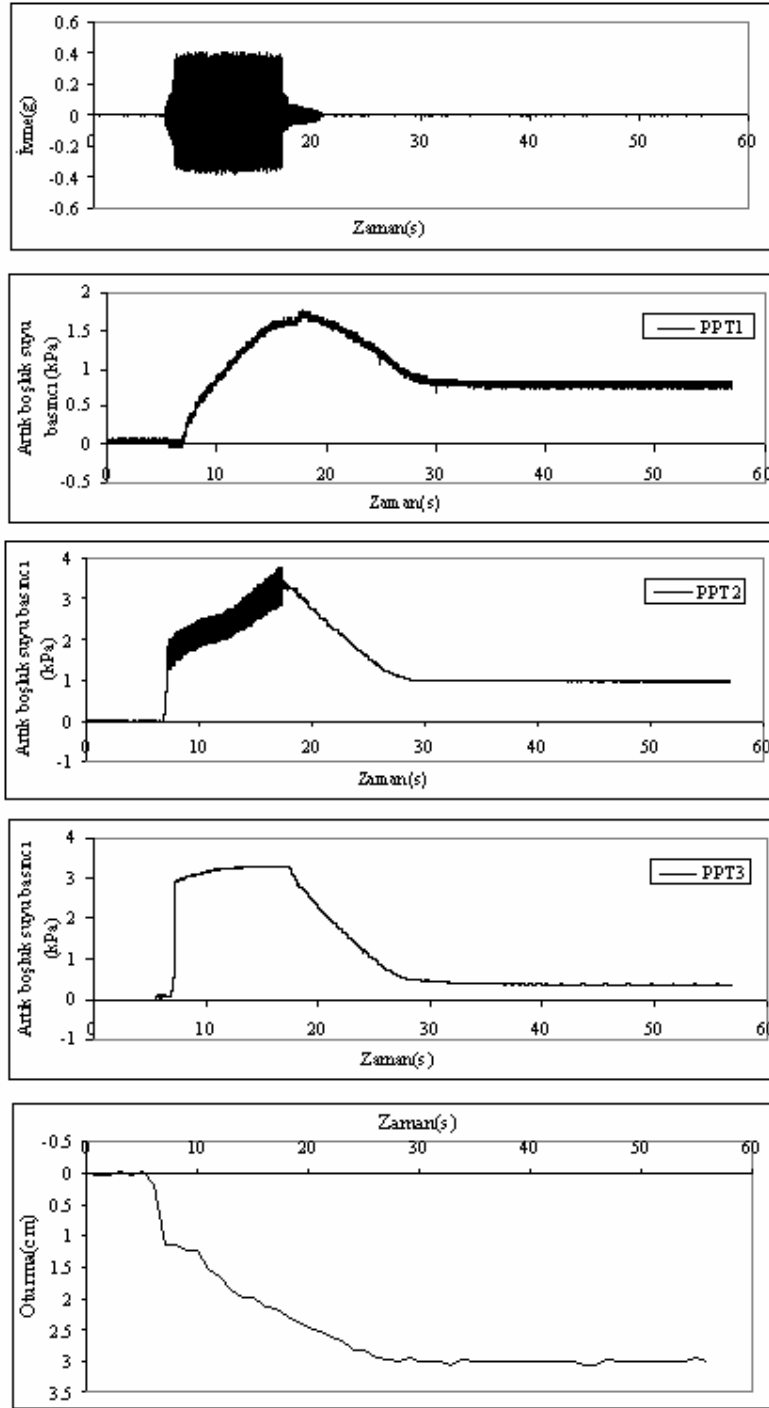


(b)

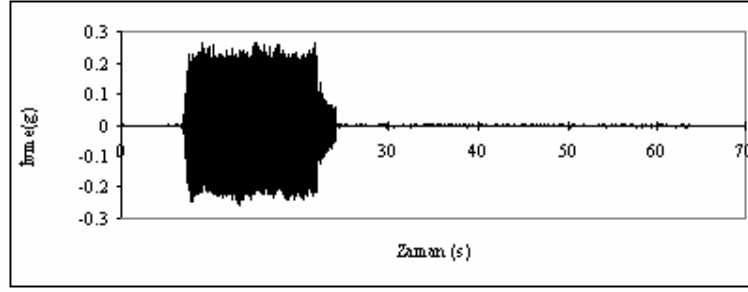


(c)

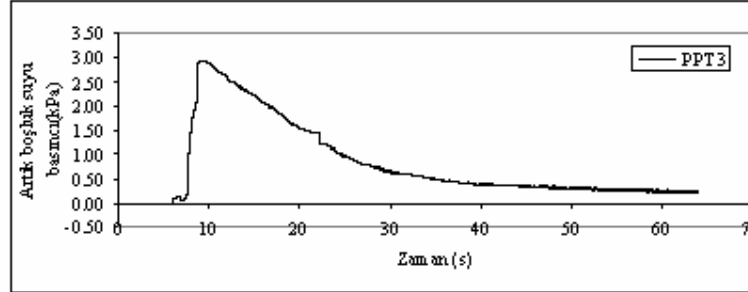
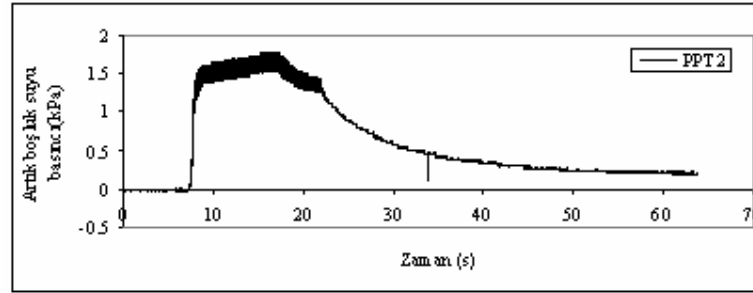
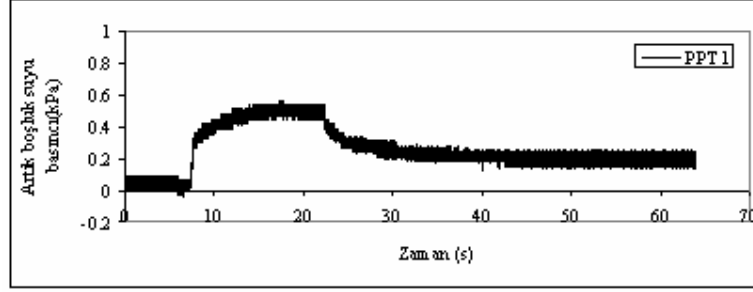
Şekil Ek 1.23 L5-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, Alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



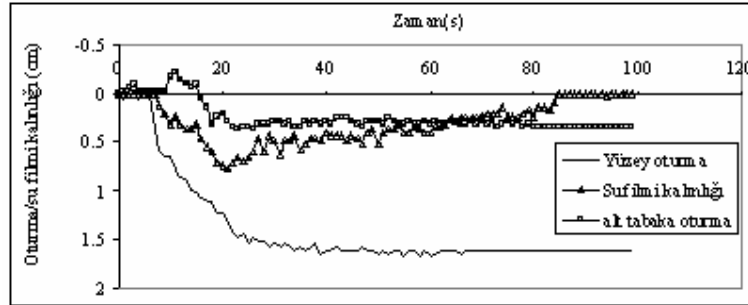
Şekil Ek 1.24 L5-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



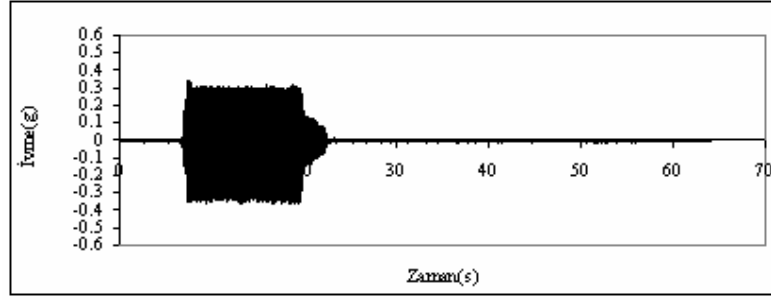
(a)



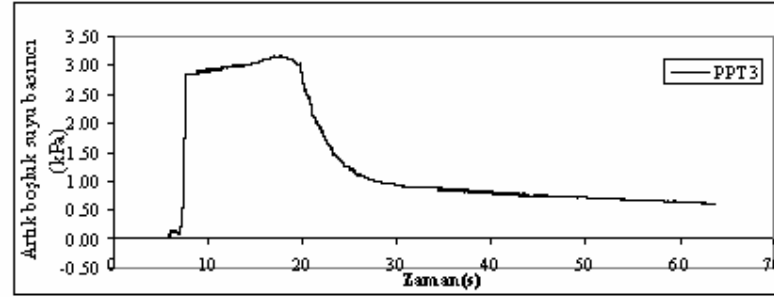
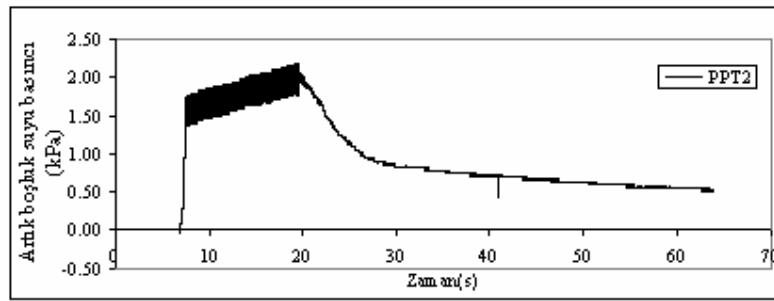
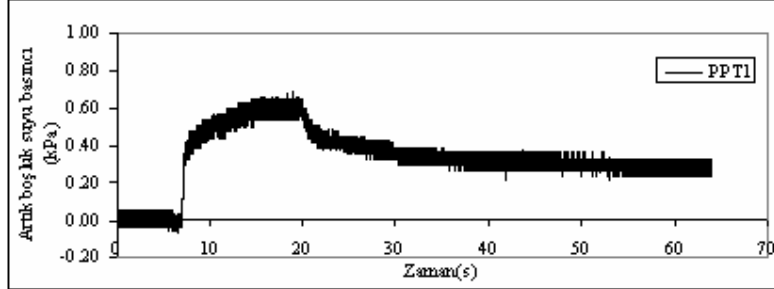
(b)



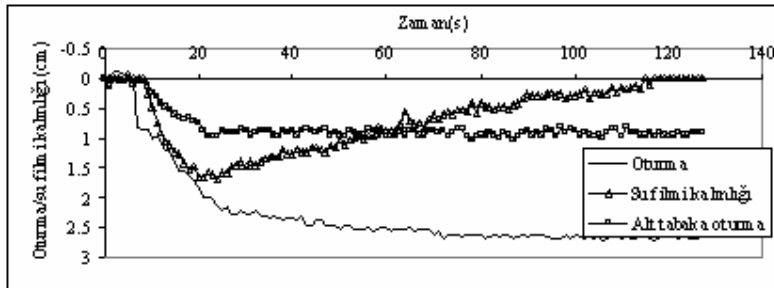
Şekil Ek 1.25 L6-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve sufilmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

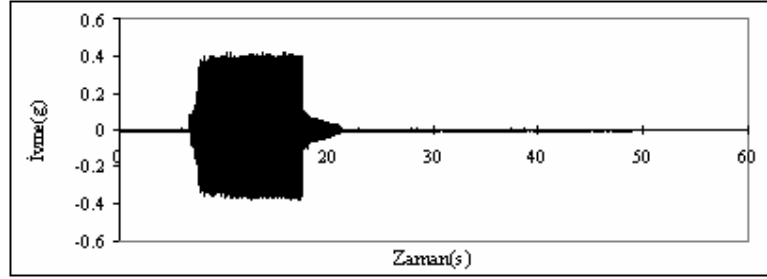


(b)

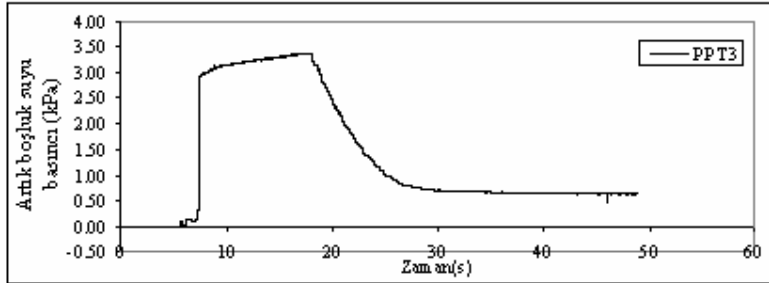
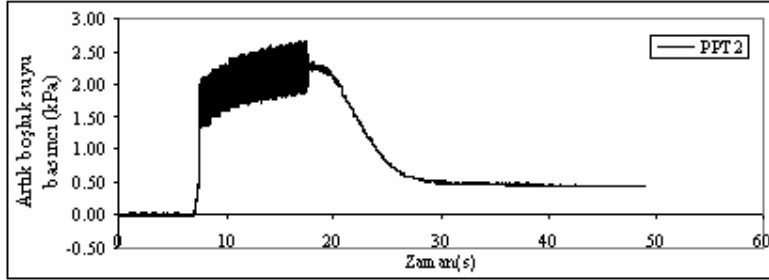
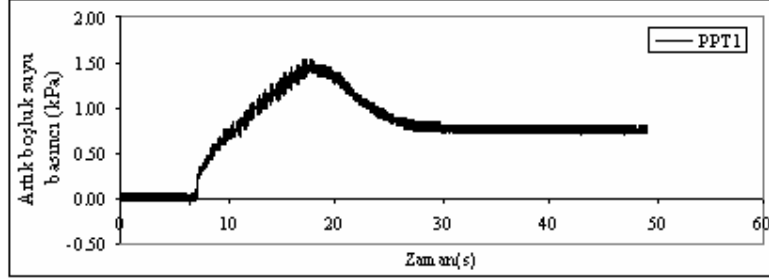


(c)

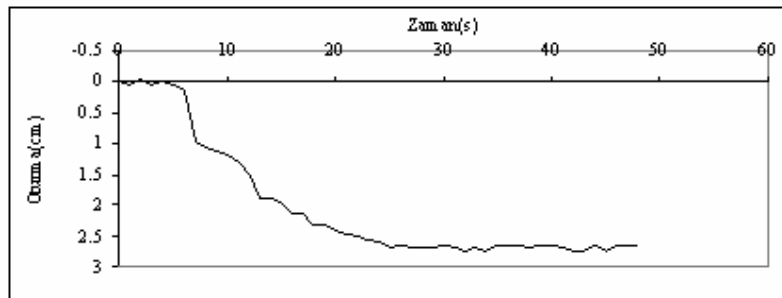
Şekil Ek 1.26 L6-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve sufilm kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

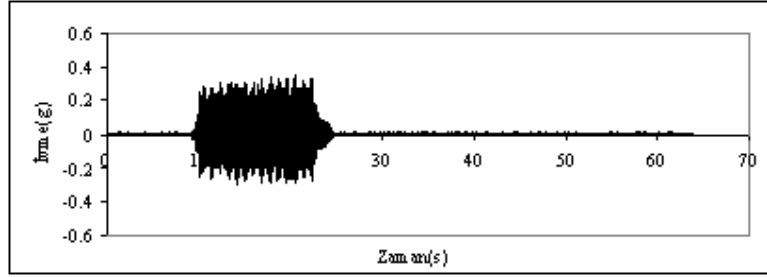


(b)

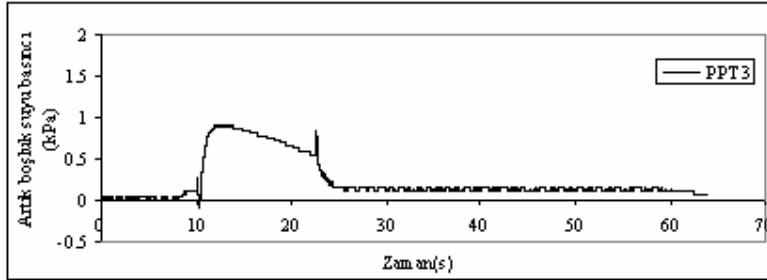
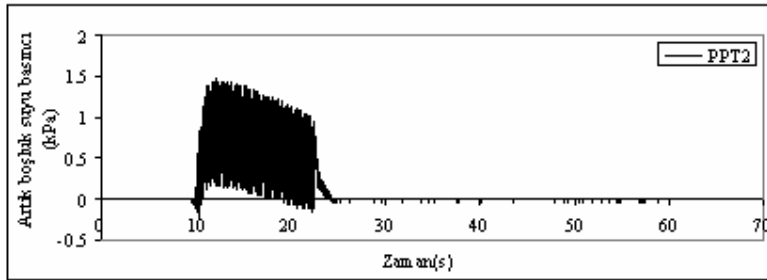
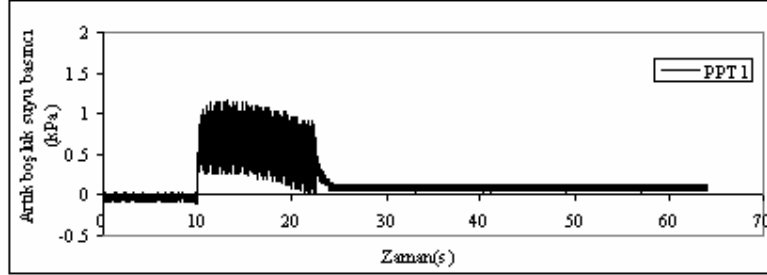


(c)

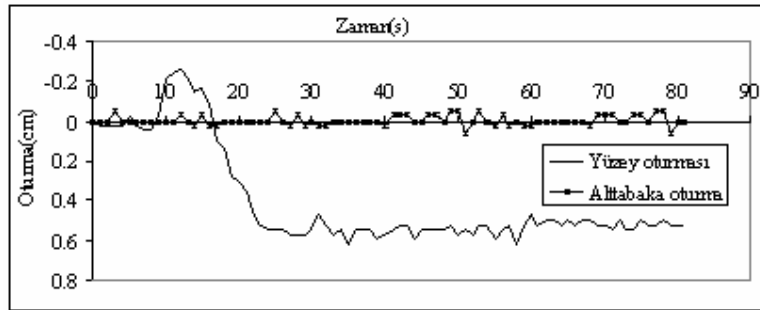
Şekil Ek 1.27 L6-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeyel oturma -zaman değişimi



(a)

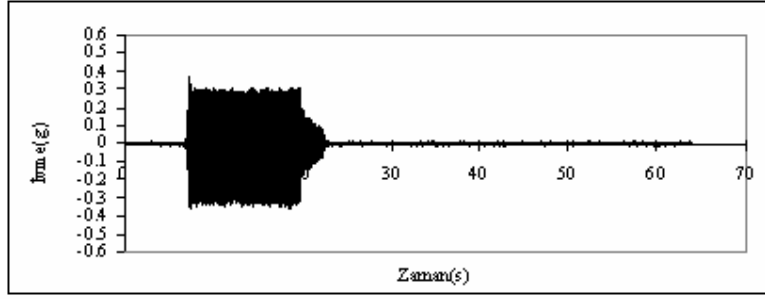


(b)

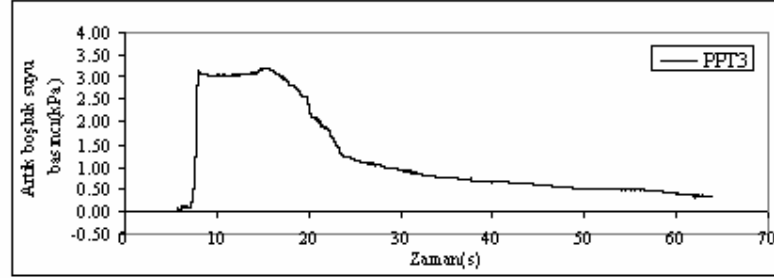
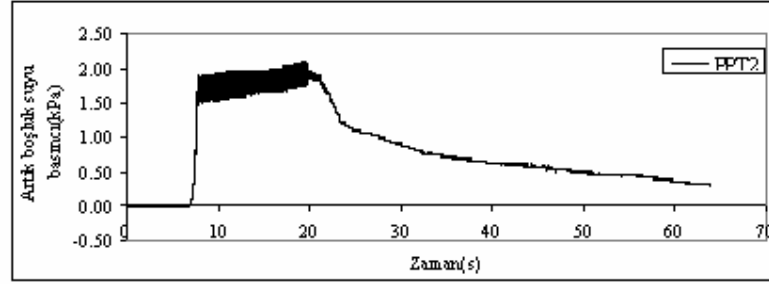
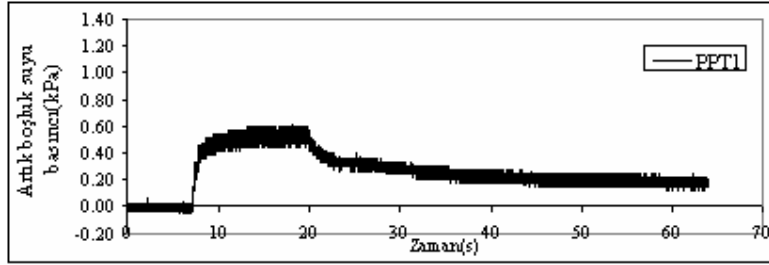


(c)

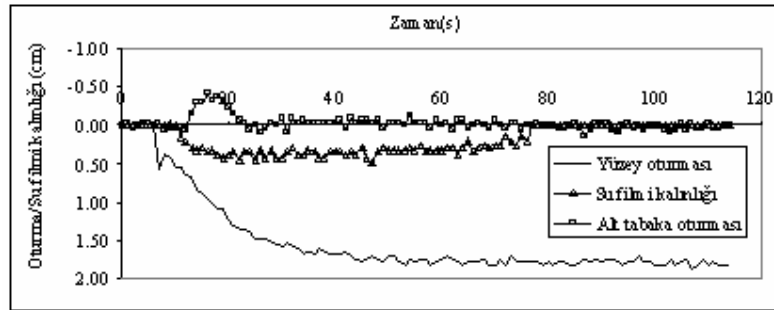
Şekil Ek 1.28 L7-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve alt tabaka oturma-zaman değişimleri



(a)

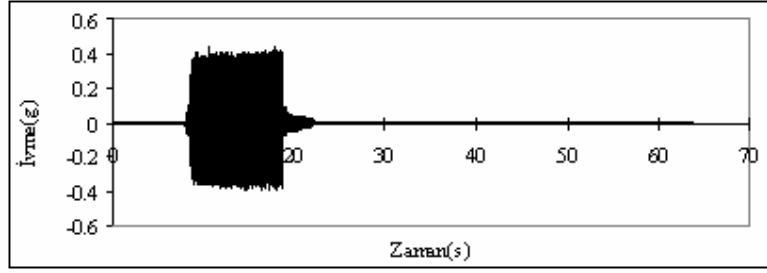


(b)

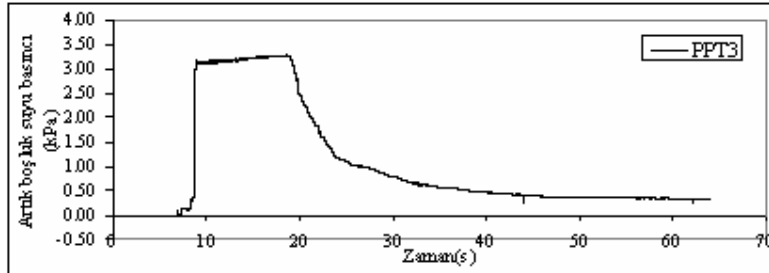
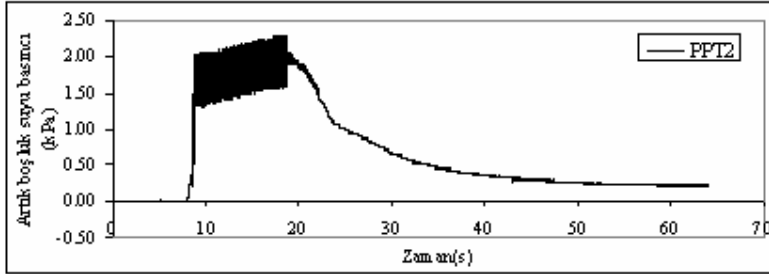
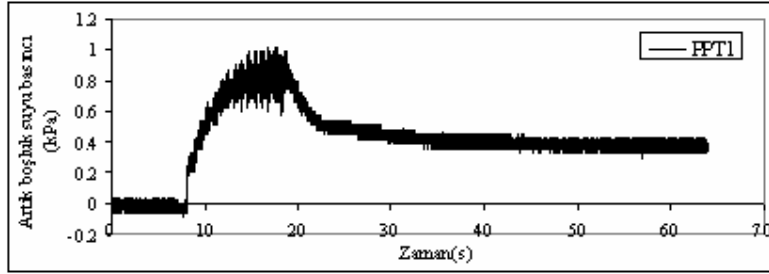


(c)

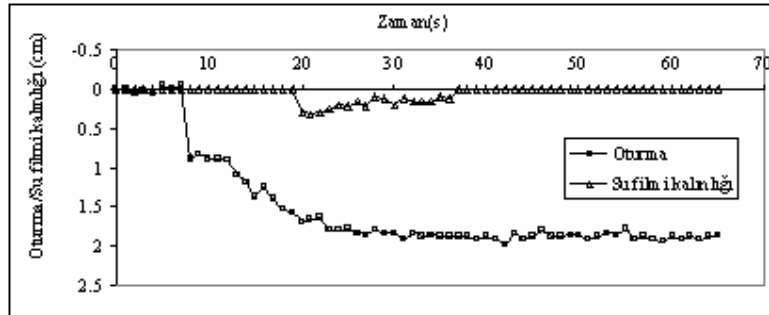
Şekil Ek 1.29 L7-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

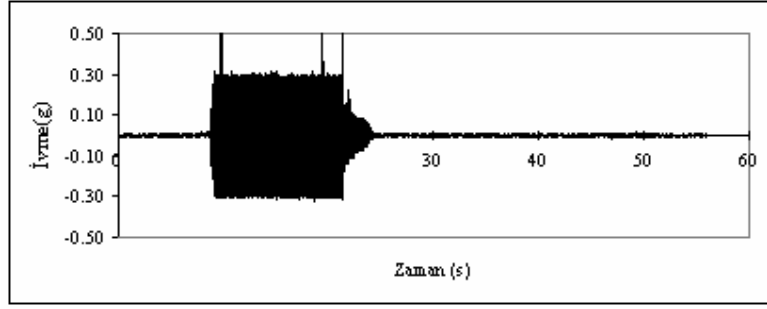


(b)

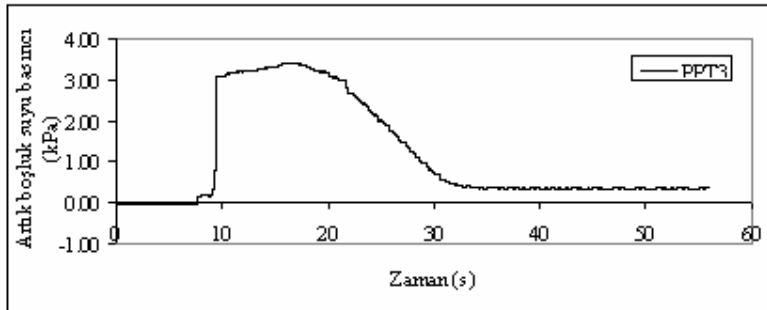
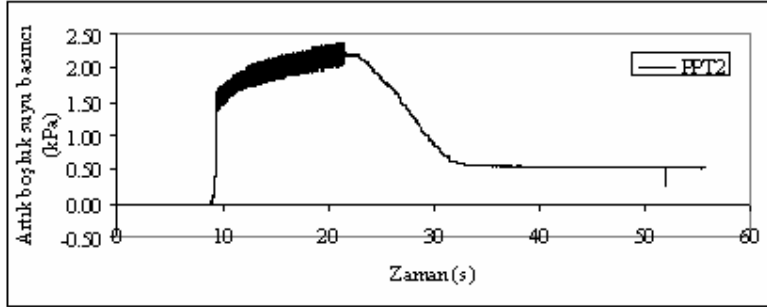
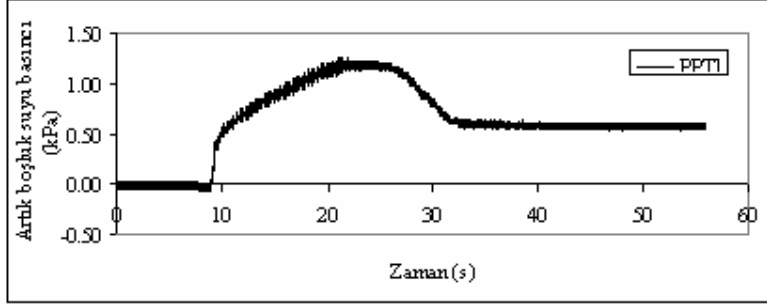


(c)

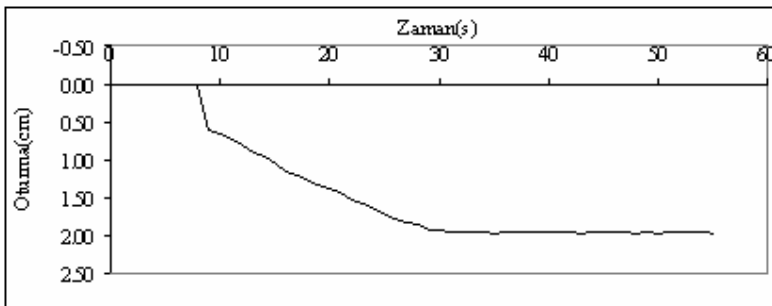
Şekil Ek 1.30 L7-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



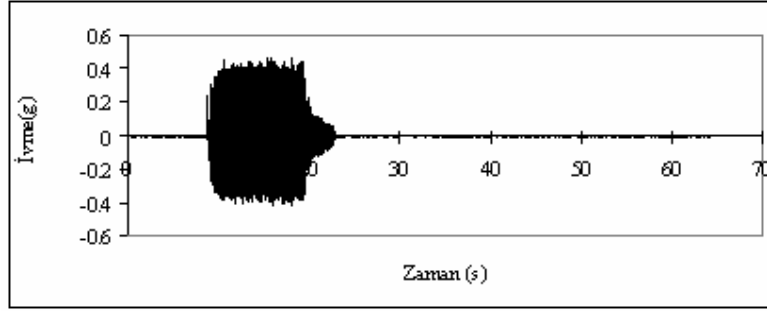
(a)



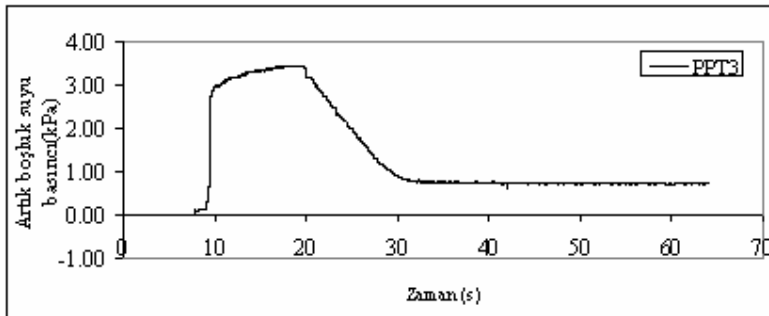
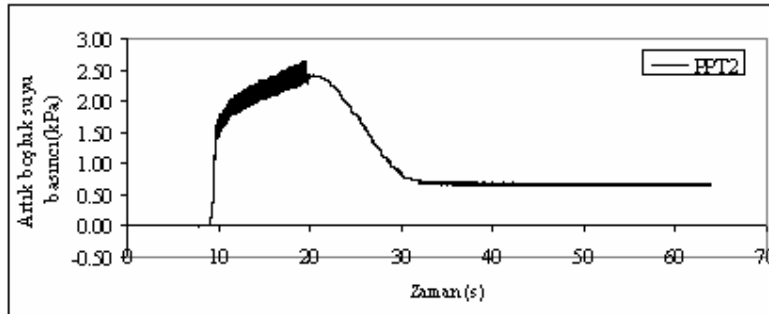
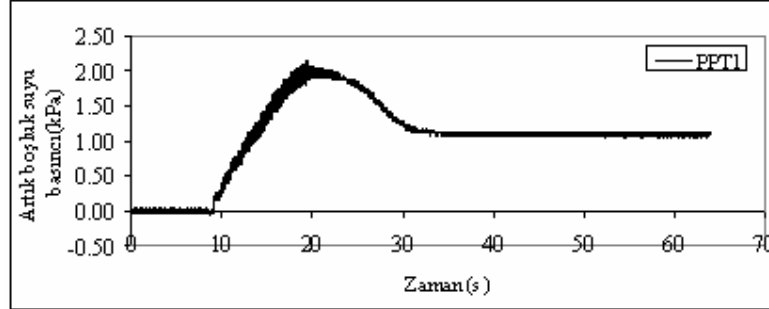
(b)



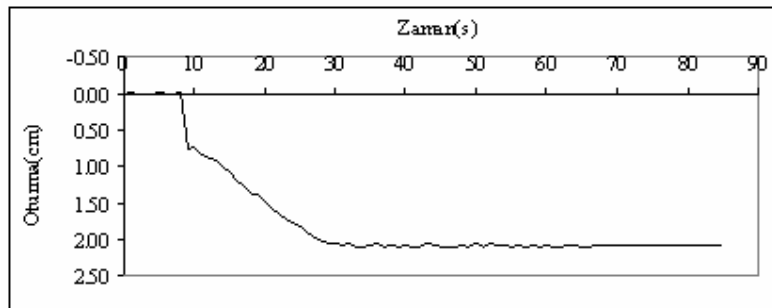
Şekil Ek 1.31 L8-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



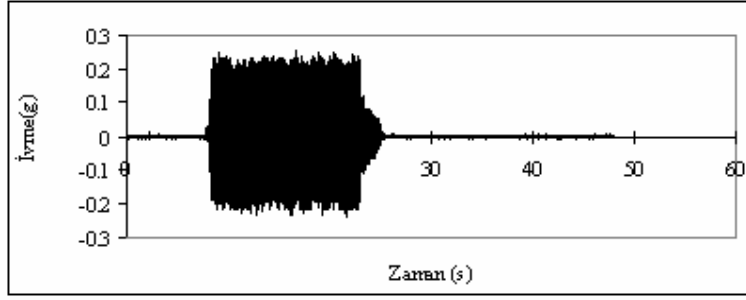
(a)



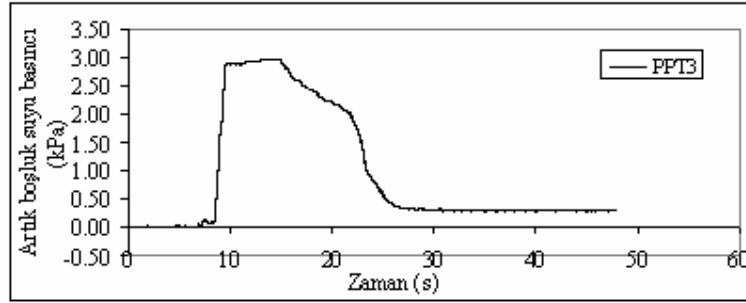
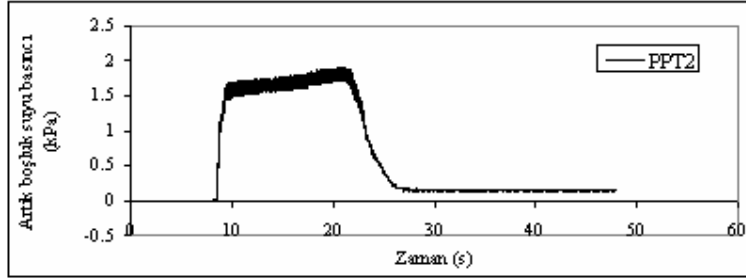
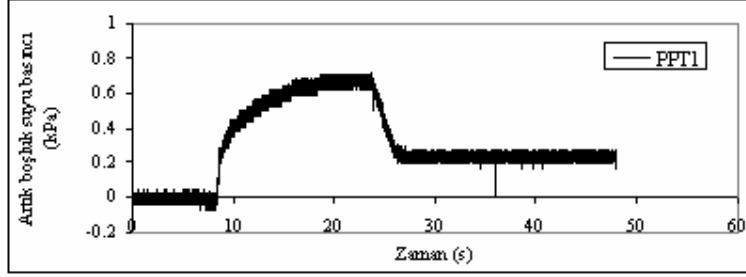
(b)



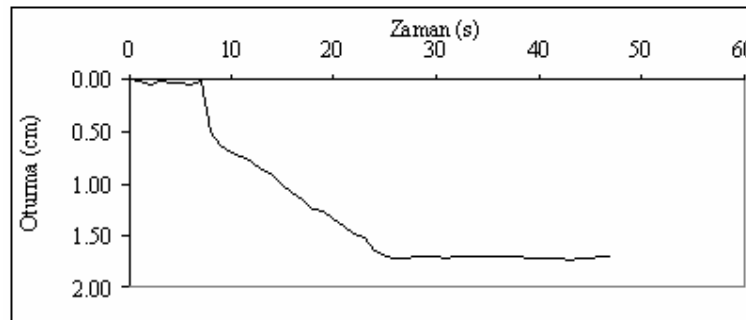
Şekil Ek 1.32 L8-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

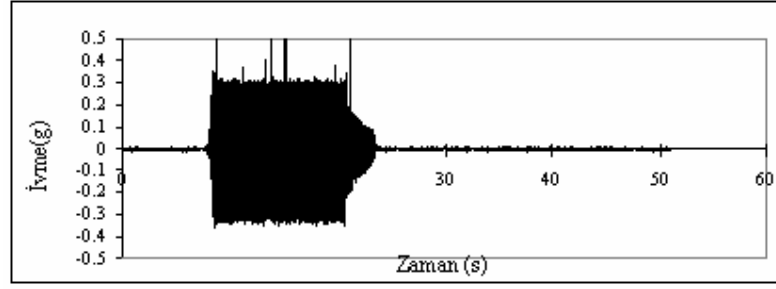


(b)

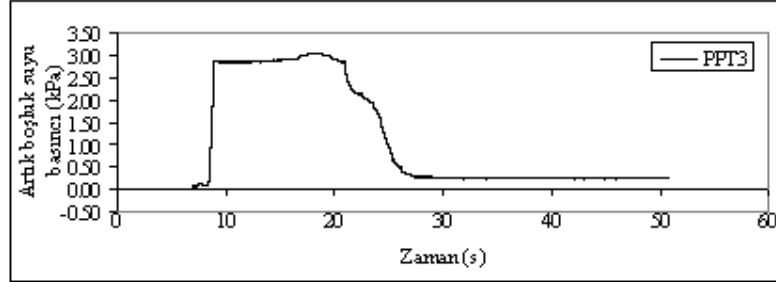
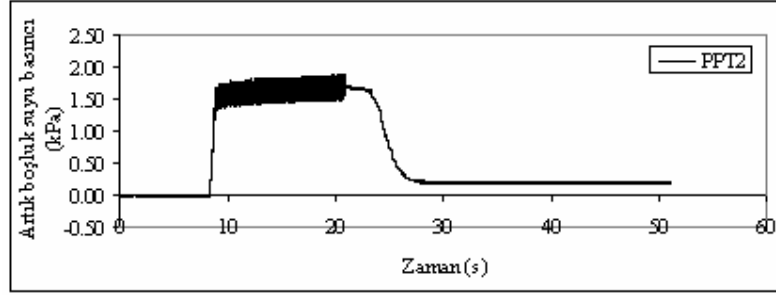
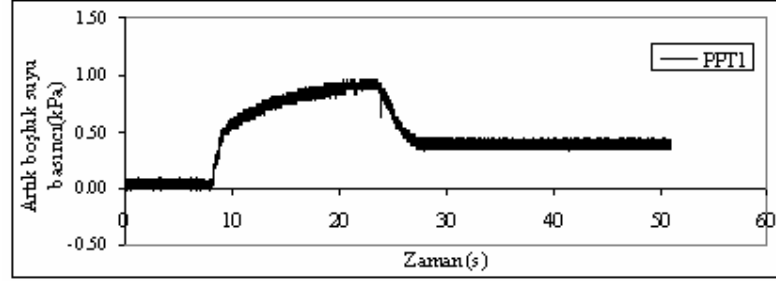


(c)

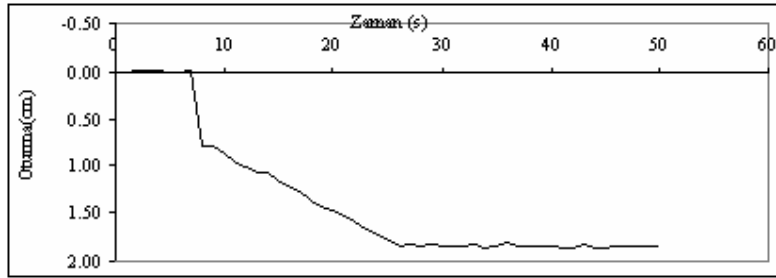
Şekil Ek 1.33 L9-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

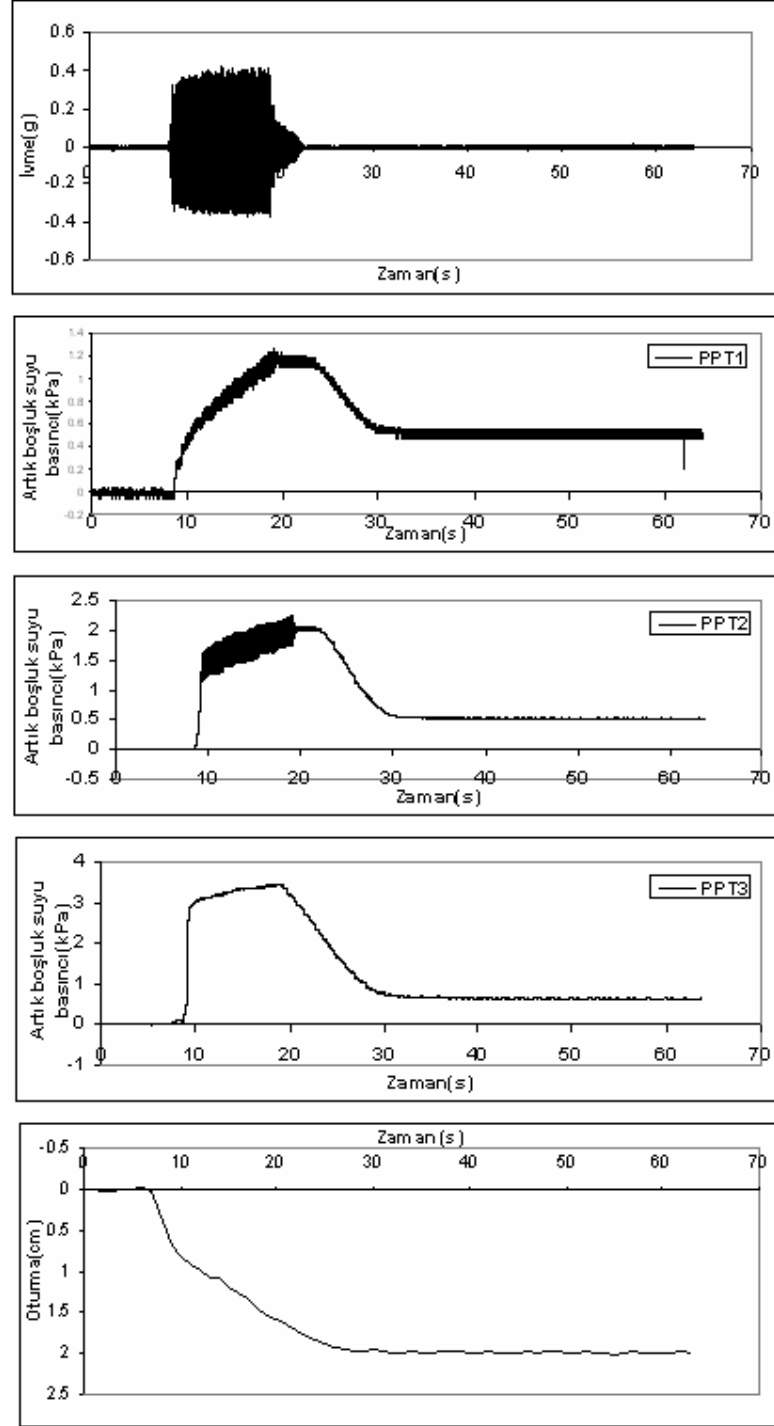


(b)

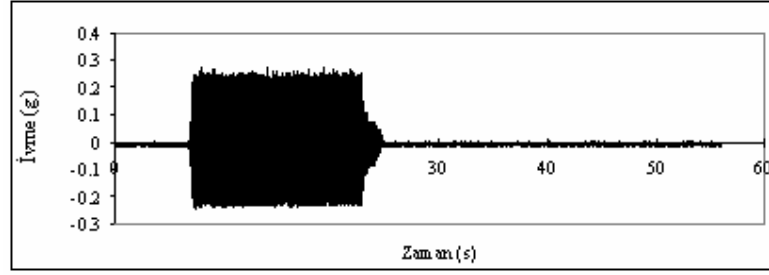


(c)

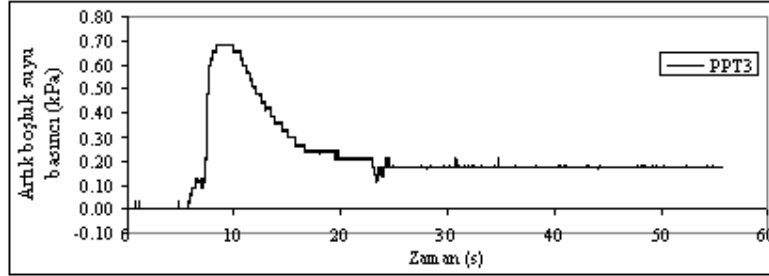
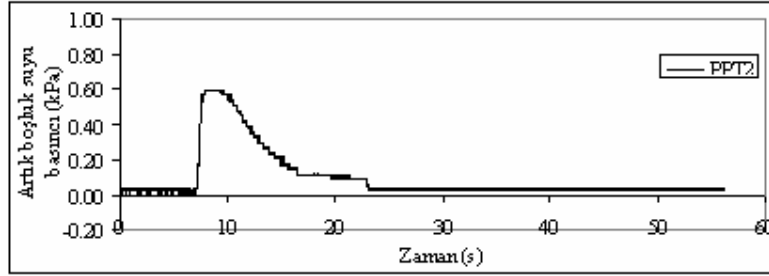
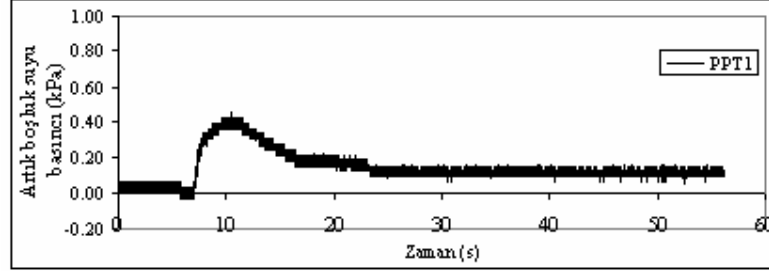
Şekil Ek 1.34 L9-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



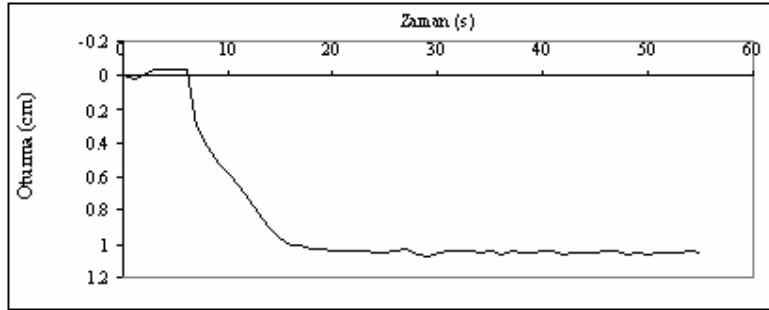
Şekil Ek 1.35 L9-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

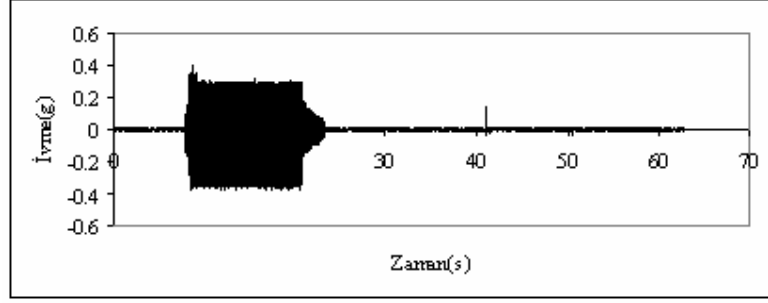


(b)

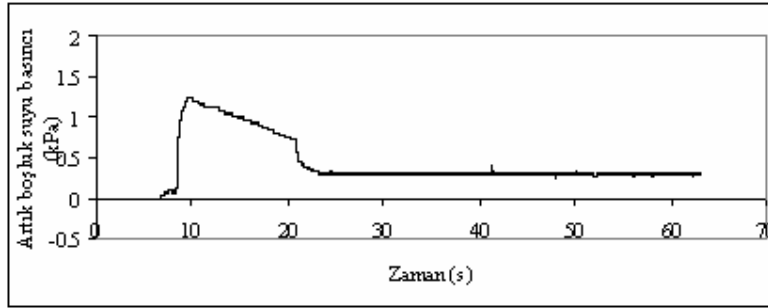
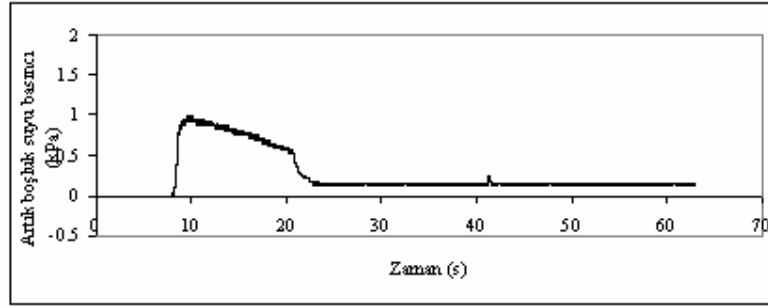
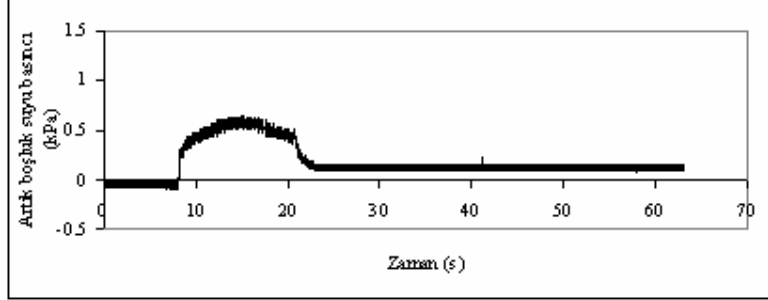


(c)

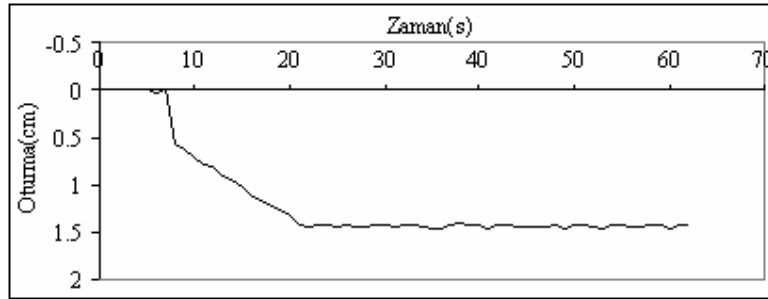
Şekil Ek 1.36 L10-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



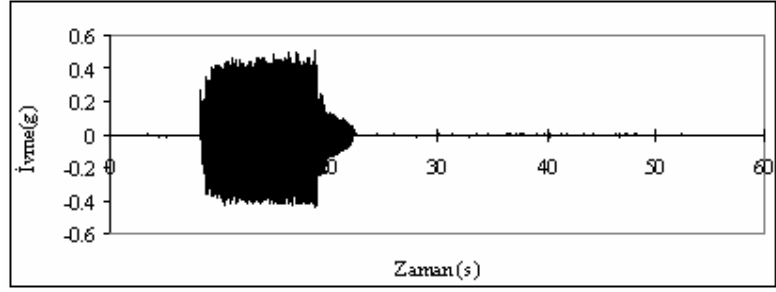
(a)



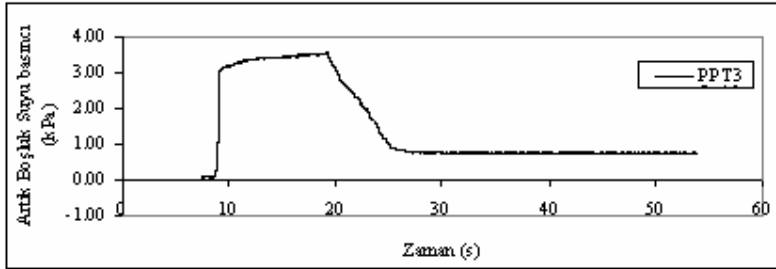
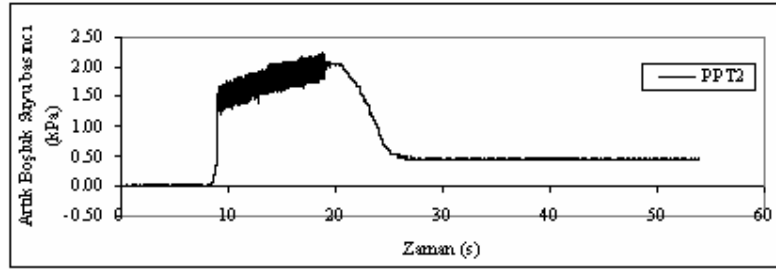
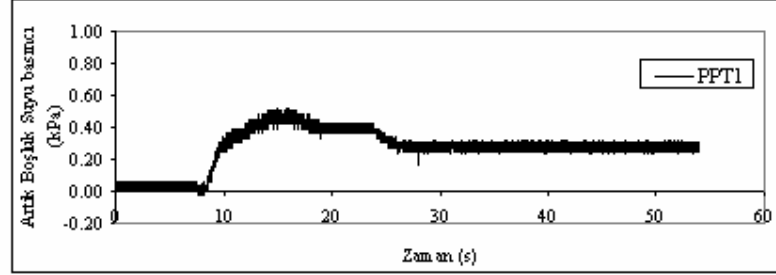
(b)



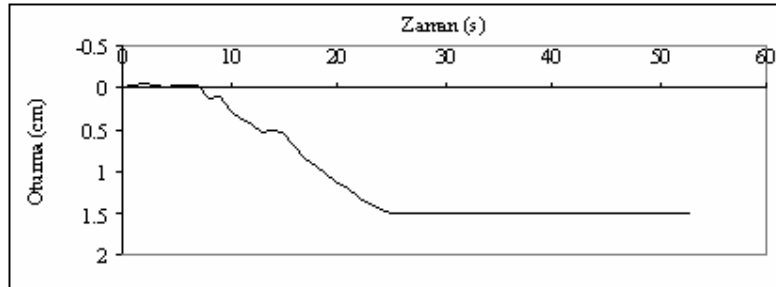
Şekil Ek 1.37 L10-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

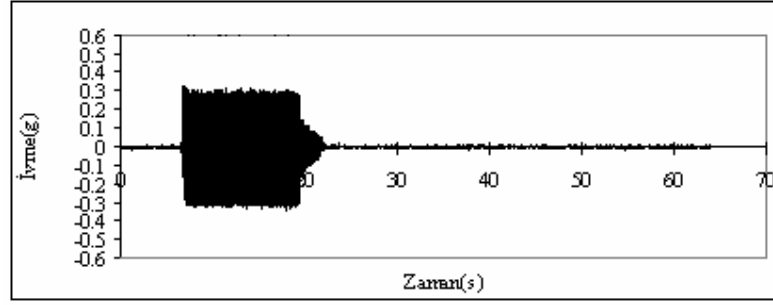


(b)

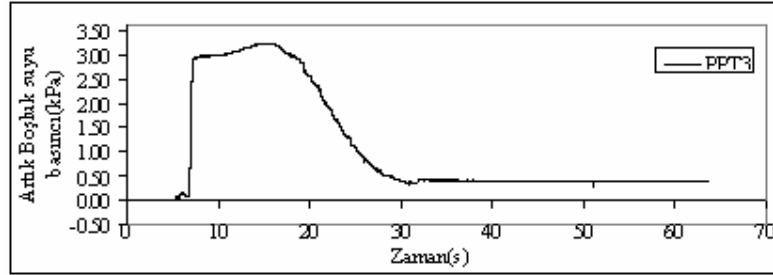
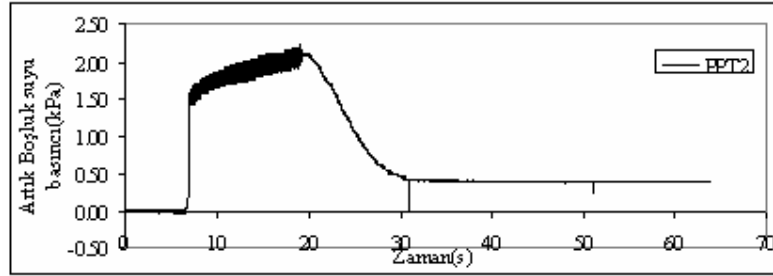
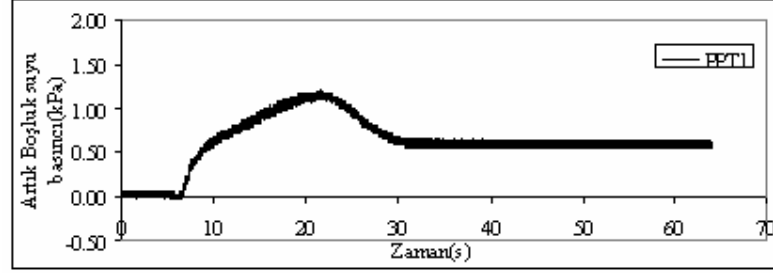


(c)

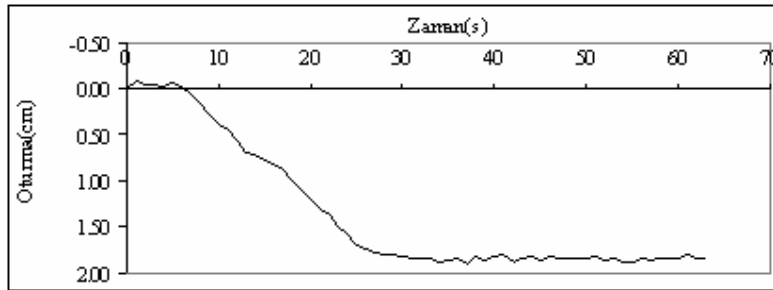
Şekil Ek 1.38 L10-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

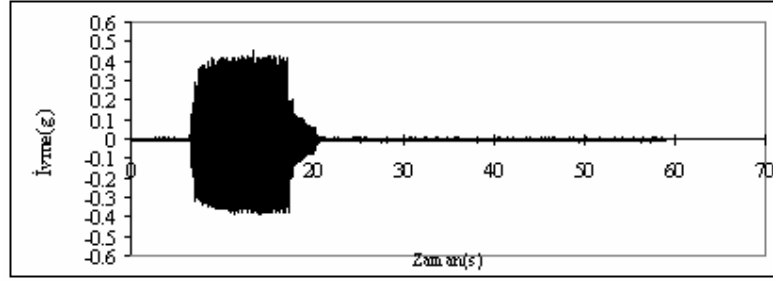


(b)

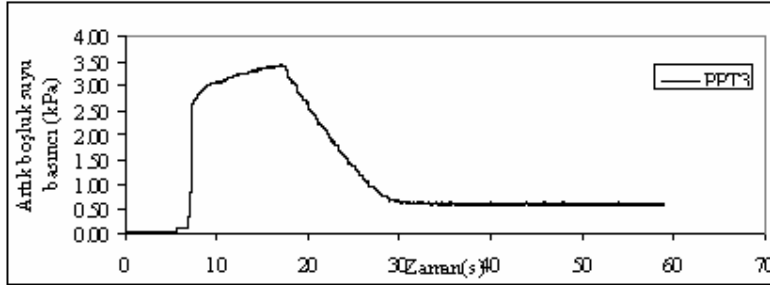
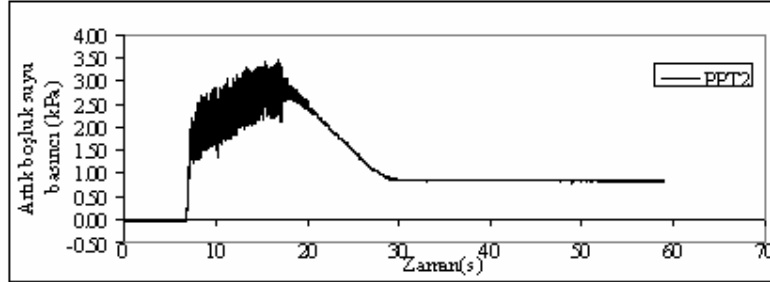
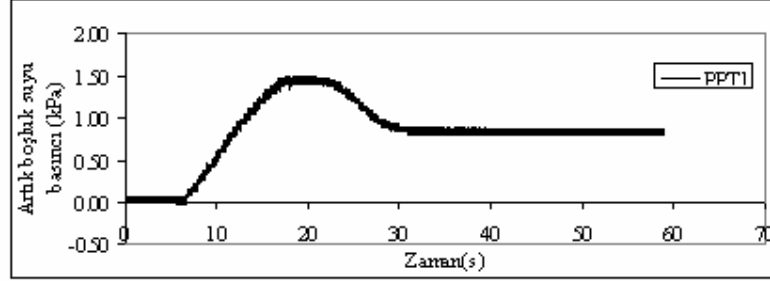


(c)

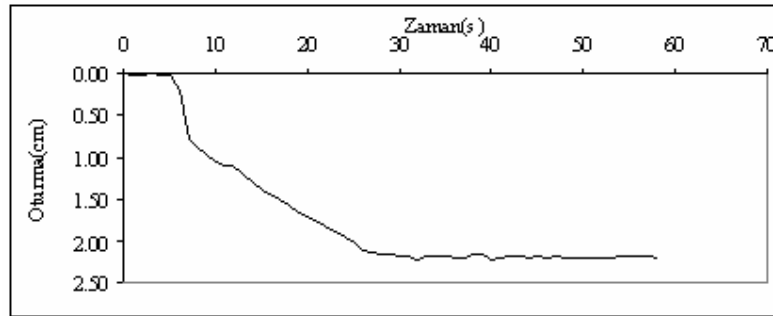
Şekil Ek 1.39 L11-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeyel oturma -zaman değişimi



(a)

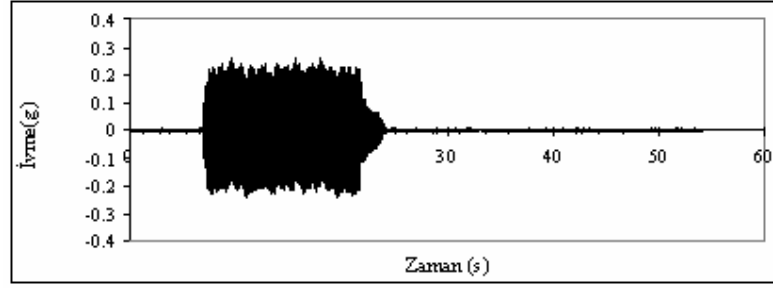


(b)

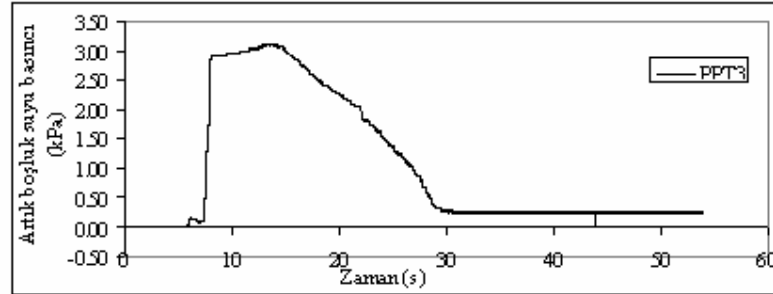
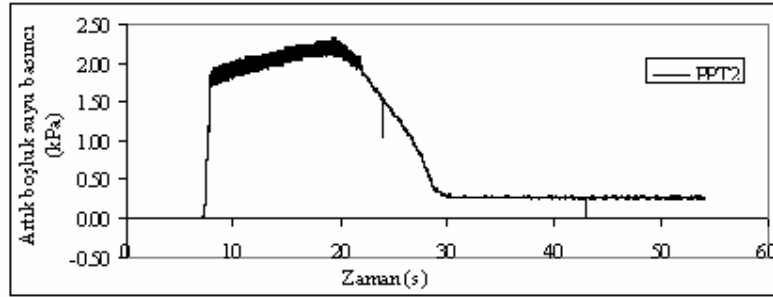
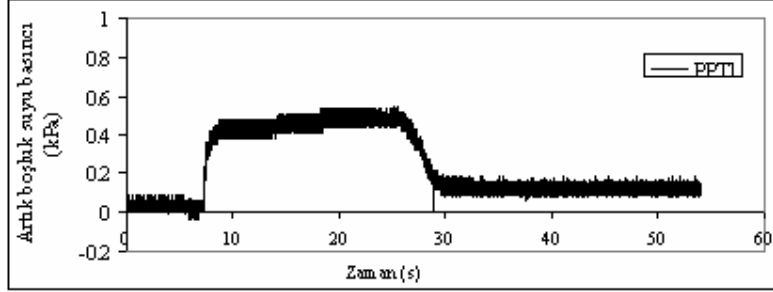


(c)

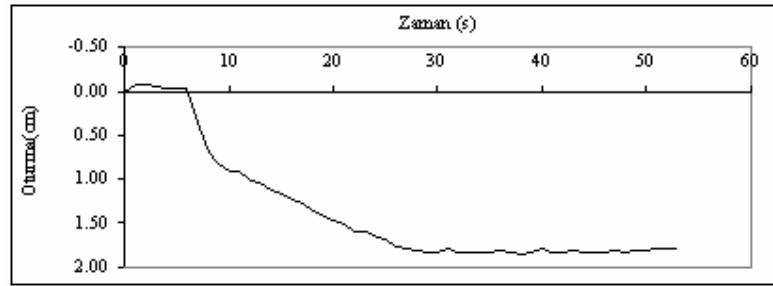
Şekil Ek 1.40 L11-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

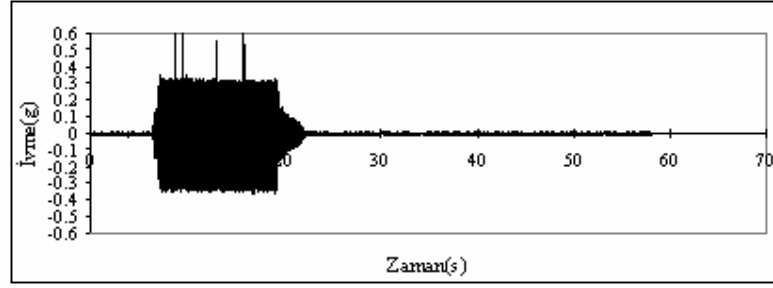


(b)

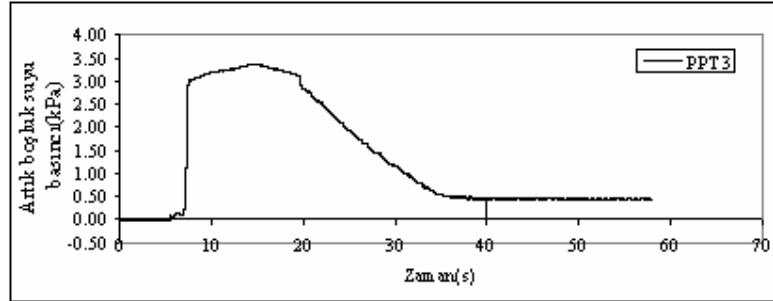
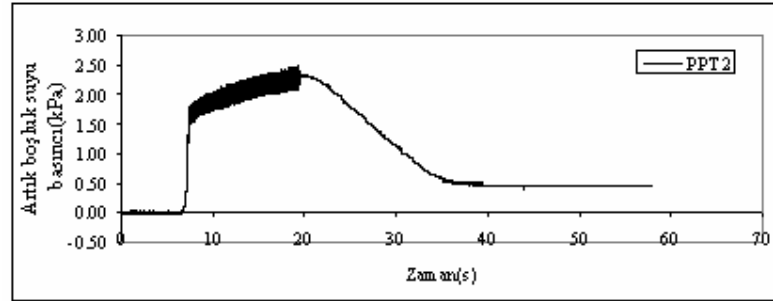
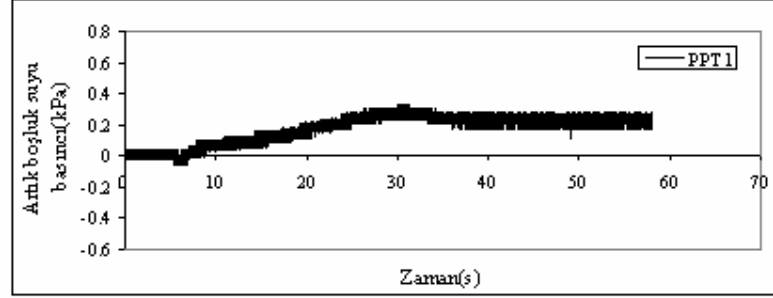


(c)

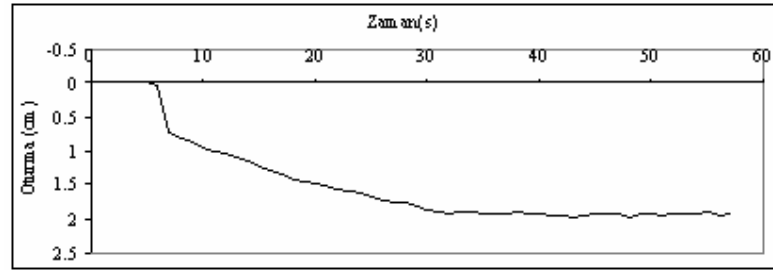
Şekil Ek 1.41 L12-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

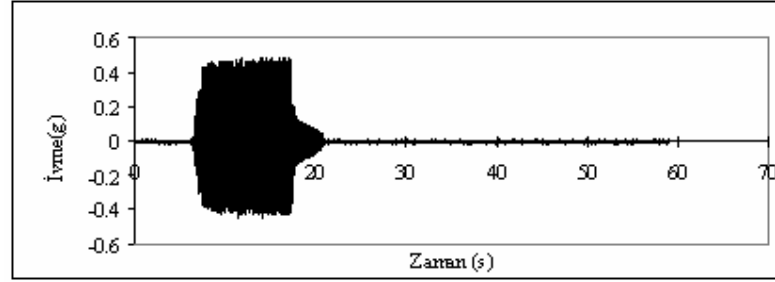


(b)

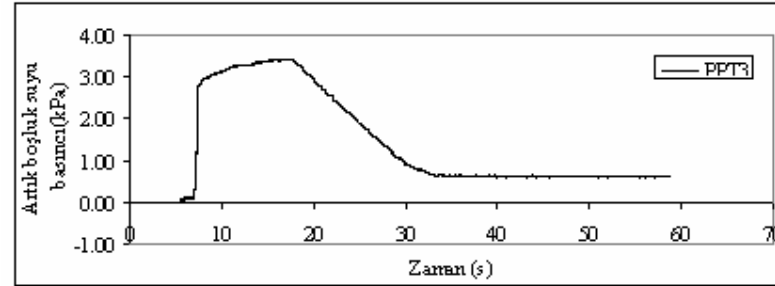
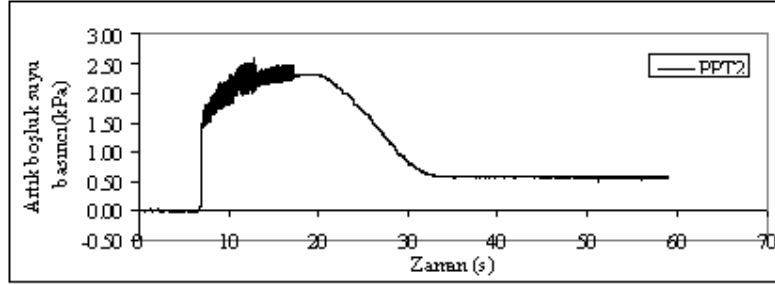
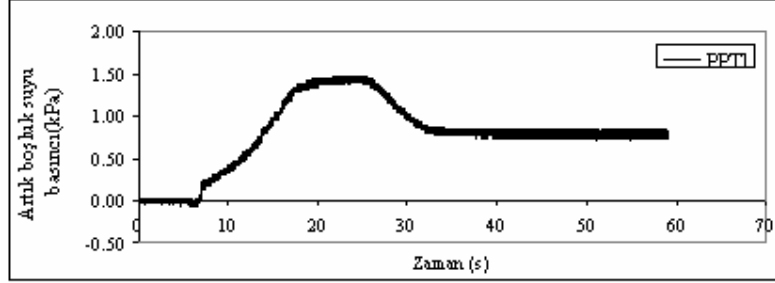


(c)

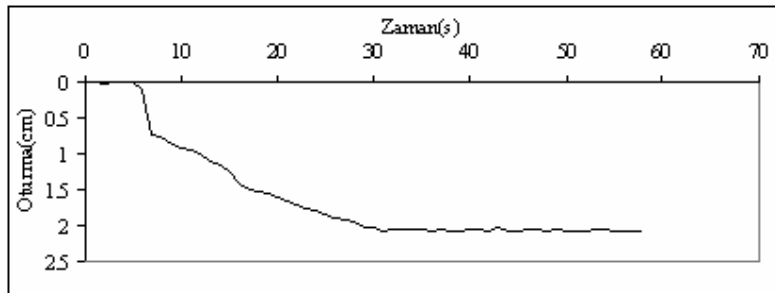
Şekil Ek 1.42 L12-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



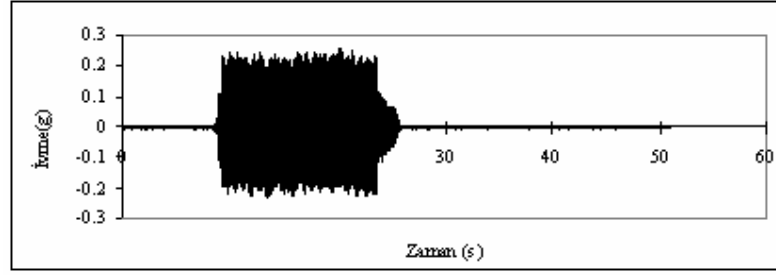
(a)



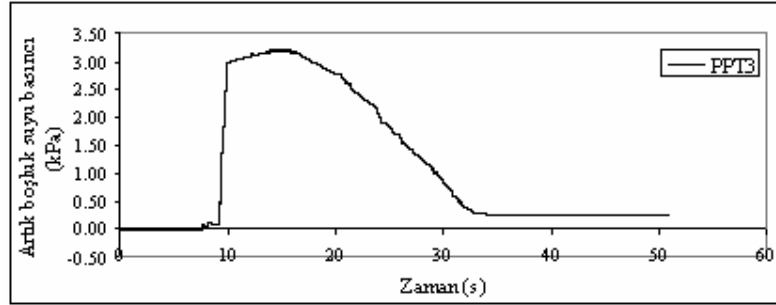
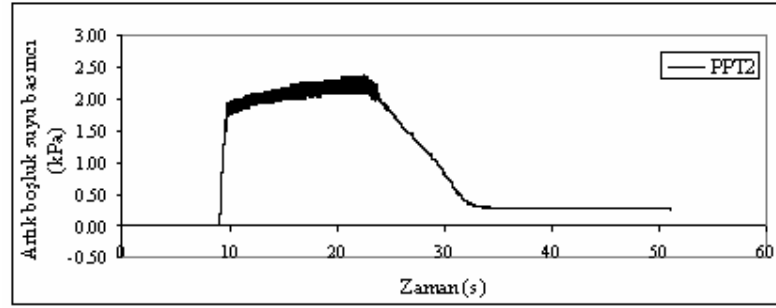
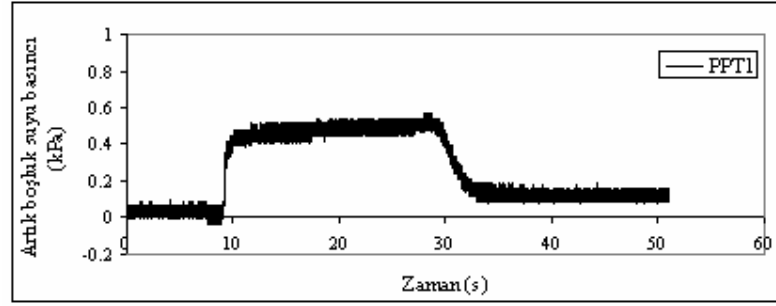
(b)



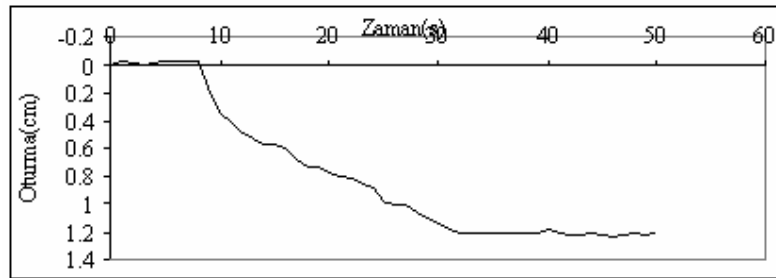
Şekil Ek 1.43 L12-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

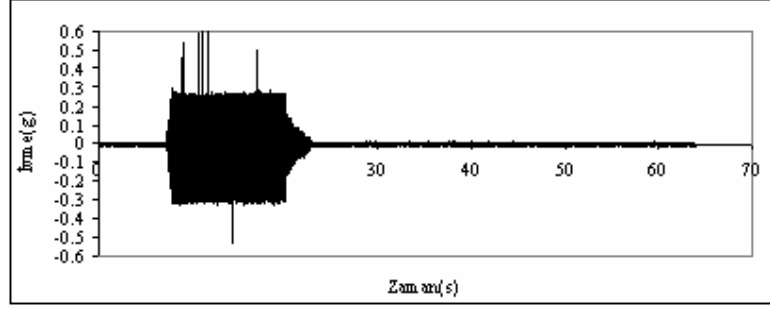


(b)

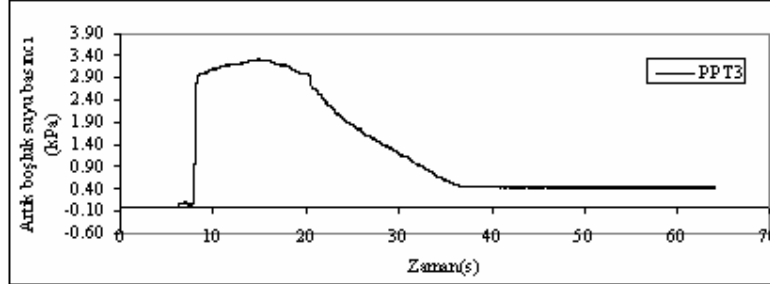
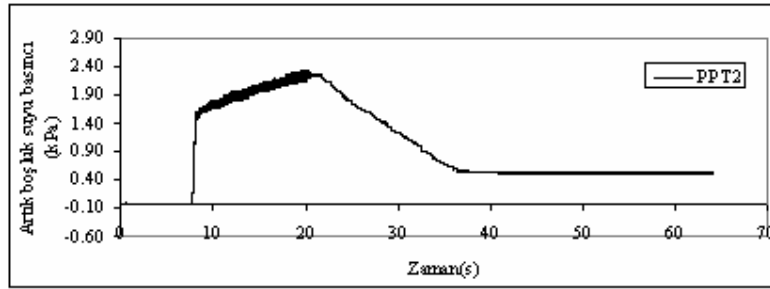
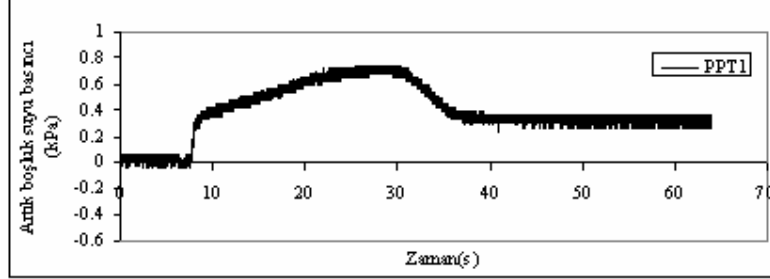


(c)

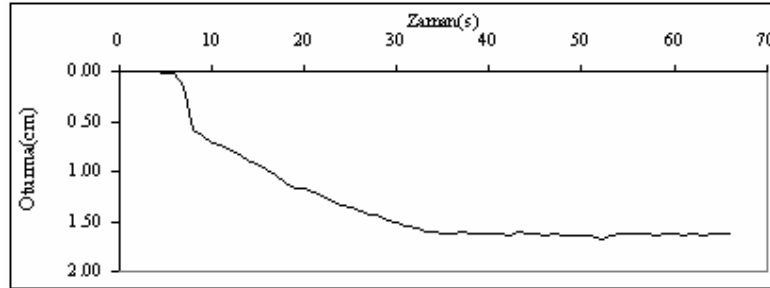
Şekil Ek 1.44 L13-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

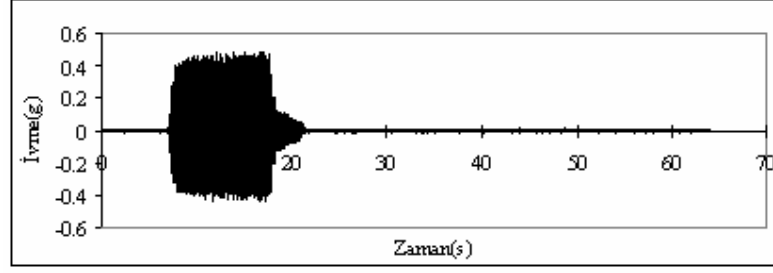


(b)

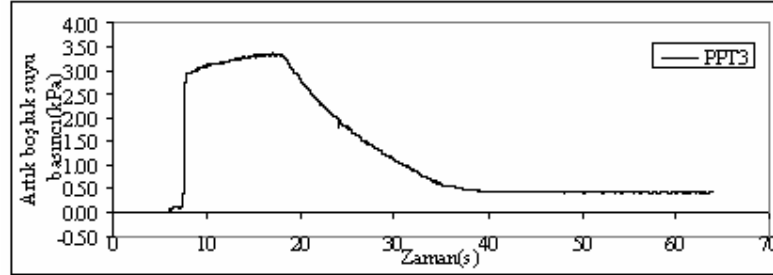
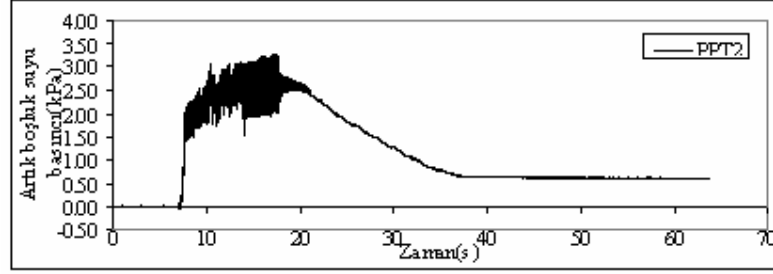
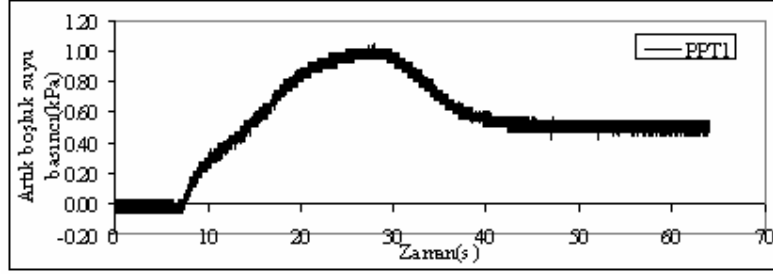


(c)

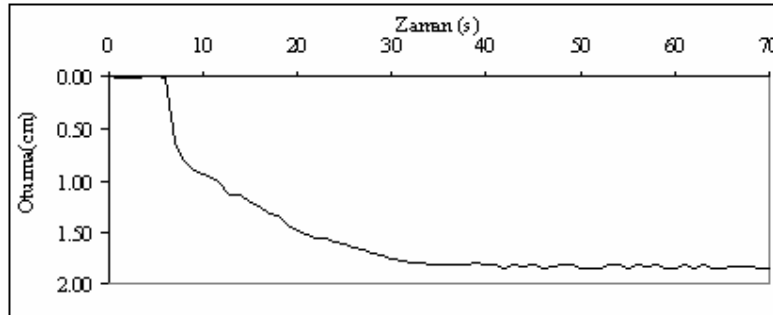
Şekil Ek 1.45 L13-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeyel oturma -zaman değişimi



(a)

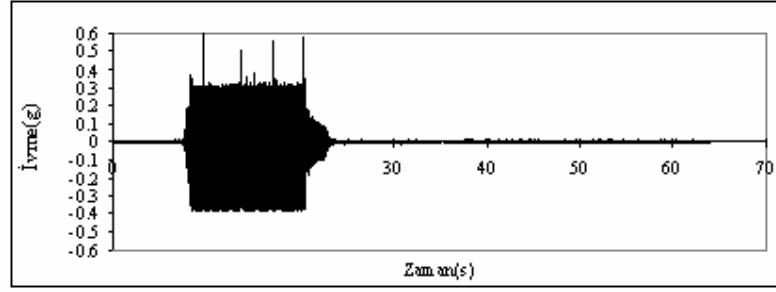


(b)

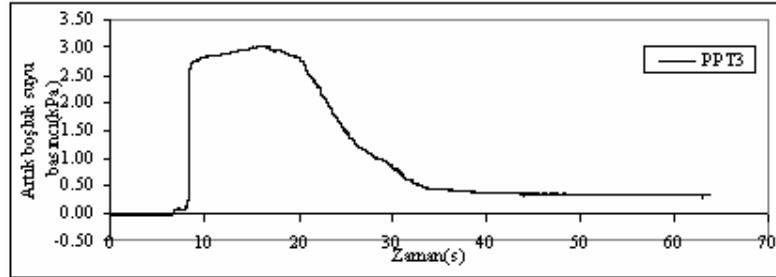
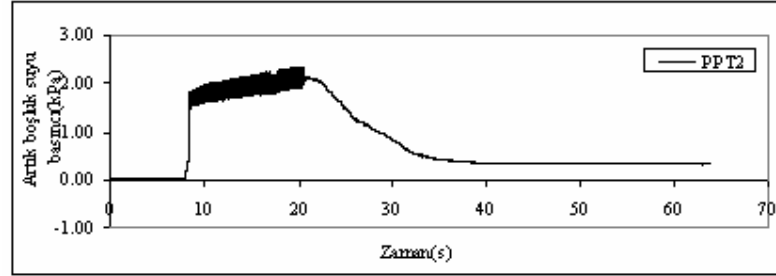
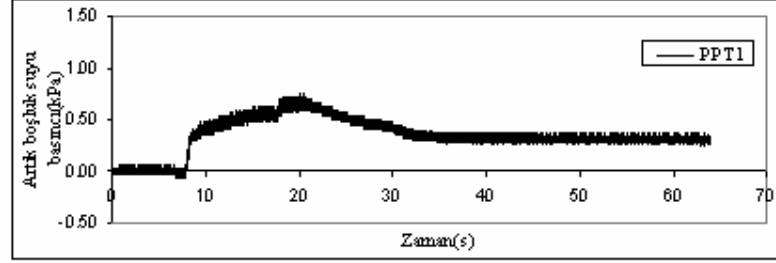


(c)

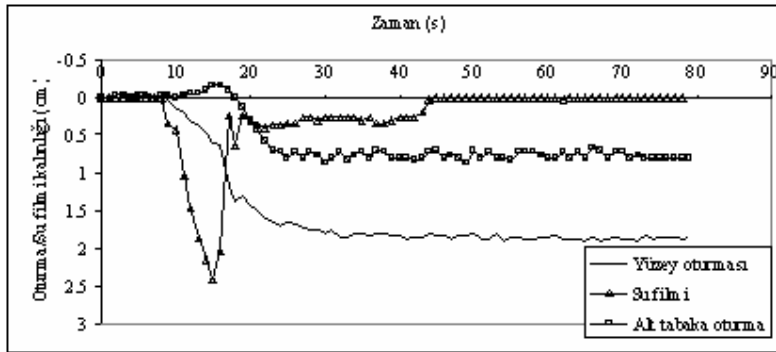
Şekil Ek 1.46 L13-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

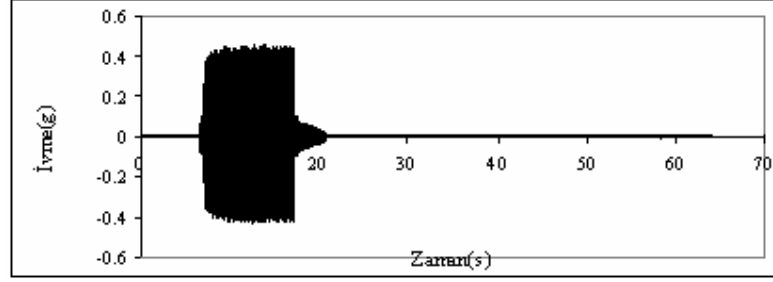


(b)

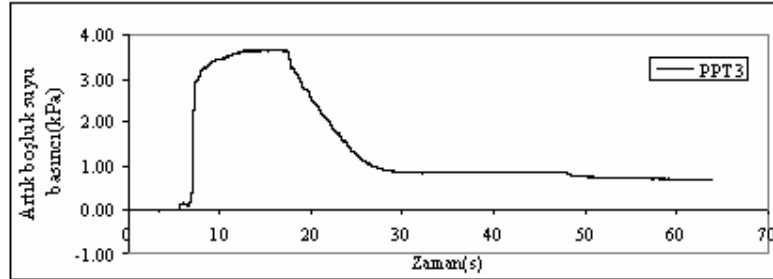
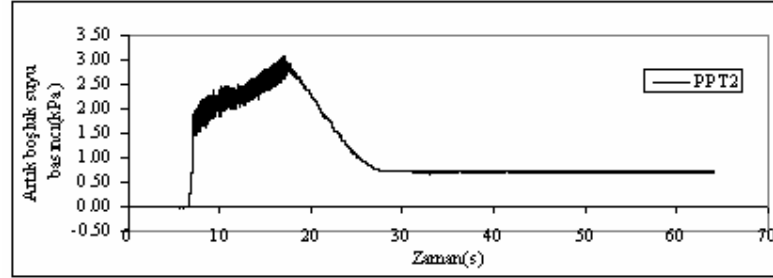
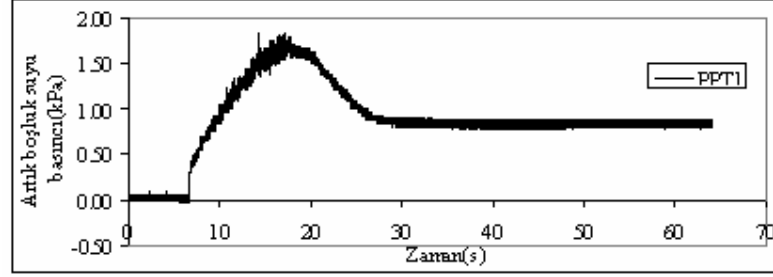


(c)

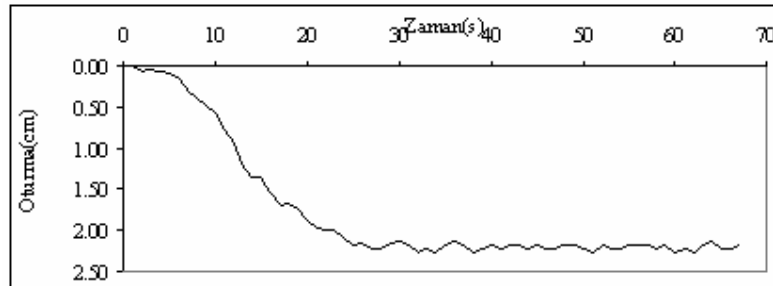
Şekil Ek 1.47 L14-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı zaman değişimleri



(a)

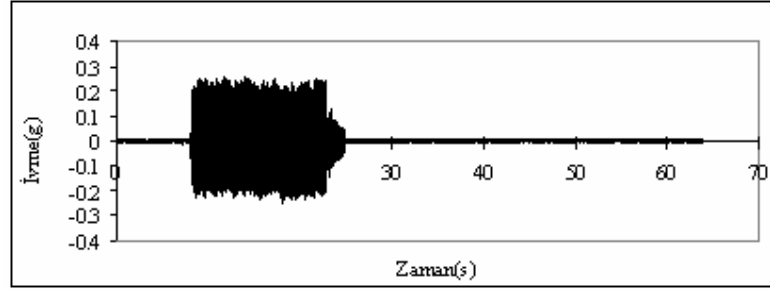


(b)

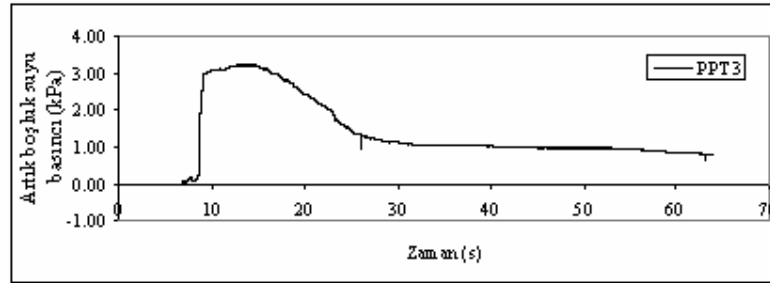
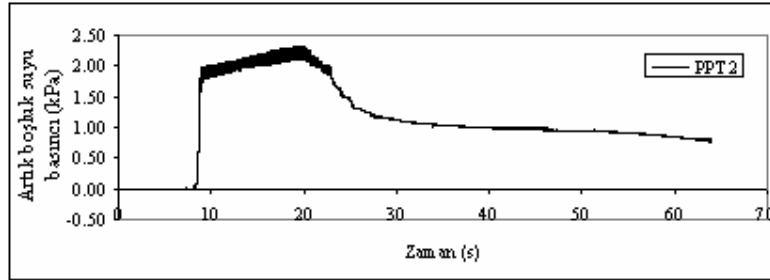
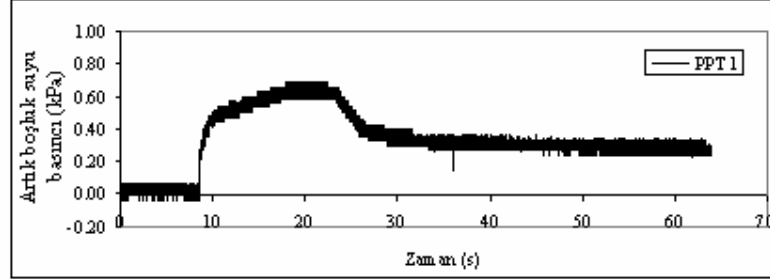


(c)

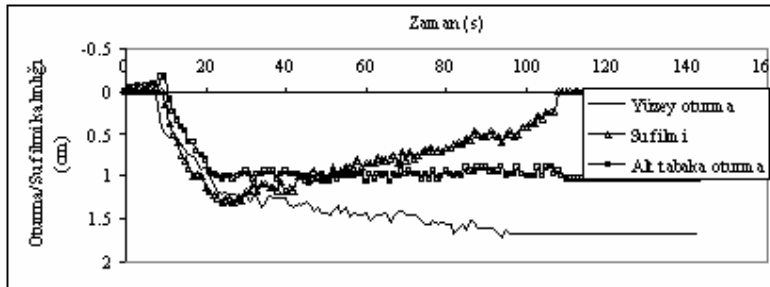
Şekil Ek 1.48 L14-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma -zaman değişimi



(a)

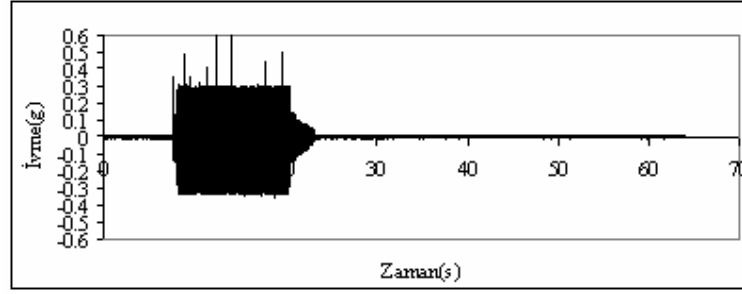


(b)

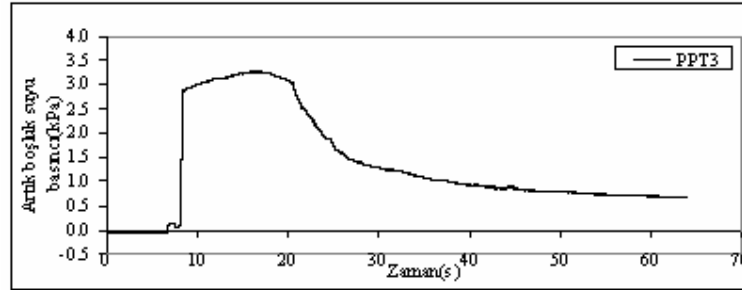
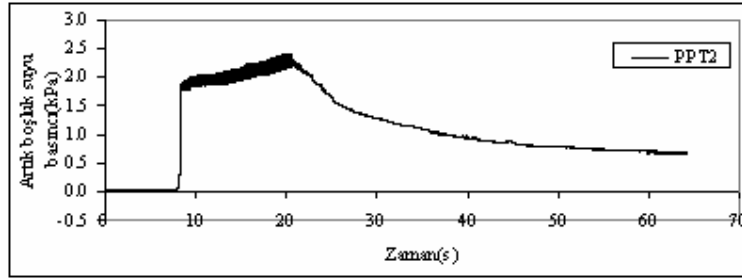
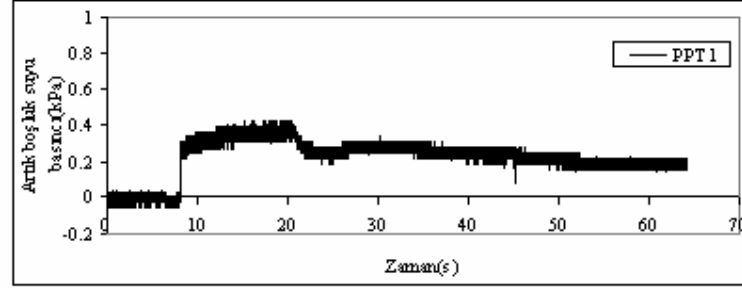


(c)

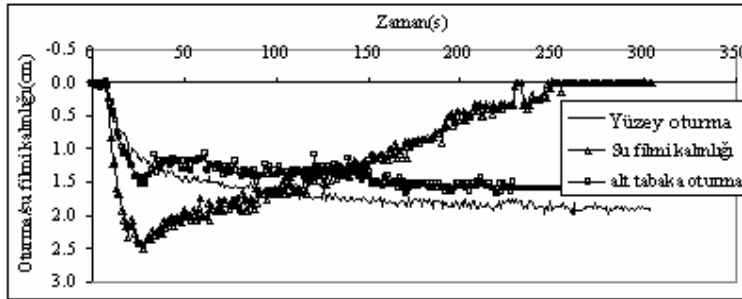
Şekil Ek 1.49 L15-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

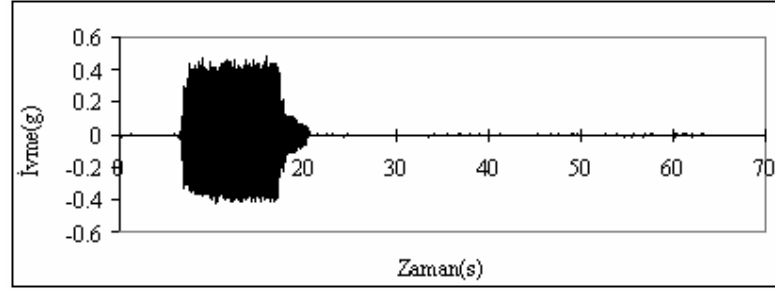


(c)

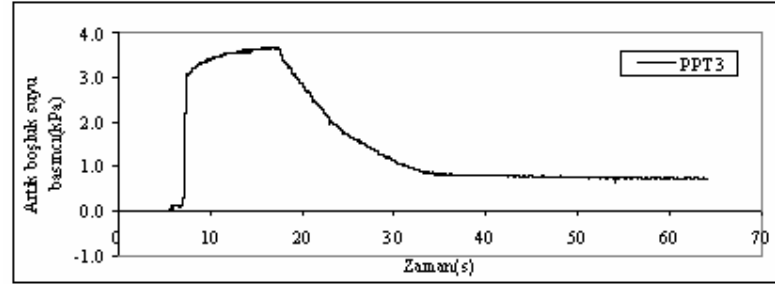
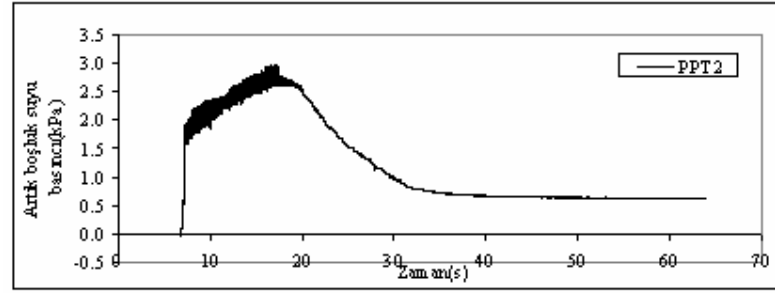
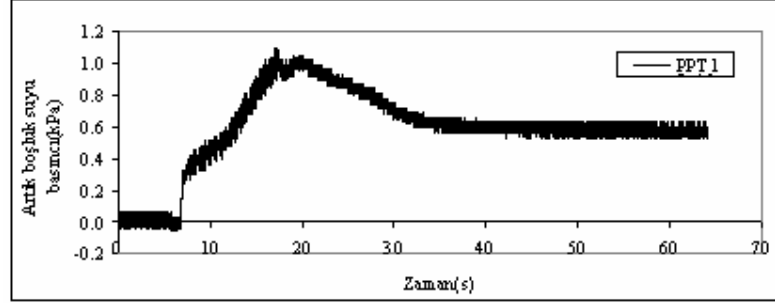


(d)

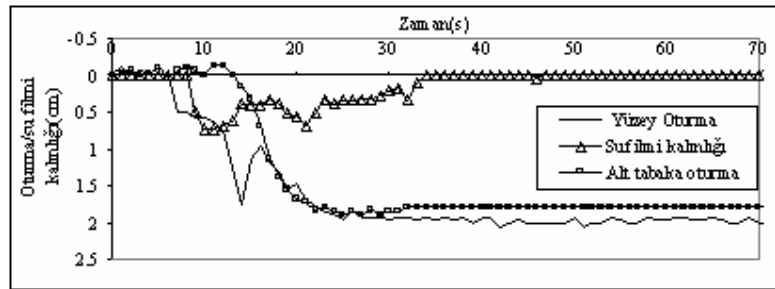
Şekil Ek 1.50 L15-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

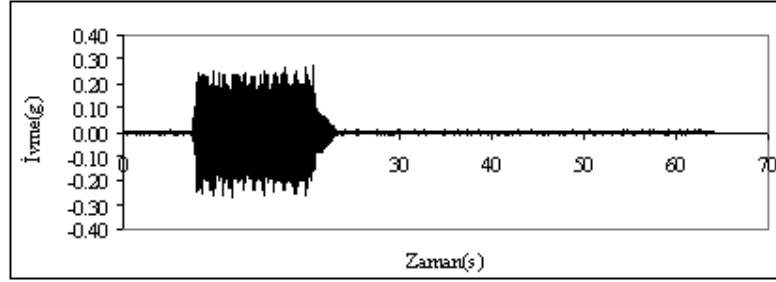


(b)

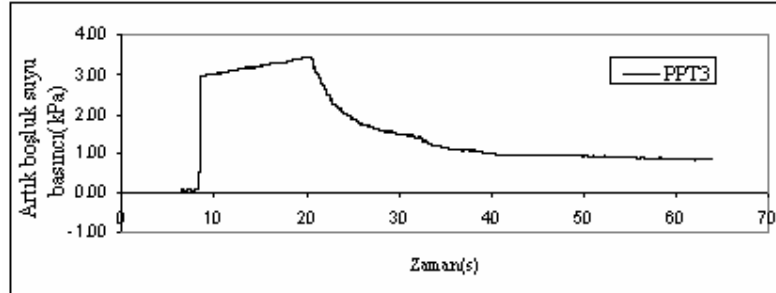
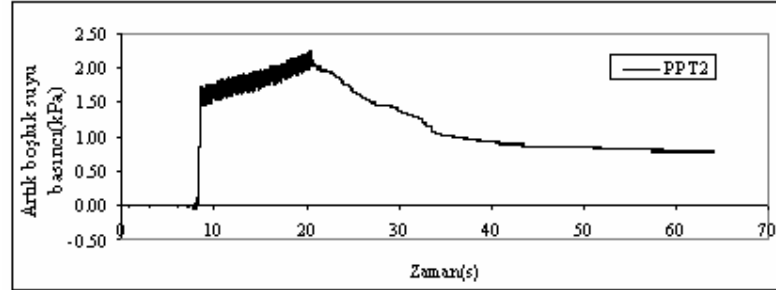
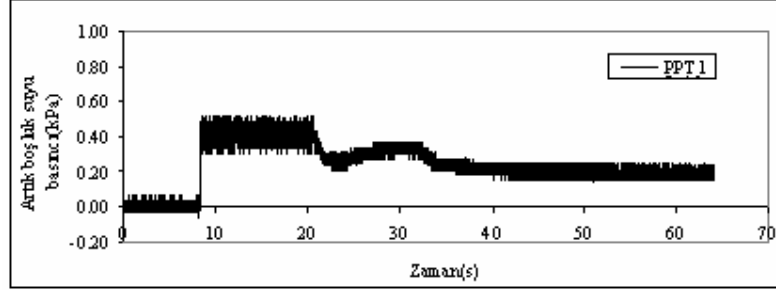


(c)

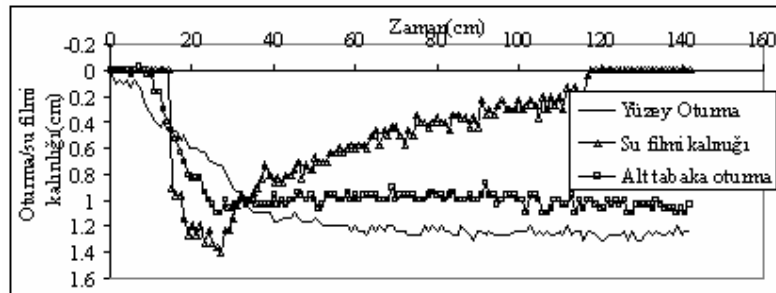
Şekil Ek 1.51 L15-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

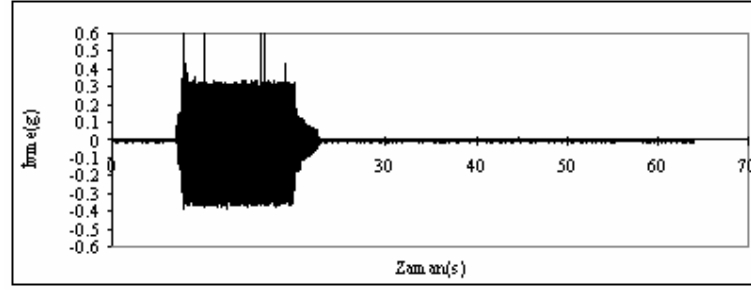


(b)

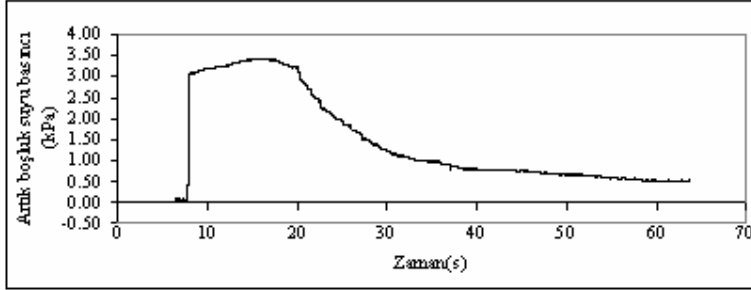
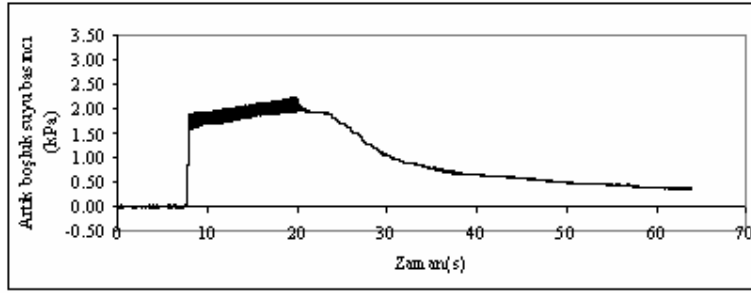
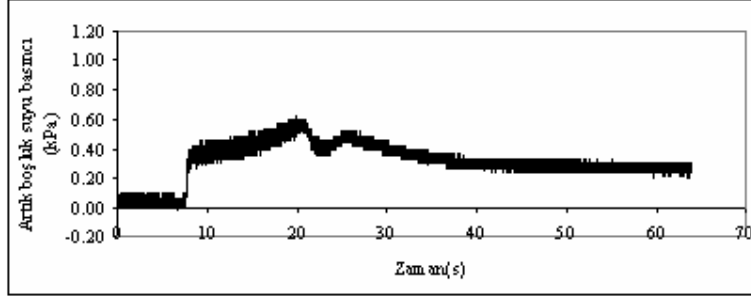


(c)

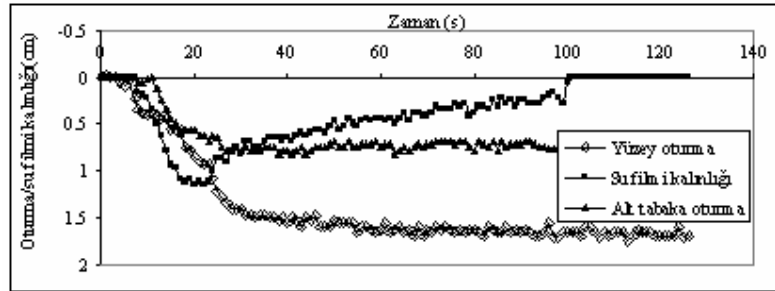
Şekil Ek 1.52 L16-A Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)

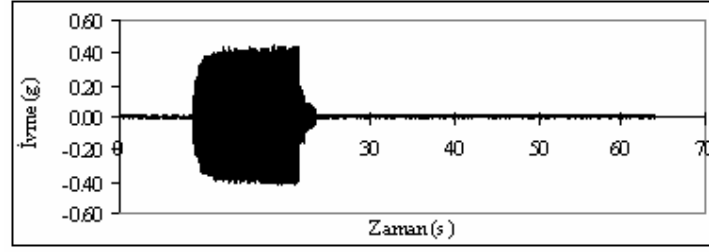


(b)

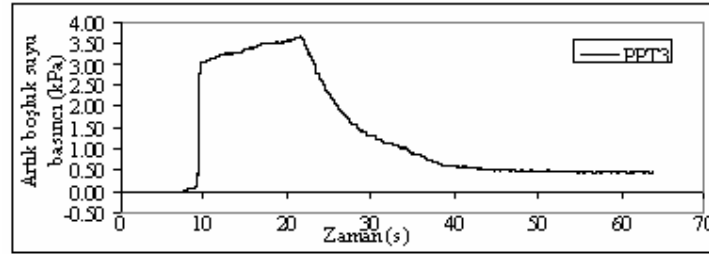
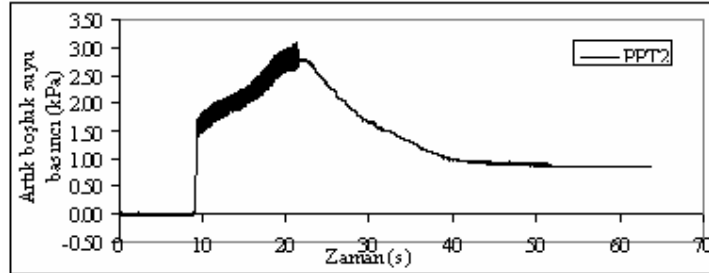
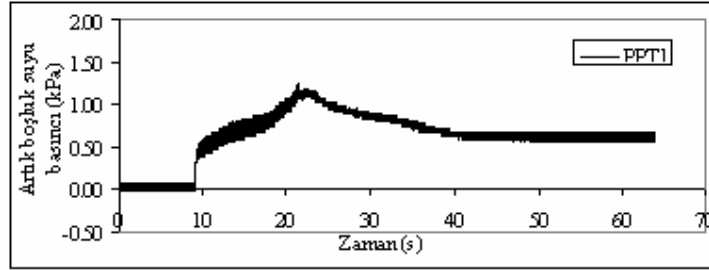


(c)

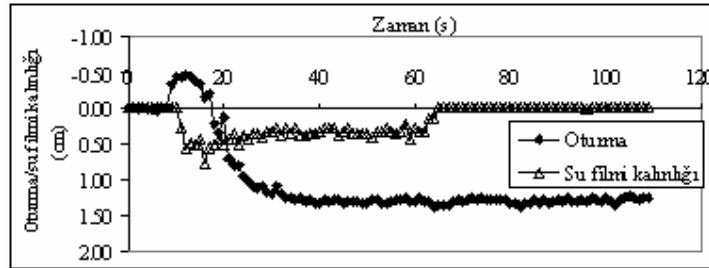
Şekil Ek 1.53 L16-B Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma-zaman, alt tabaka oturma-zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri



(a)



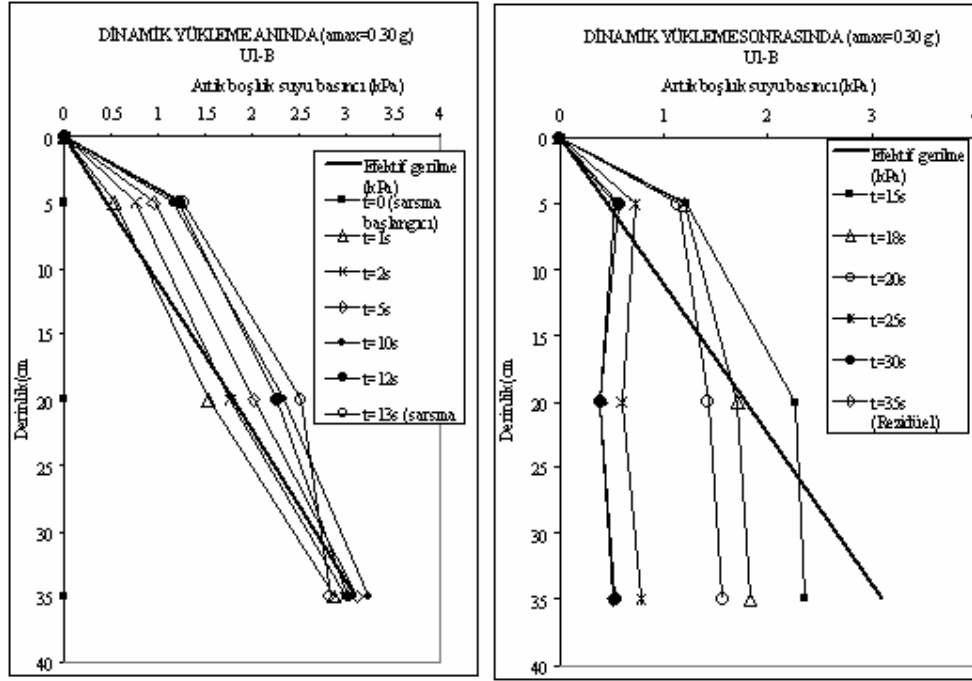
(b)



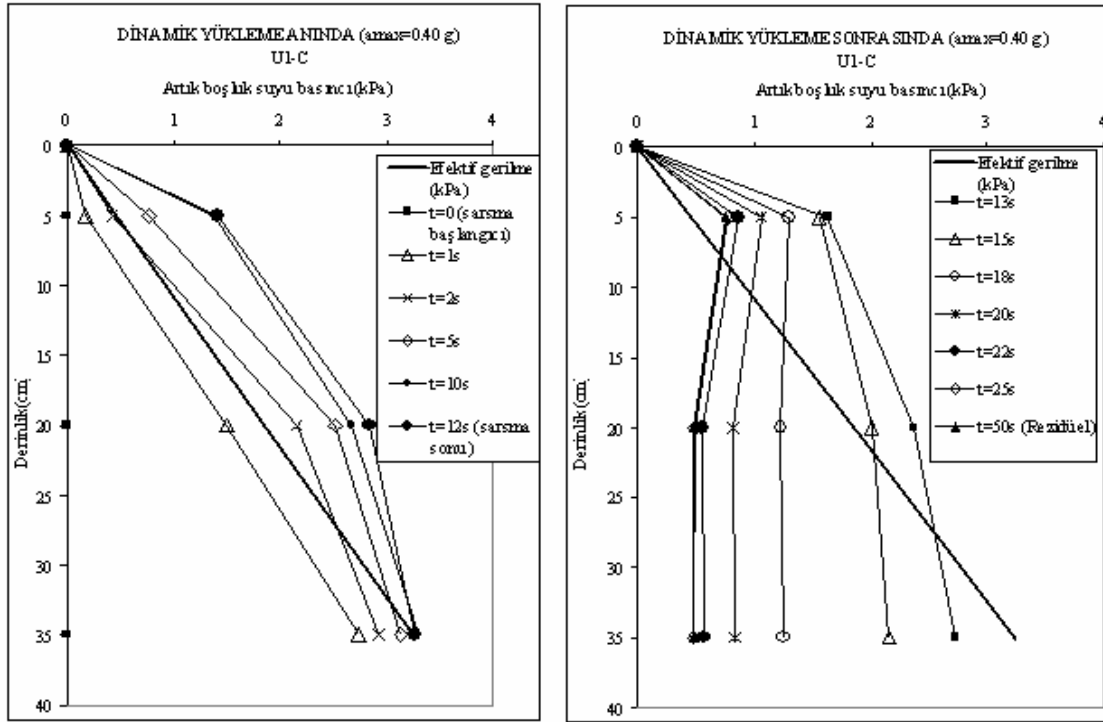
(c)

Şekil Ek 1.54 L16-C Model Deneyi için (a) İvme-zaman değişimi (b)Artık boşluk suyu basıncı-zaman değişimi (c) Yüzeysel oturma –zaman ve su filmi kalınlığı-zaman değişimleri

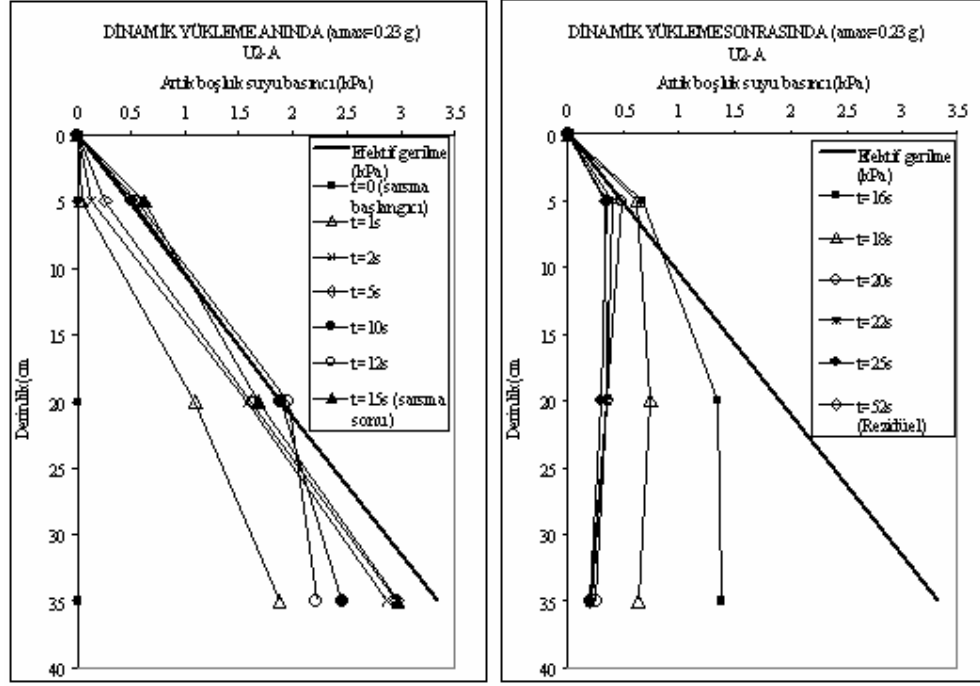
Ek 2. Artık boşluk suyu basıncı-zaman kontürleri



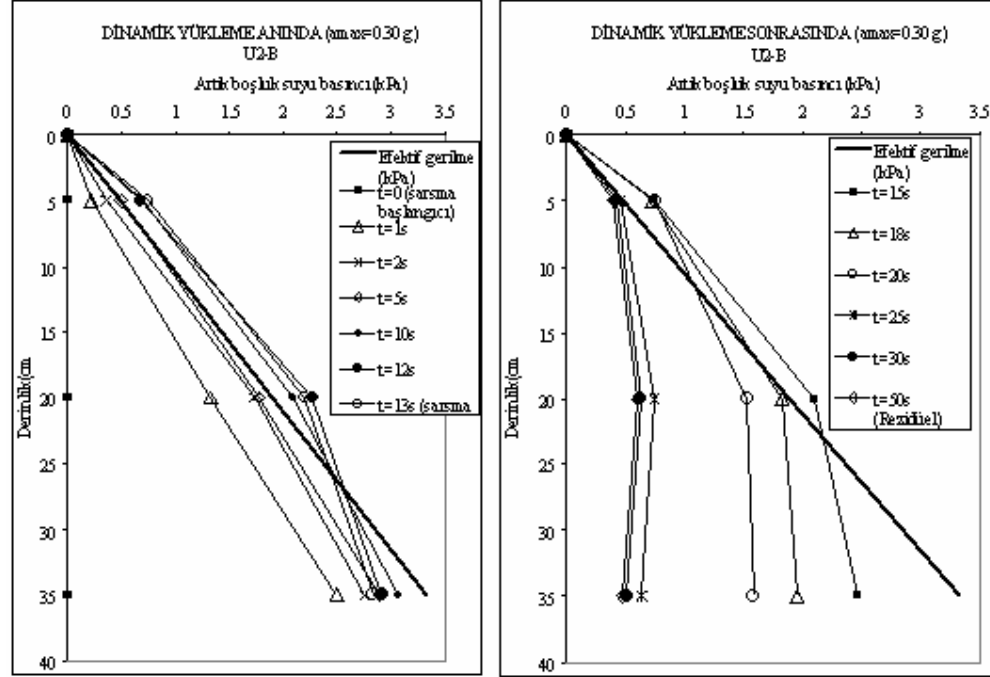
Şekil Ek 2.1 U1-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



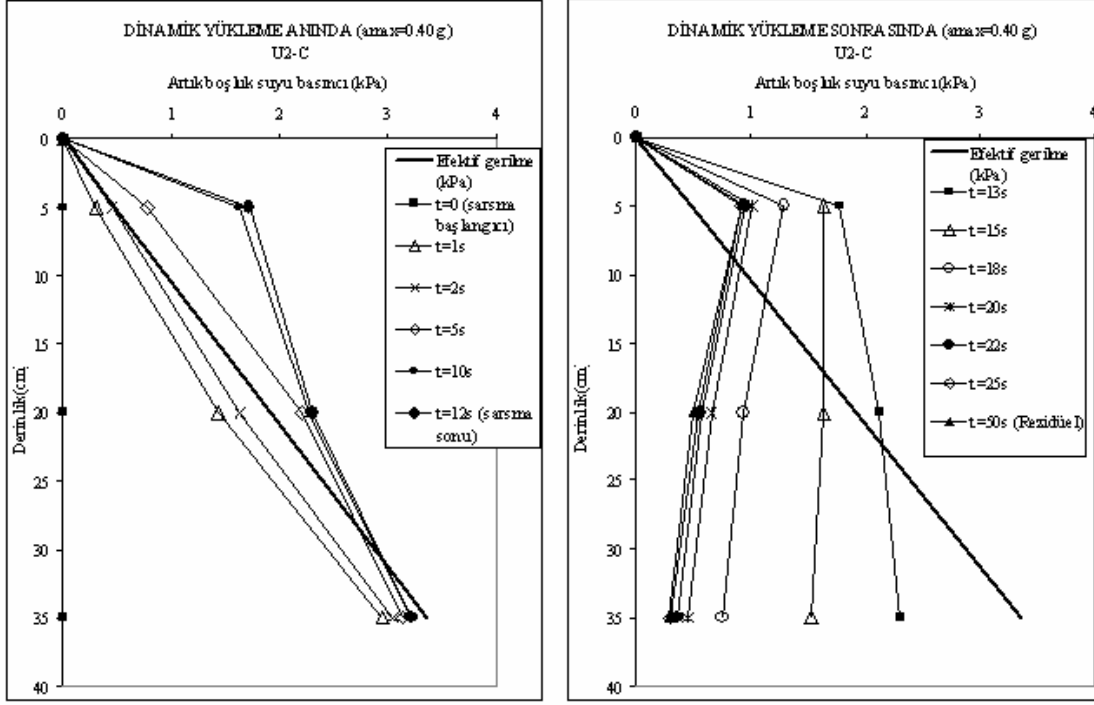
Şekil Ek 2.2 U1-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



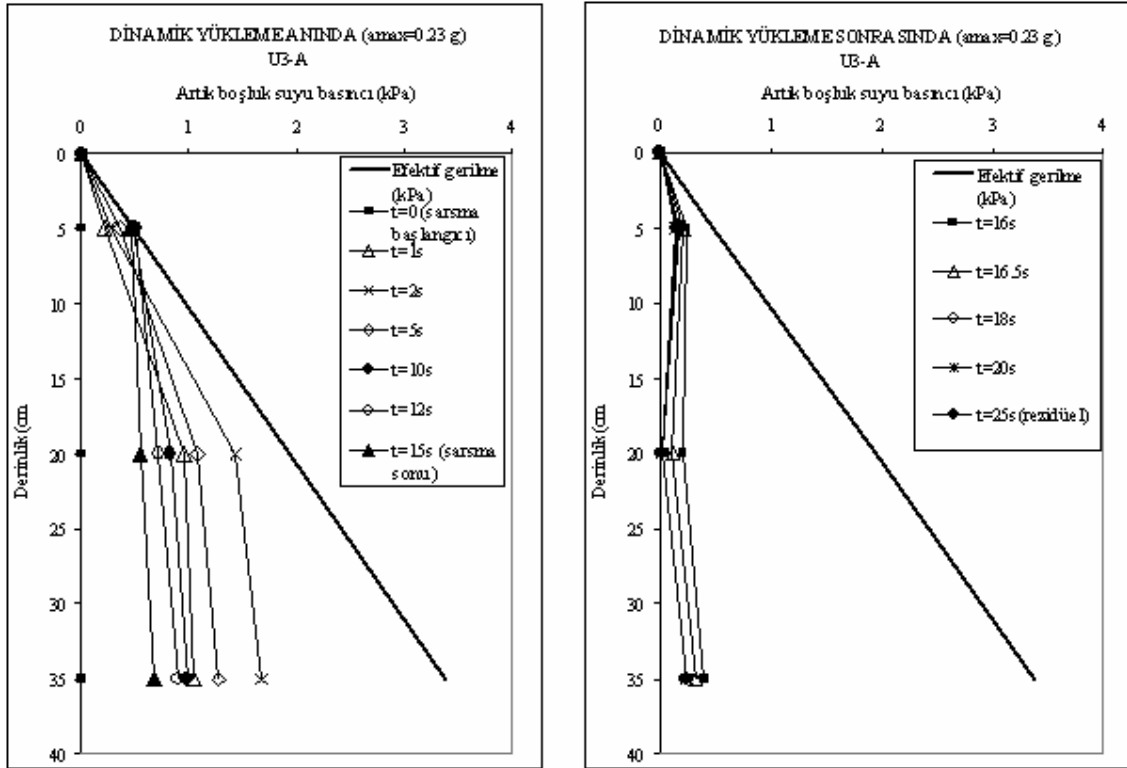
Şekil Ek 2.3 U2-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



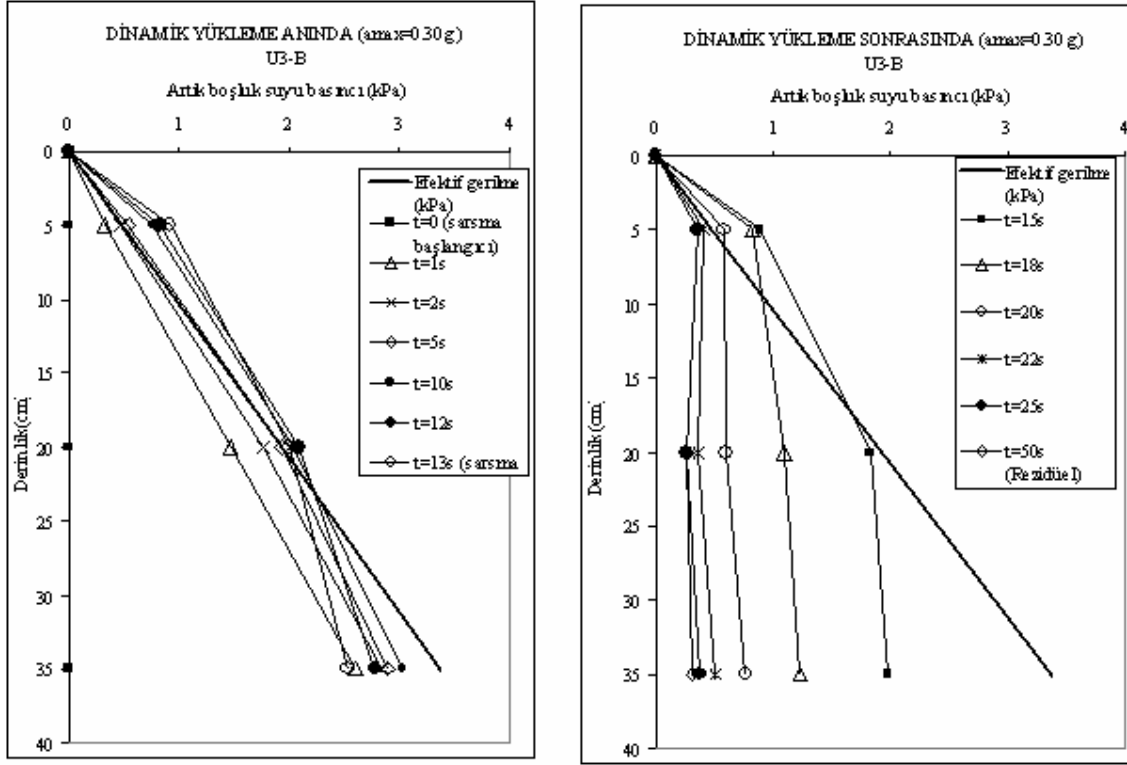
Şekil Ek 2.4 U2-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



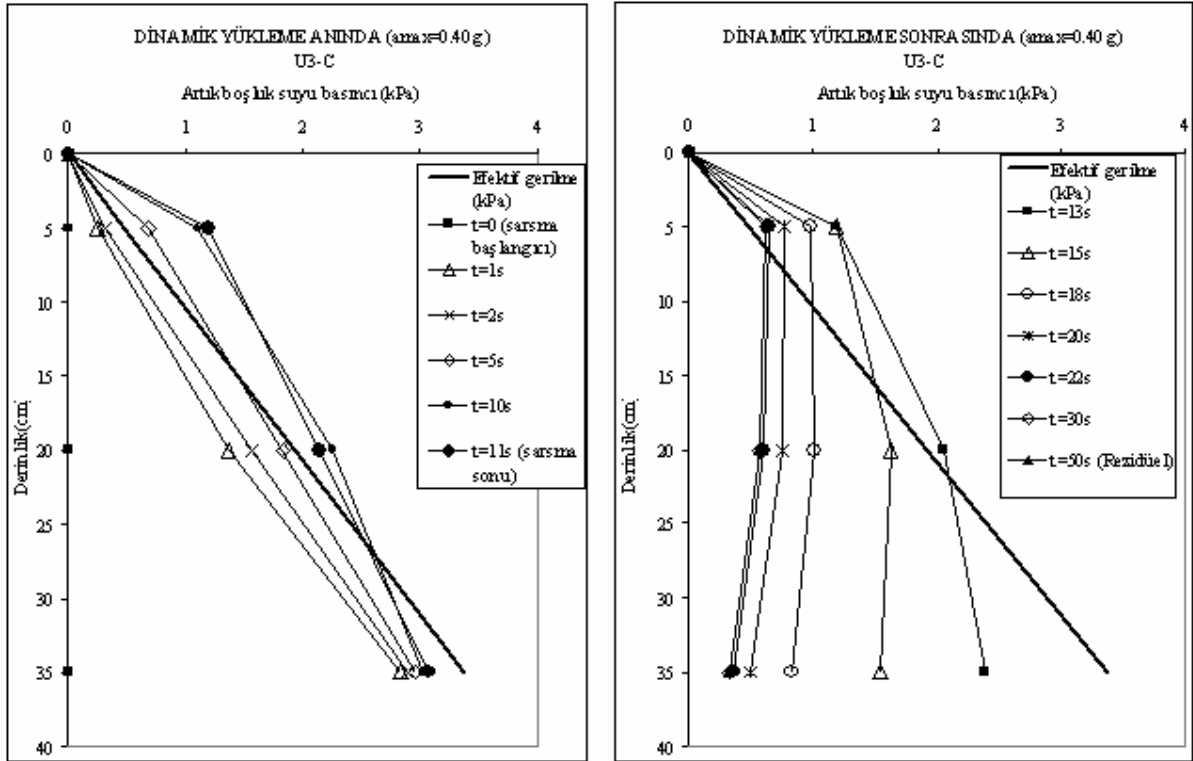
Şekil Ek 2.5 U2-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



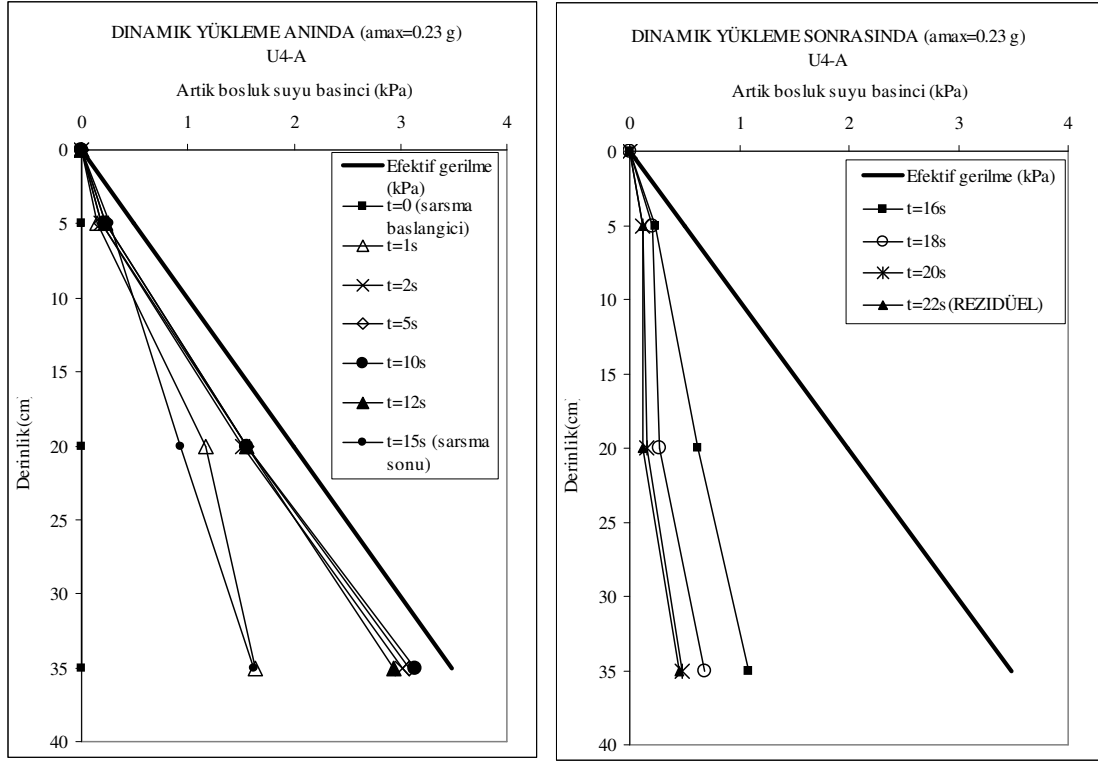
Şekil Ek 2.6 U3-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



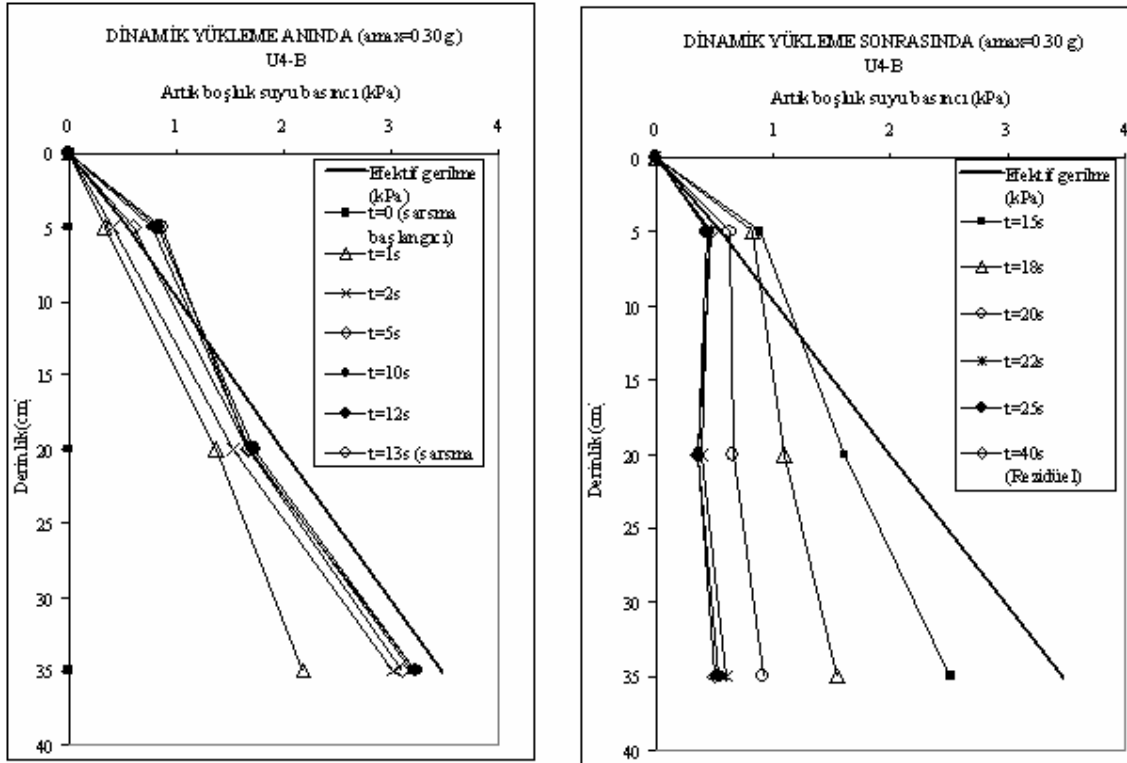
Şekil Ek 2.7 U3-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



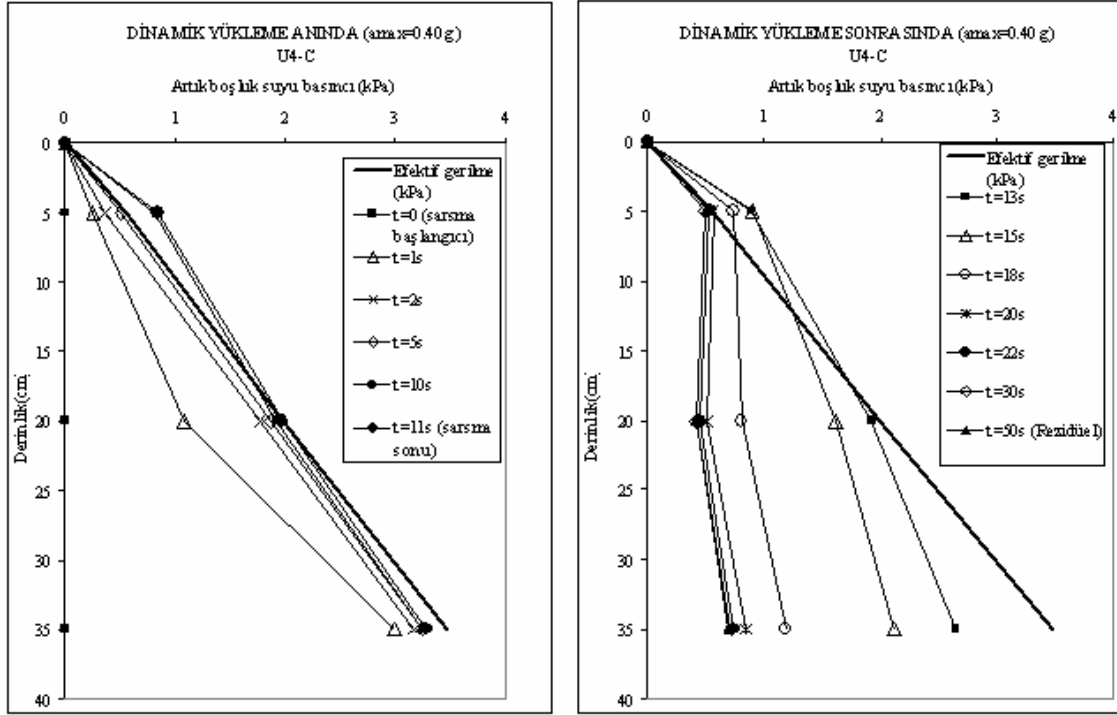
Şekil Ek 2.8 U3-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



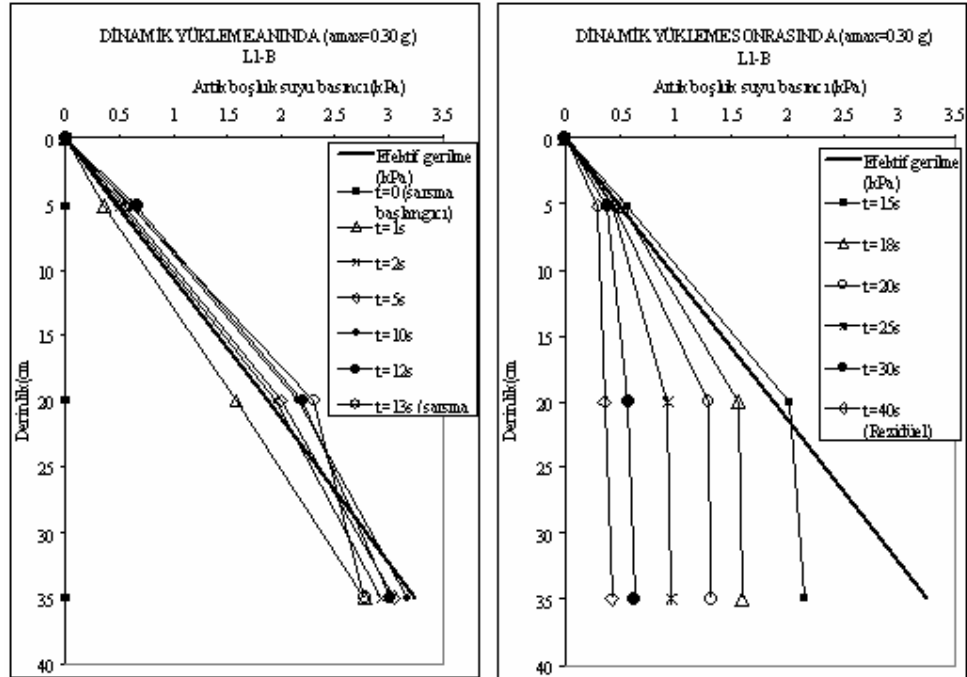
Şekil Ek 2.9 U4-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



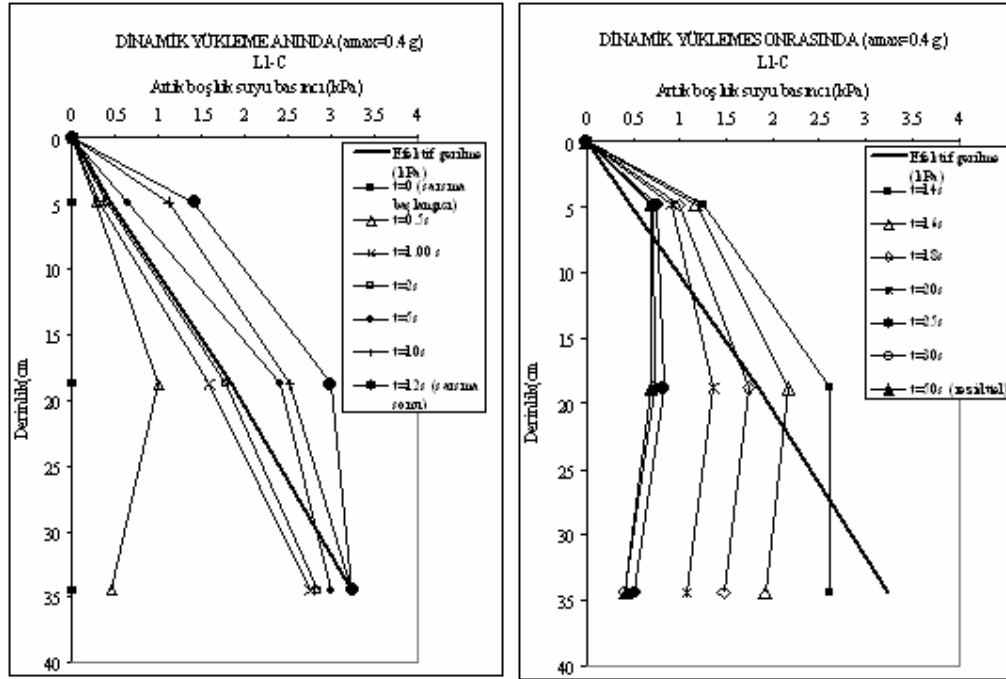
Şekil Ek 2.10 U4-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



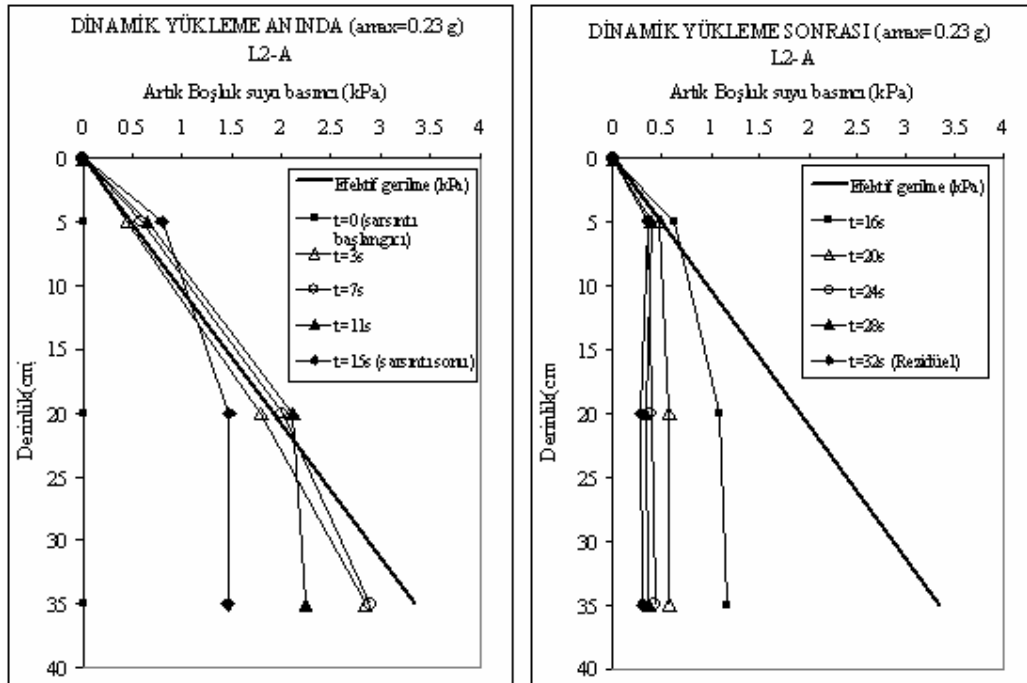
Şekil Ek 2.11 U4-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



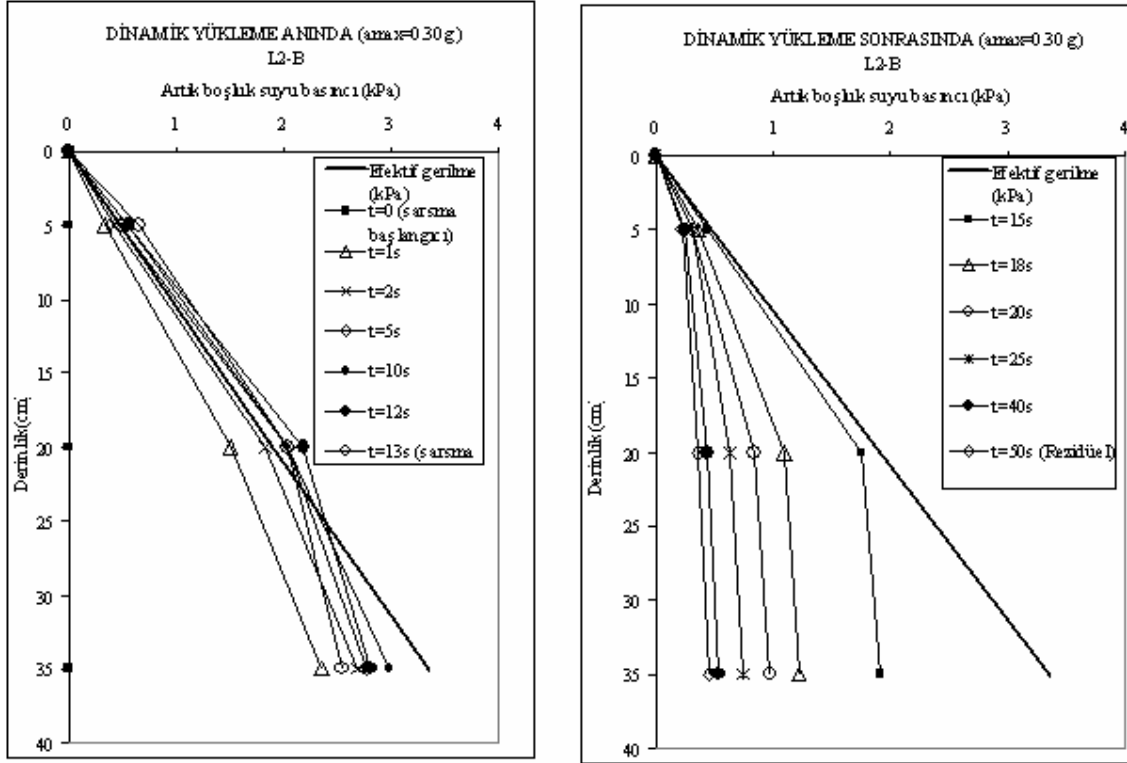
Şekil Ek 2.12 L1-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



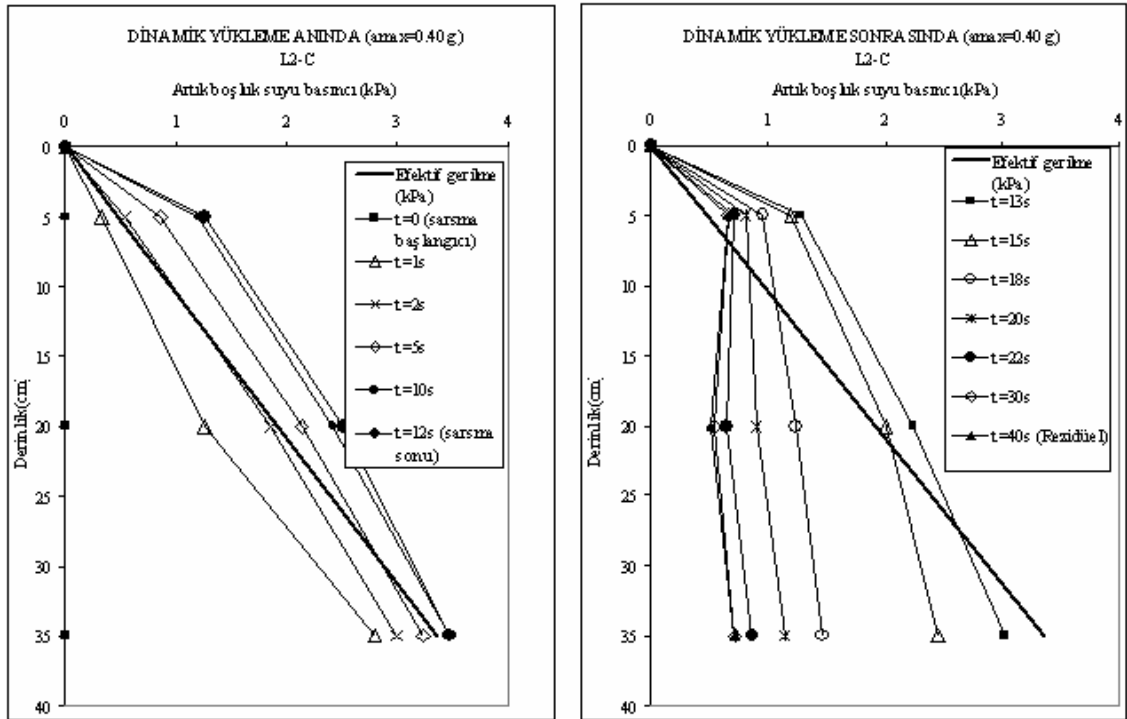
Şekil Ek 2.13 L1-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



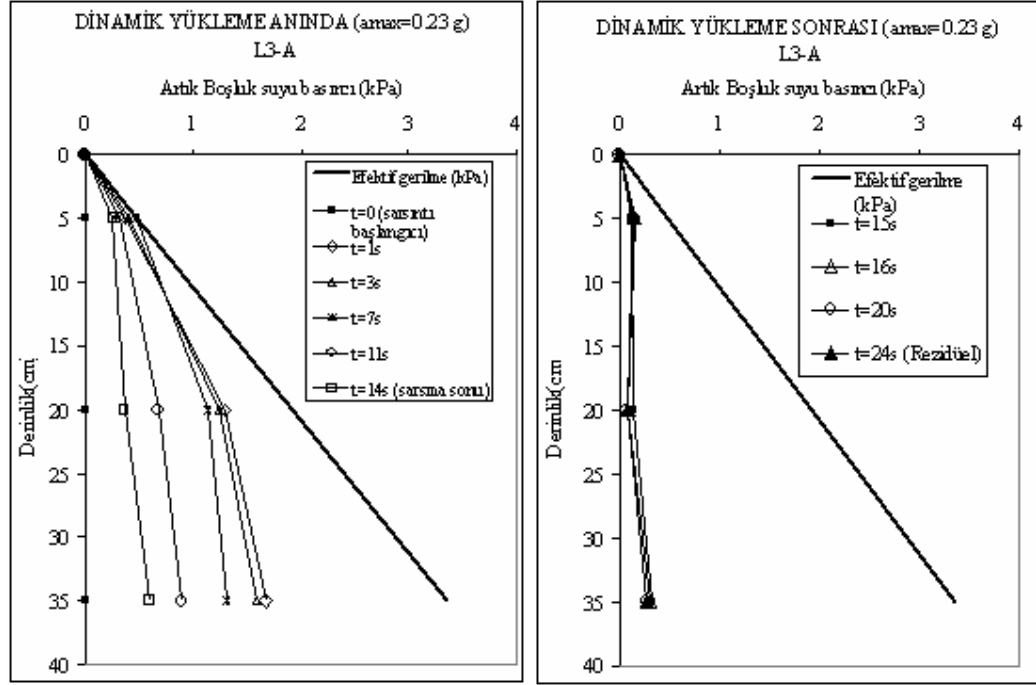
Şekil Ek 2.14 L2-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



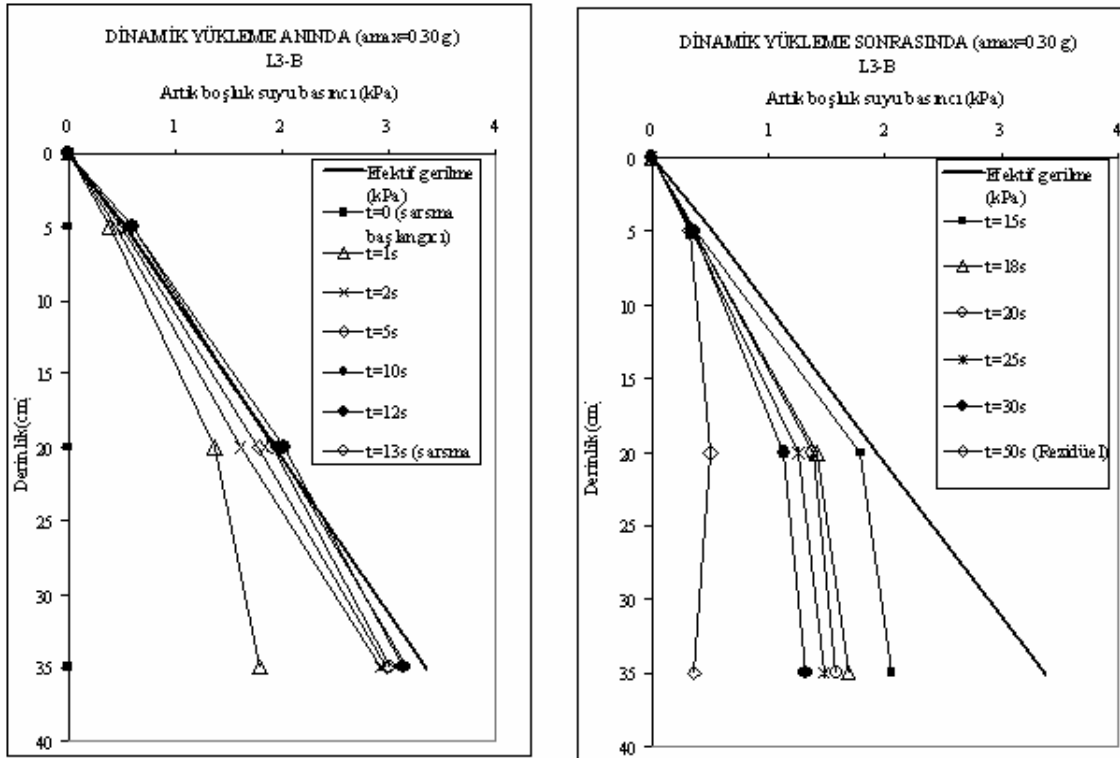
Şekil Ek 2.15 L2-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



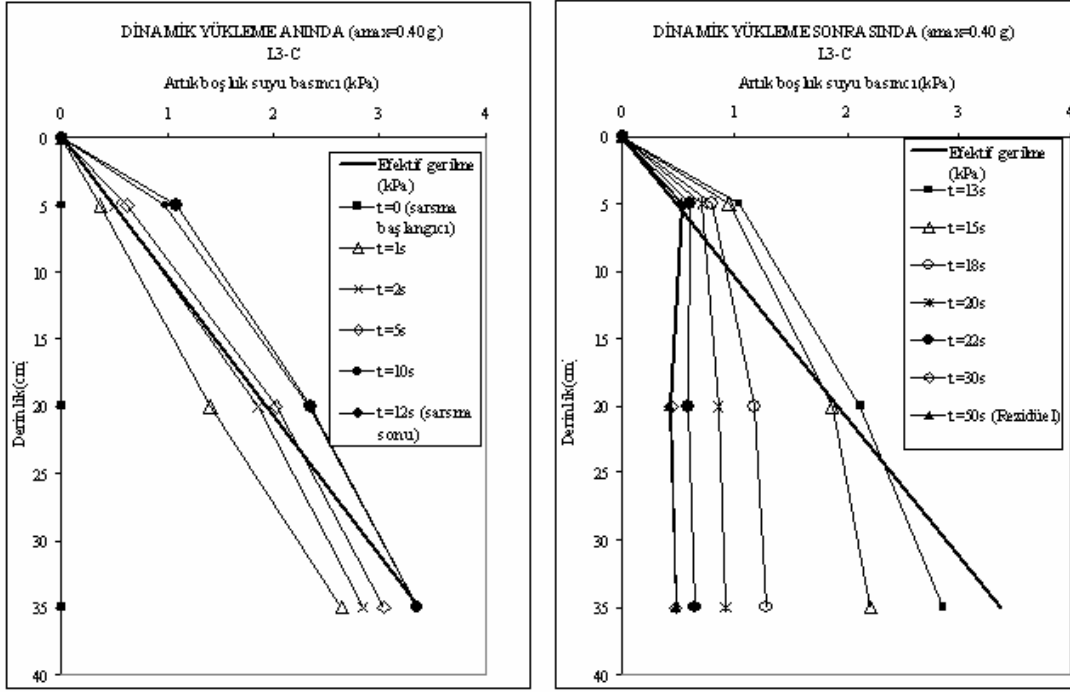
Şekil Ek 2.16 L2-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



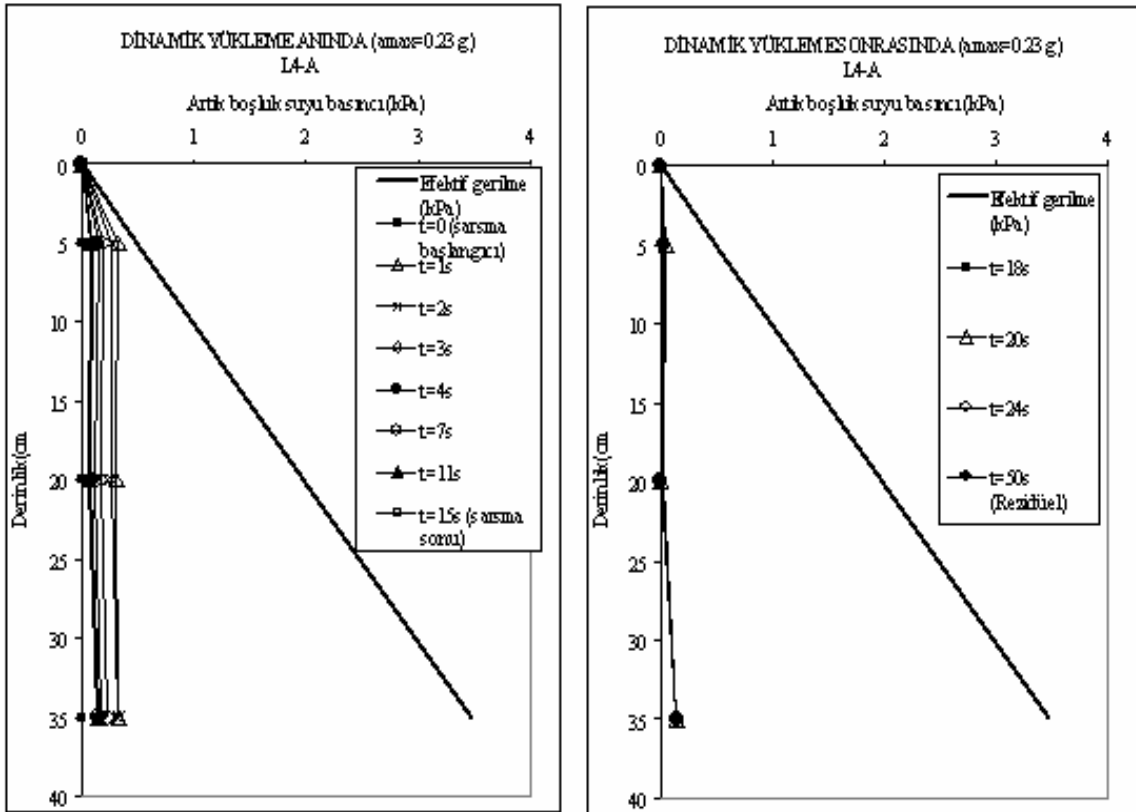
Şekil Ek 2.17 L3-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



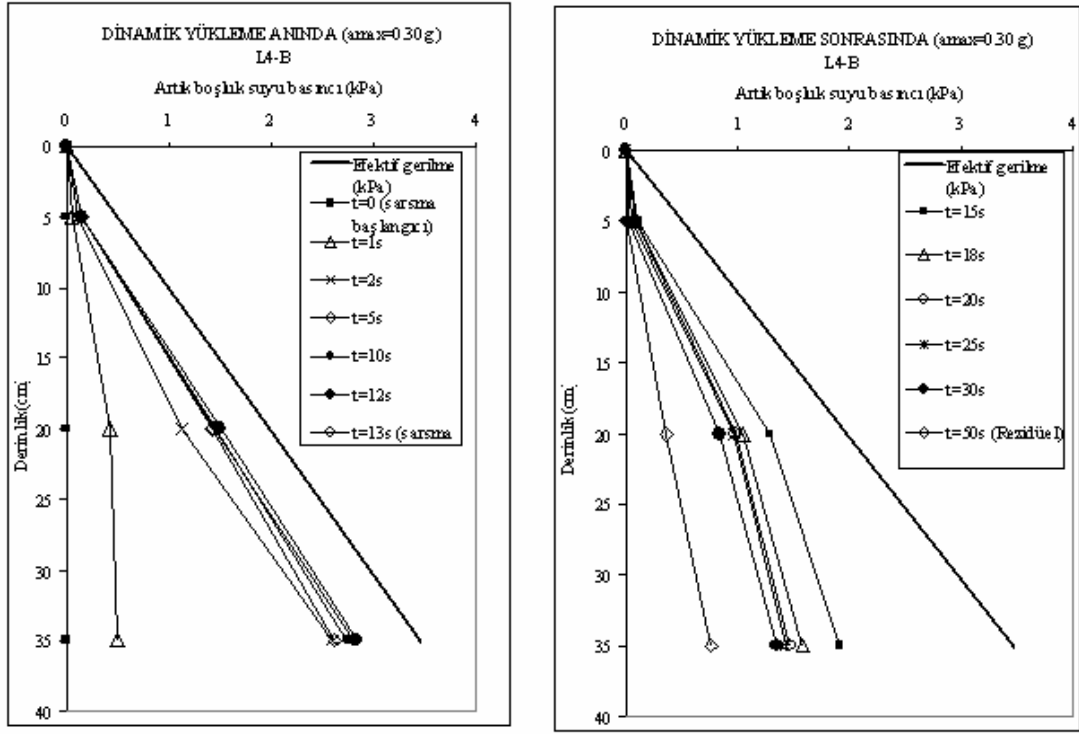
Şekil Ek 2.18 L3-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



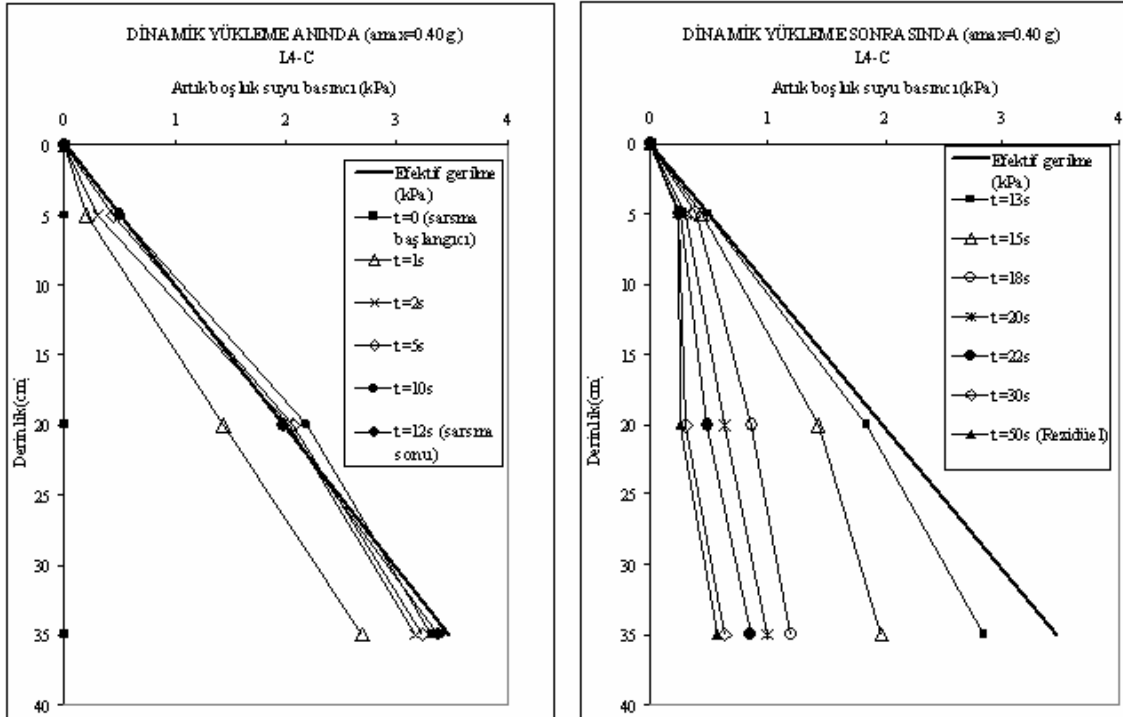
Şekil Ek 2.19 L3-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



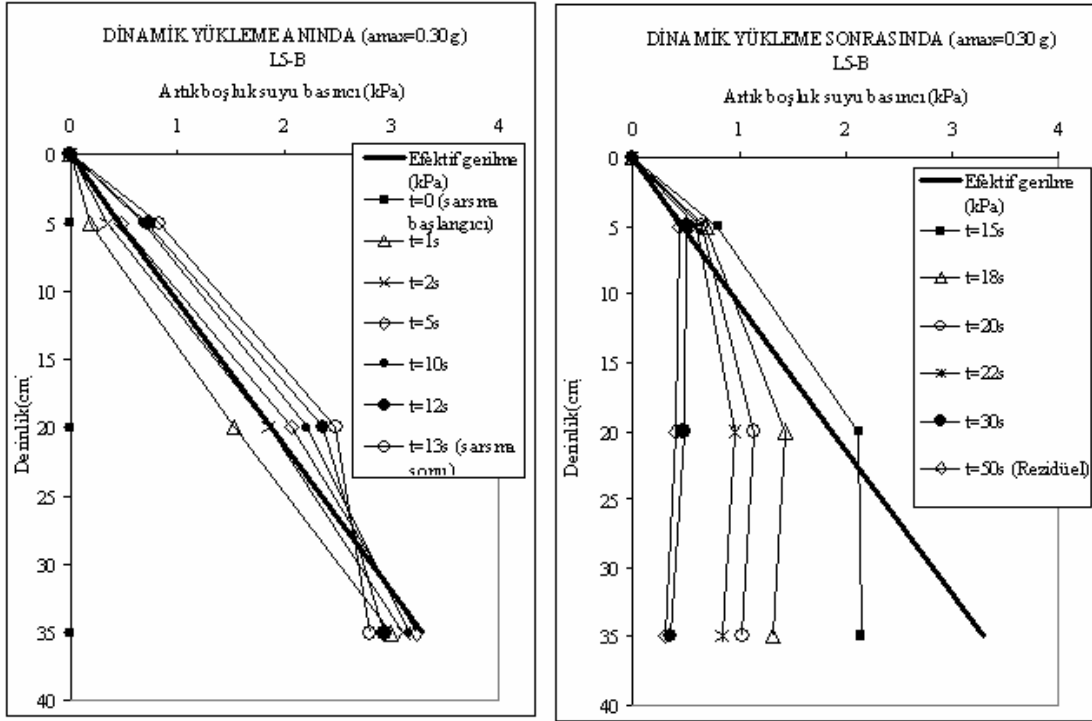
Şekil Ek 2.20 L4-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



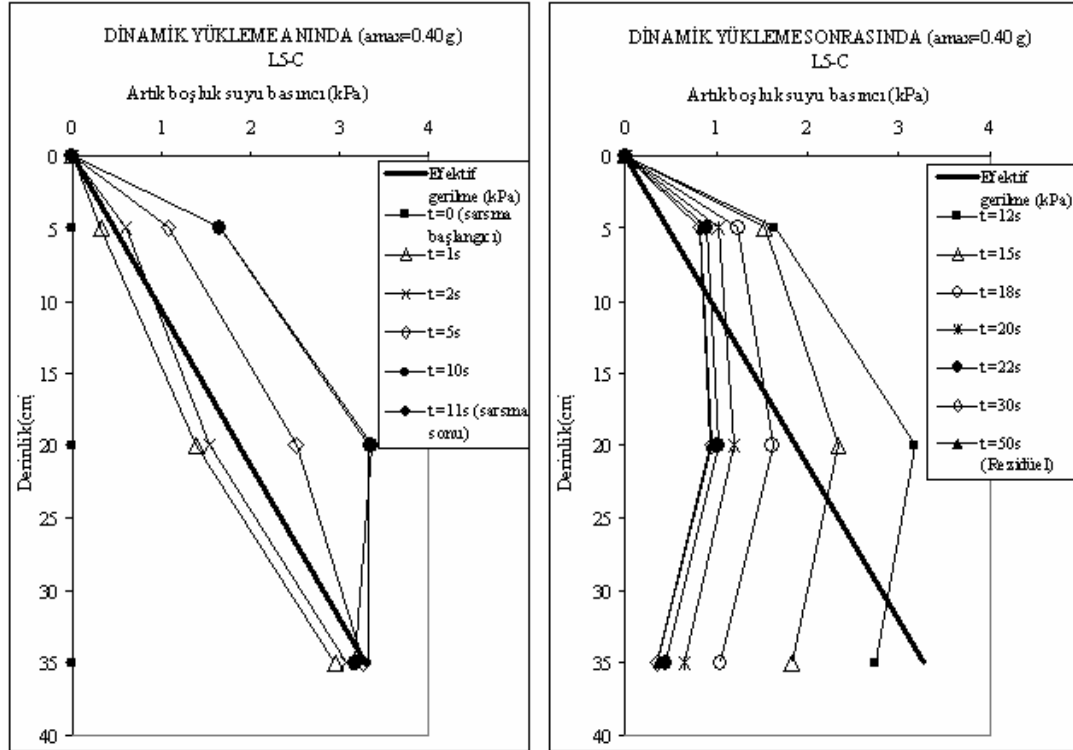
Şekil Ek 2.21 L4-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



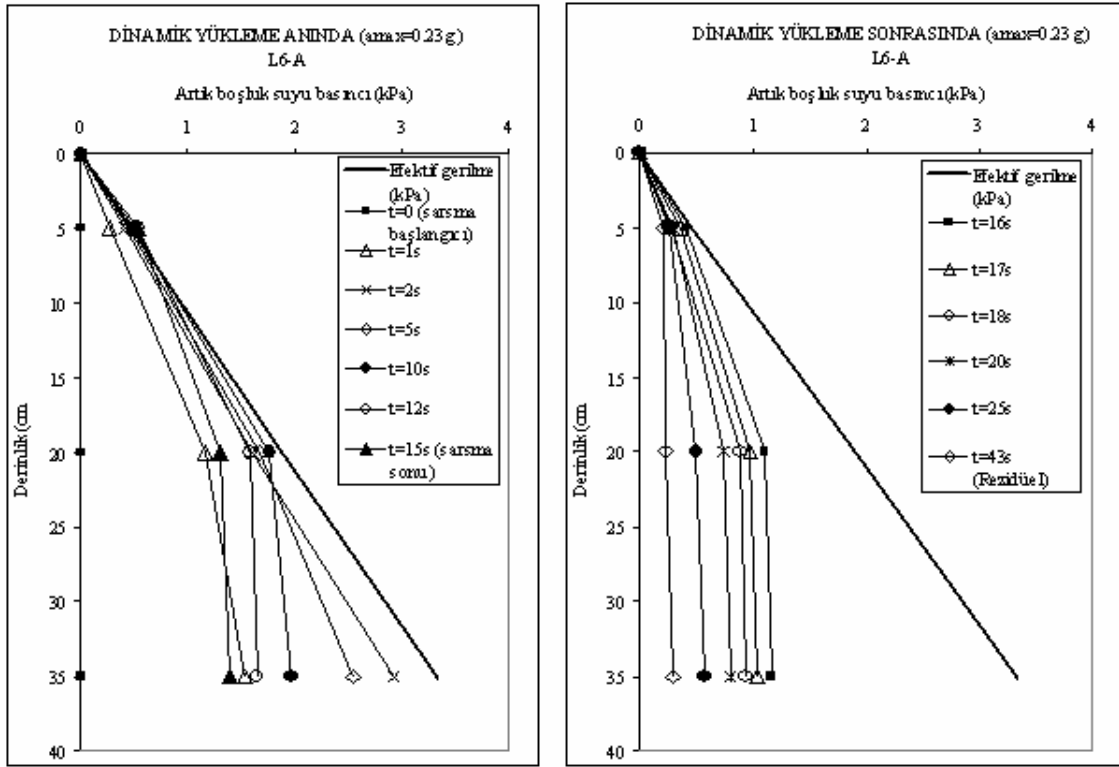
Şekil Ek 2.22 L4-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



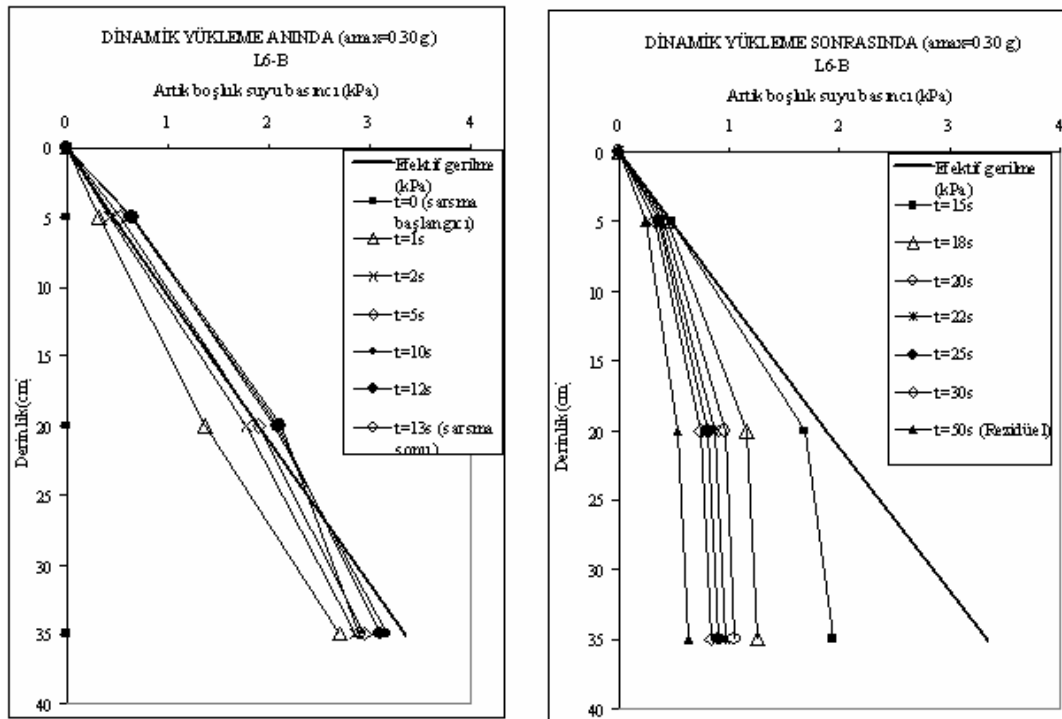
Şekil Ek 2.23 L5-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



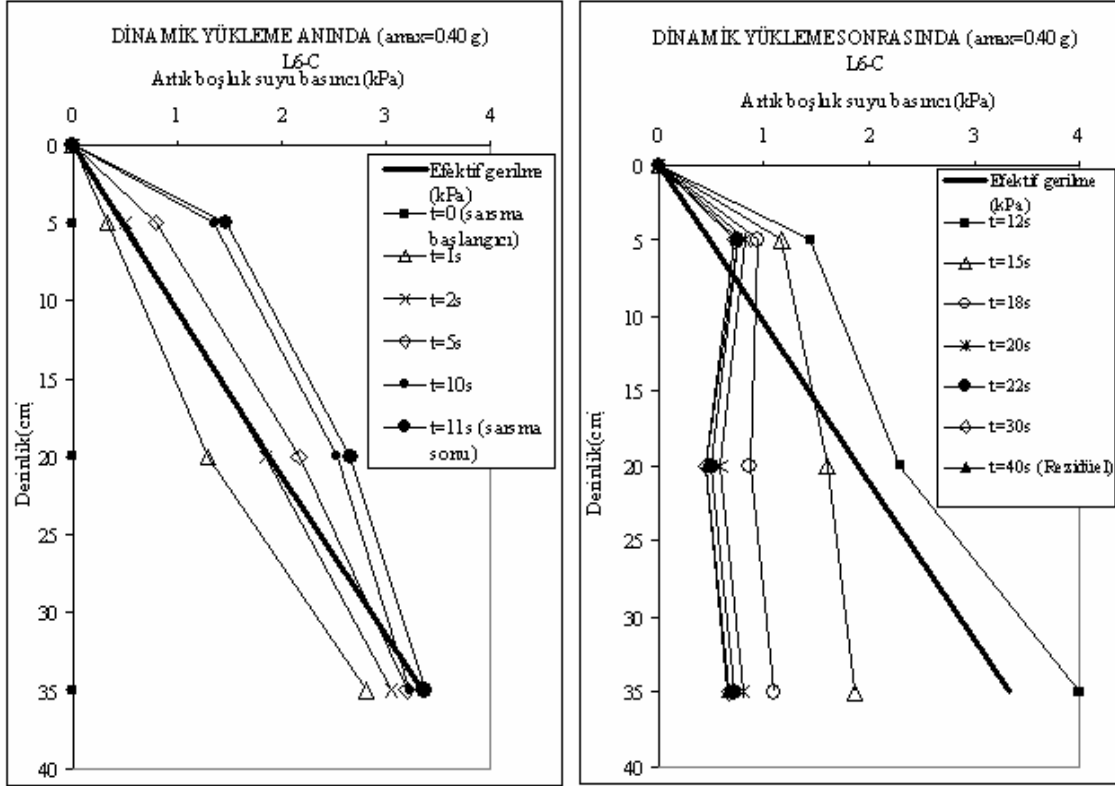
Şekil Ek 2.24 L5-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



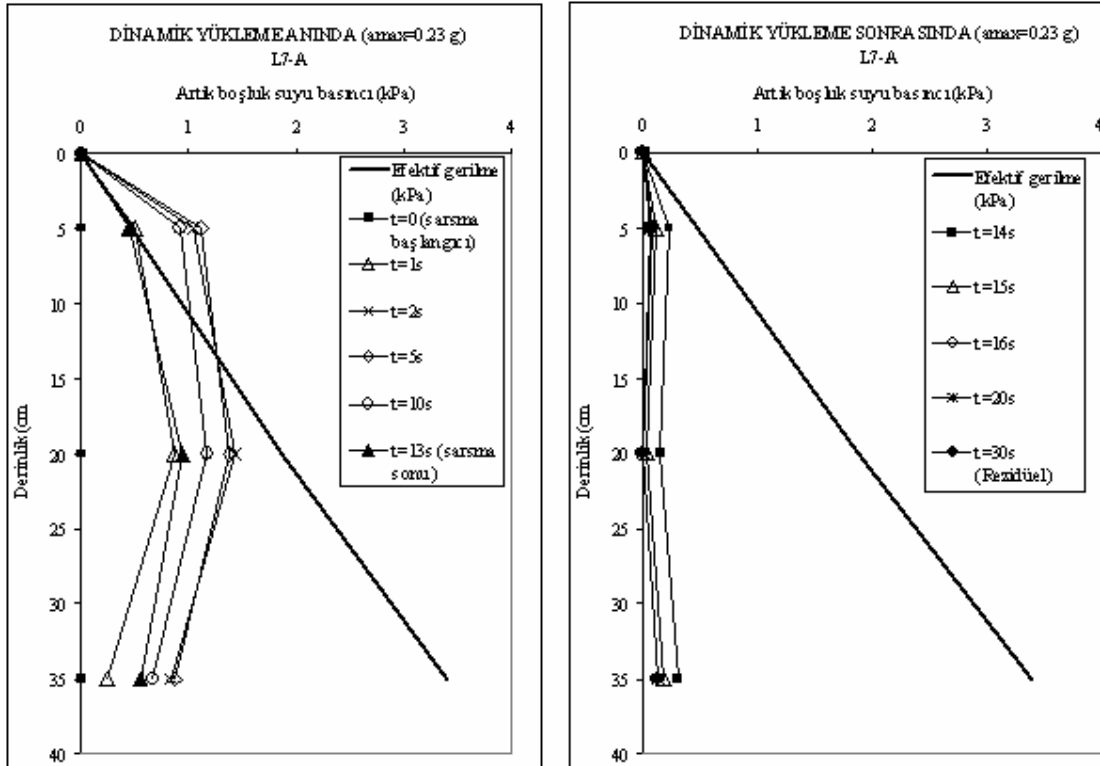
Şekil Ek 2.25 L6-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



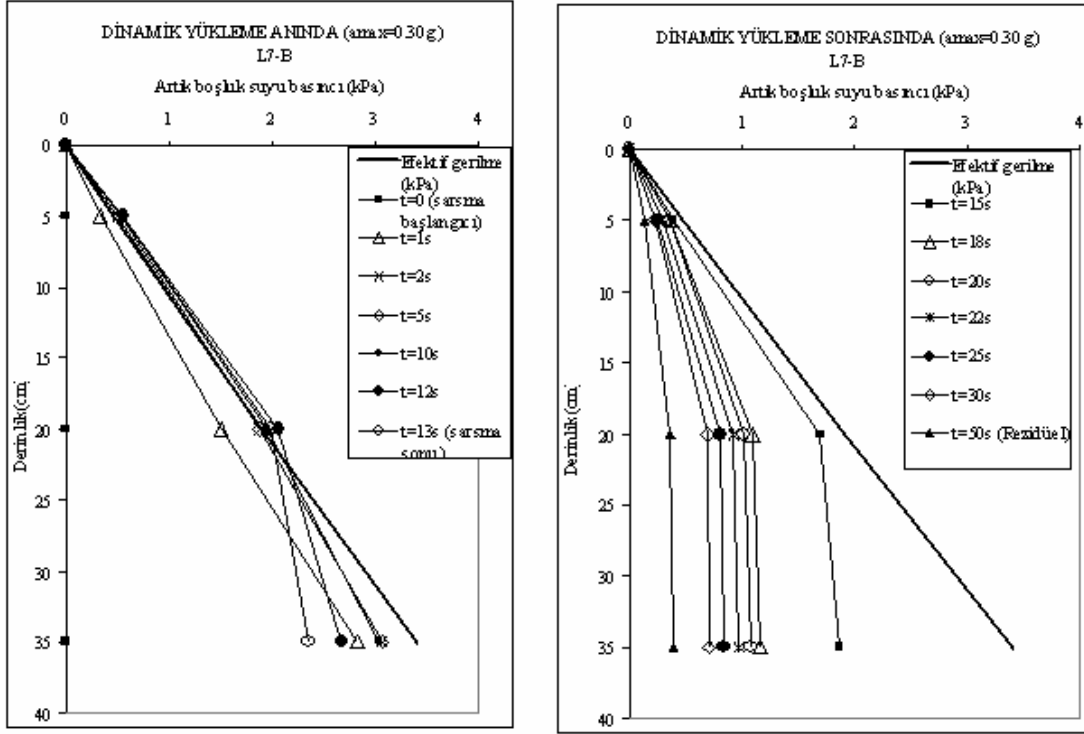
Şekil Ek 2.26 L6-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



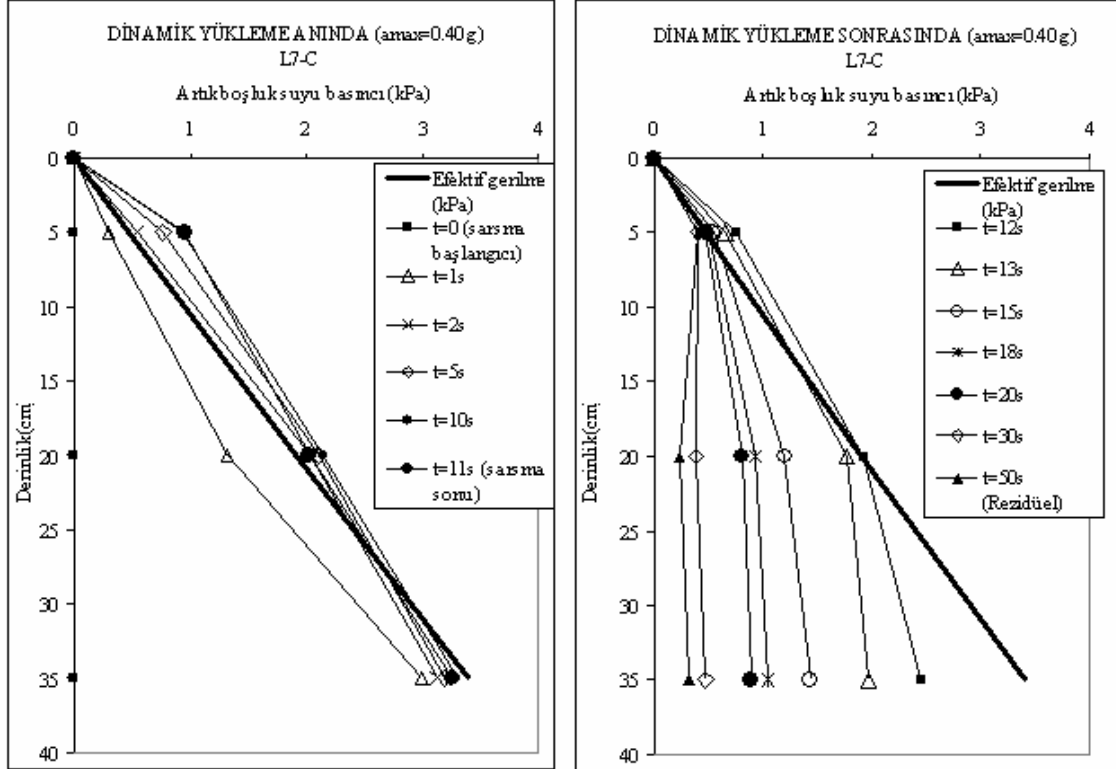
Şekil Ek 2.27 L6-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



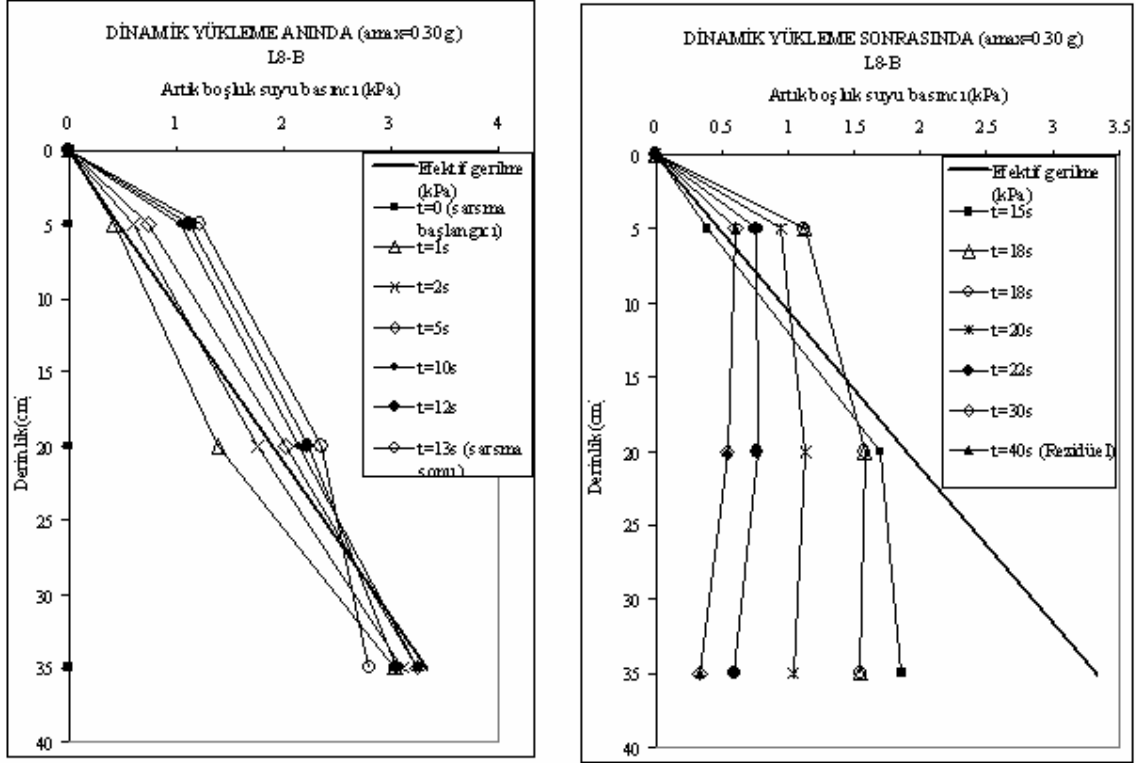
Şekil Ek 2.28 L7-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



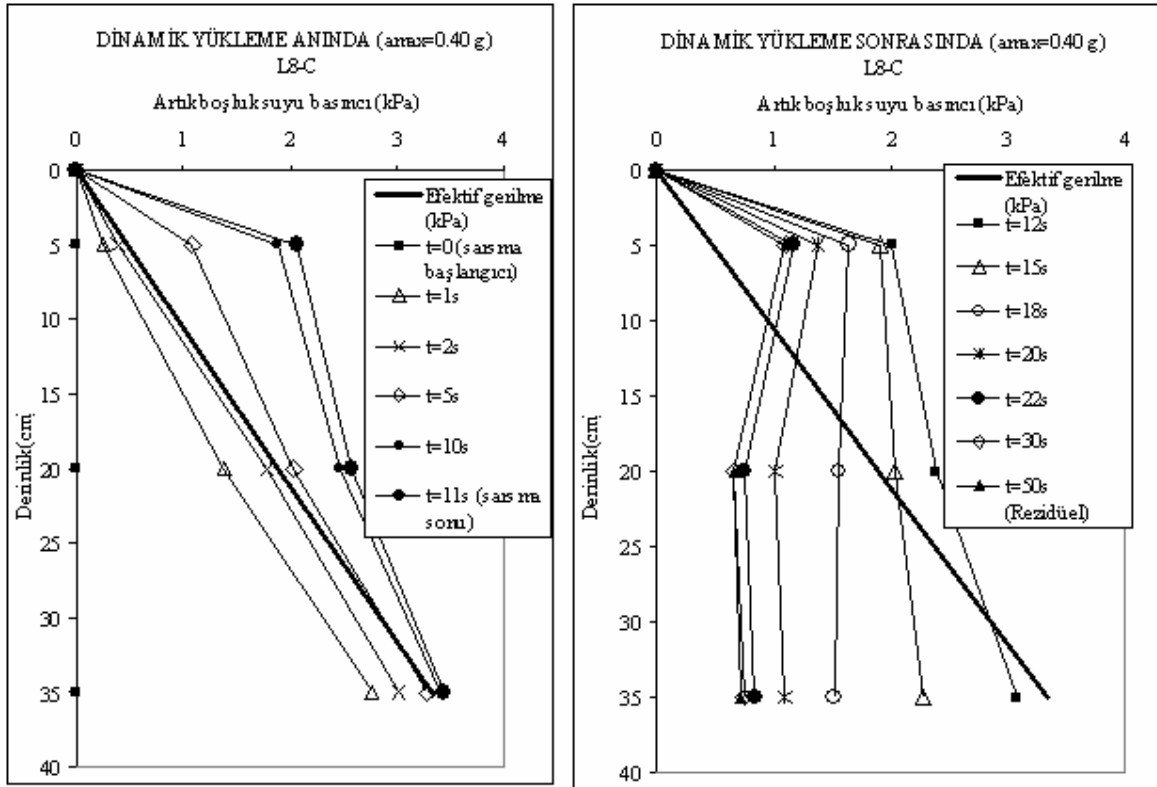
Şekil Ek 2.29 L7-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



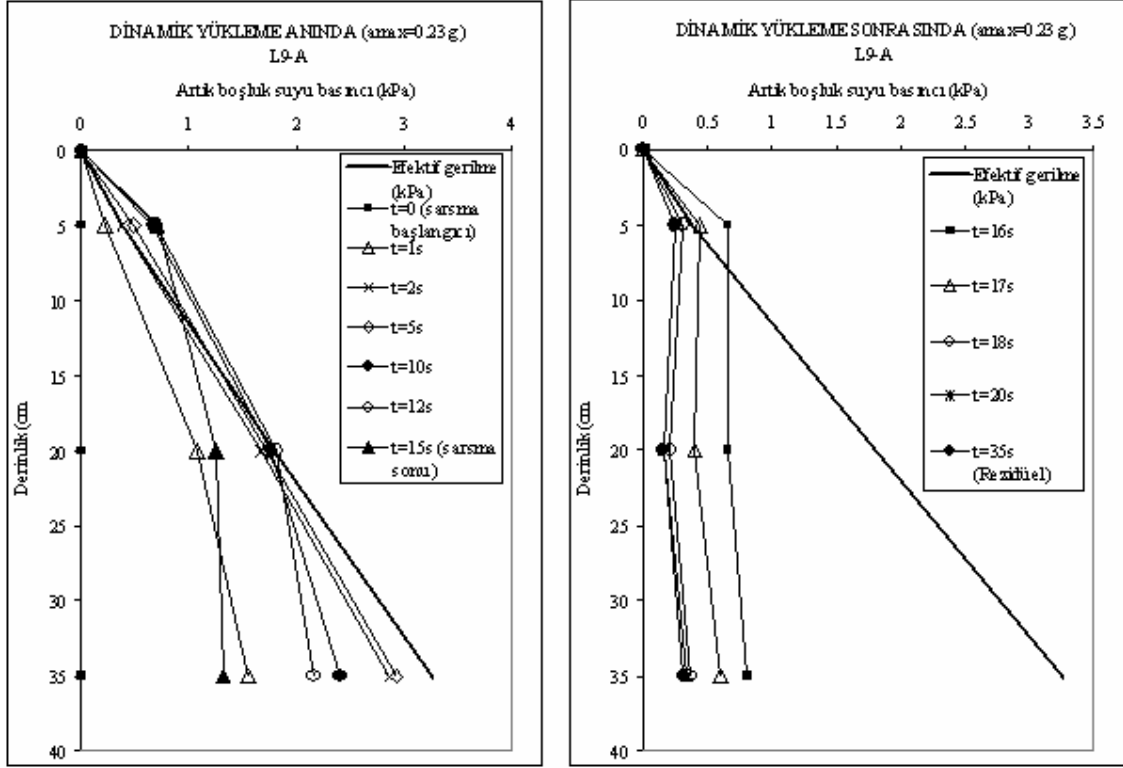
Şekil Ek 2.30 L7-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



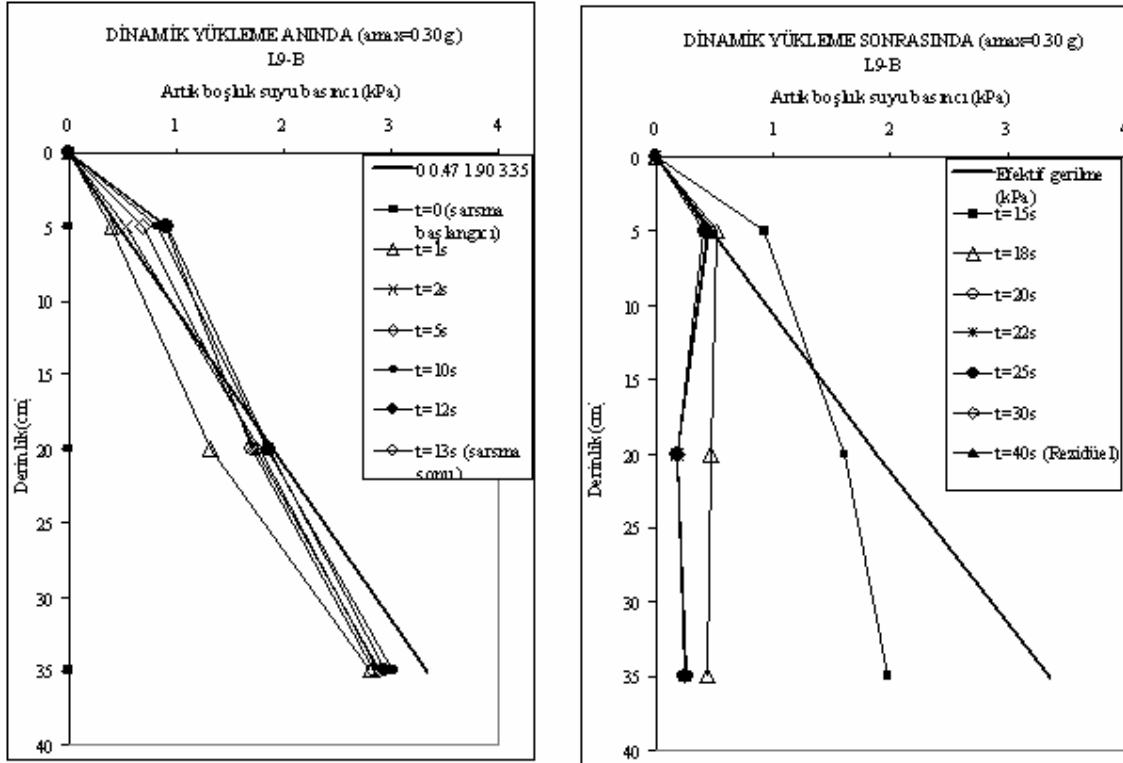
Şekil Ek 2.31 L8-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



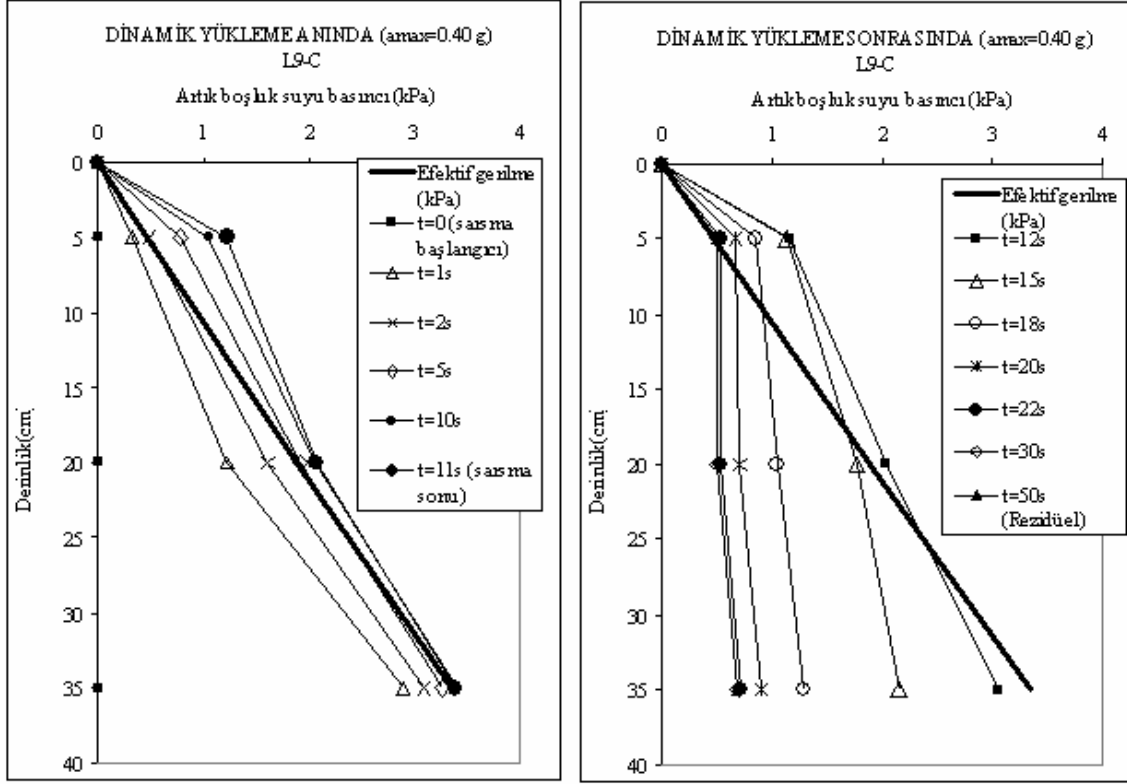
Şekil Ek 2.32 L8-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



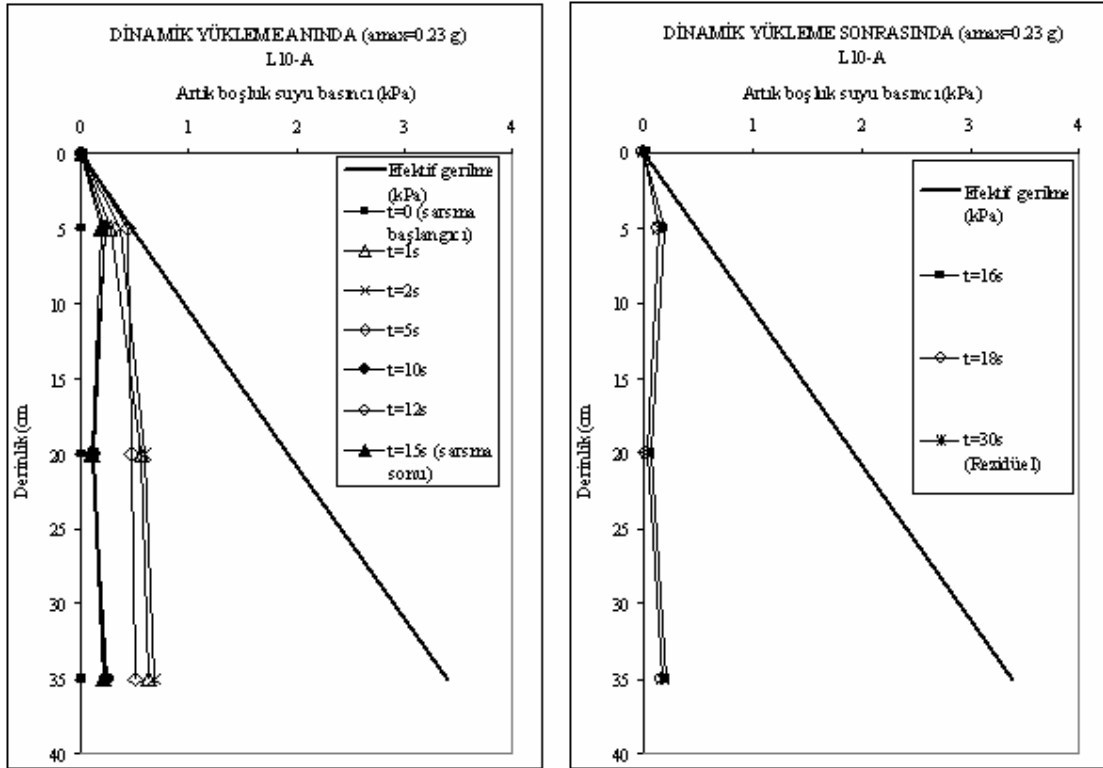
Şekil Ek 2.33 L9-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



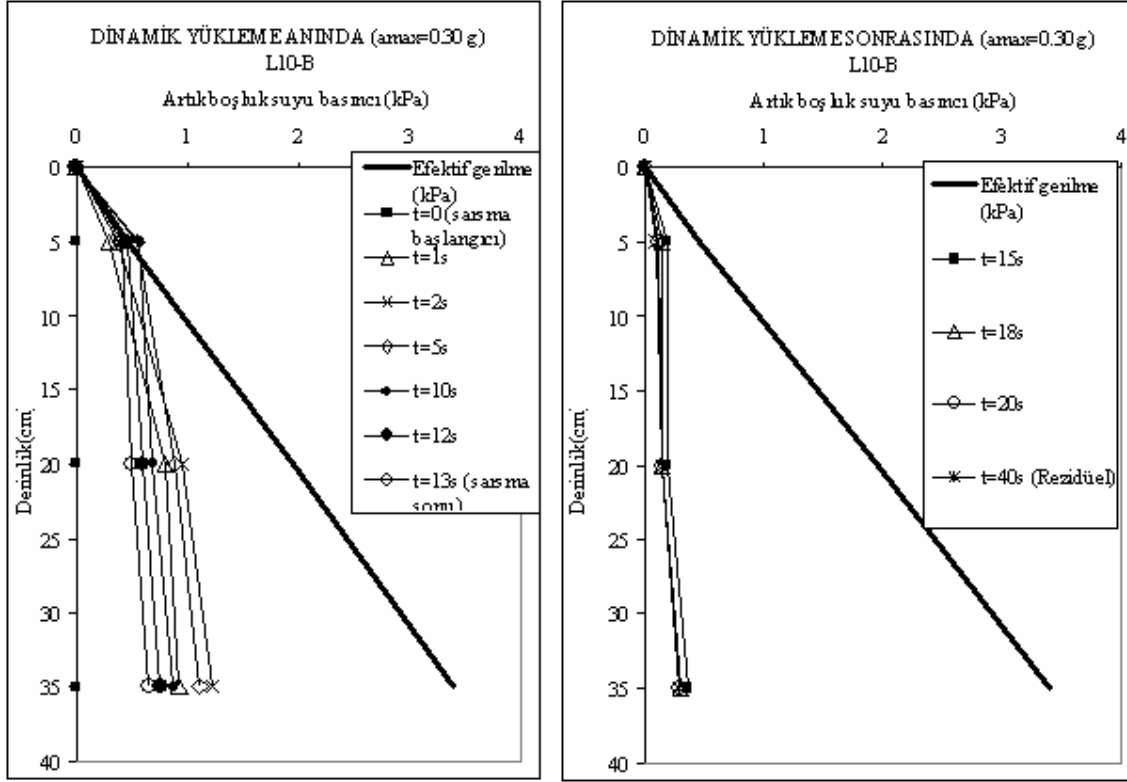
Şekil Ek 2.34 L9-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



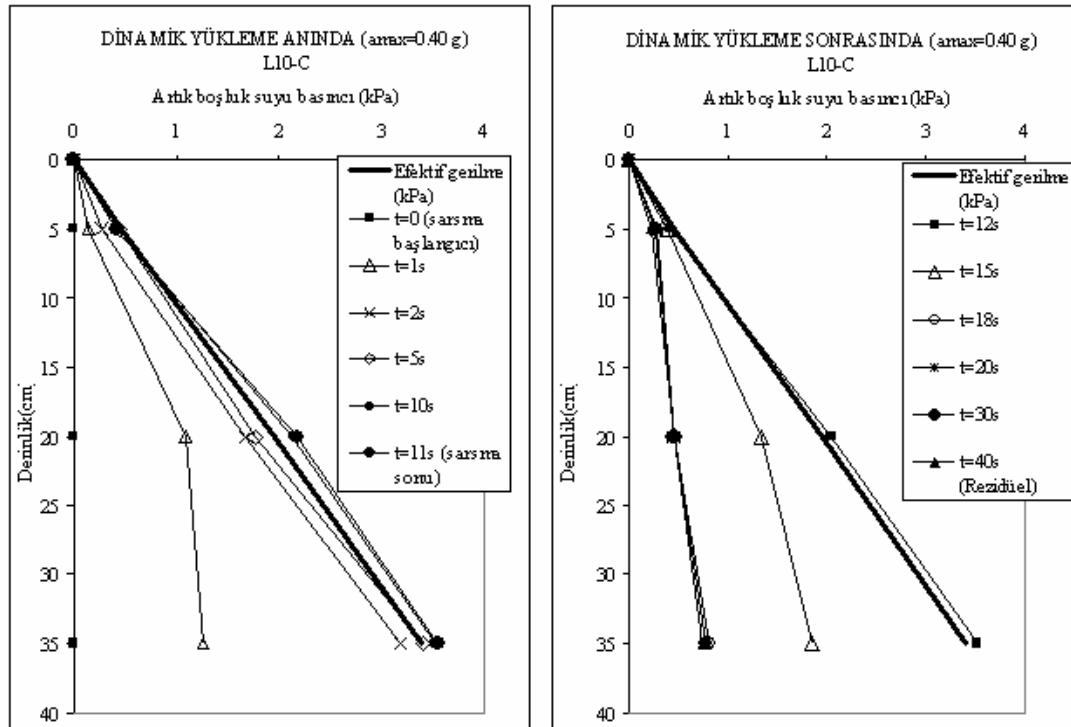
Şekil Ek 2.35 L9-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



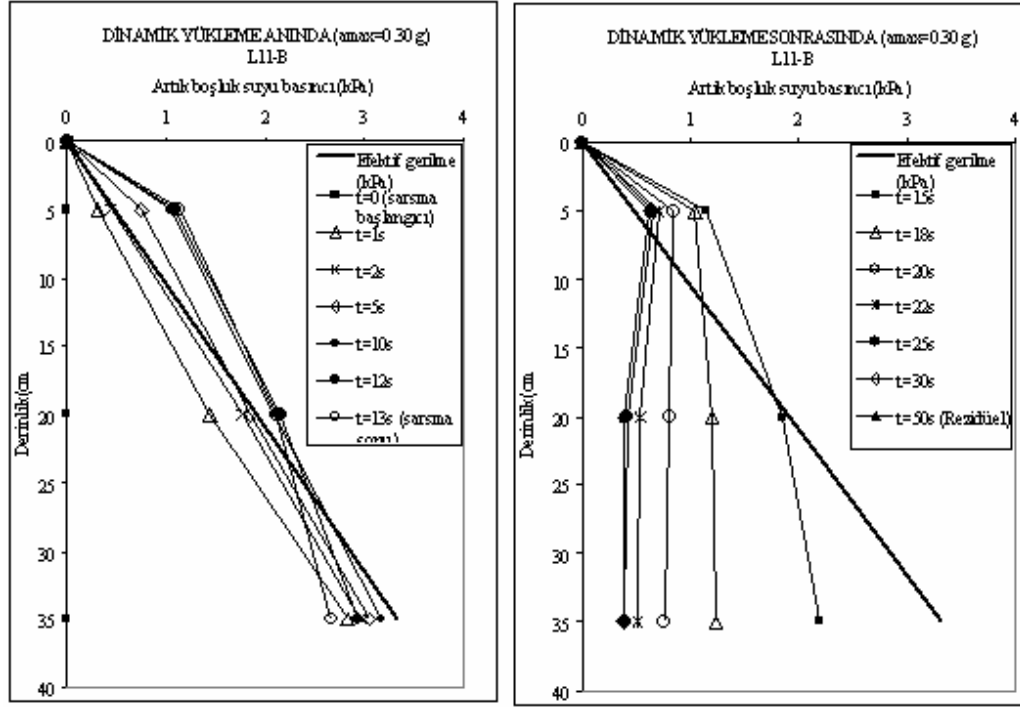
Şekil Ek 2.36 L10-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



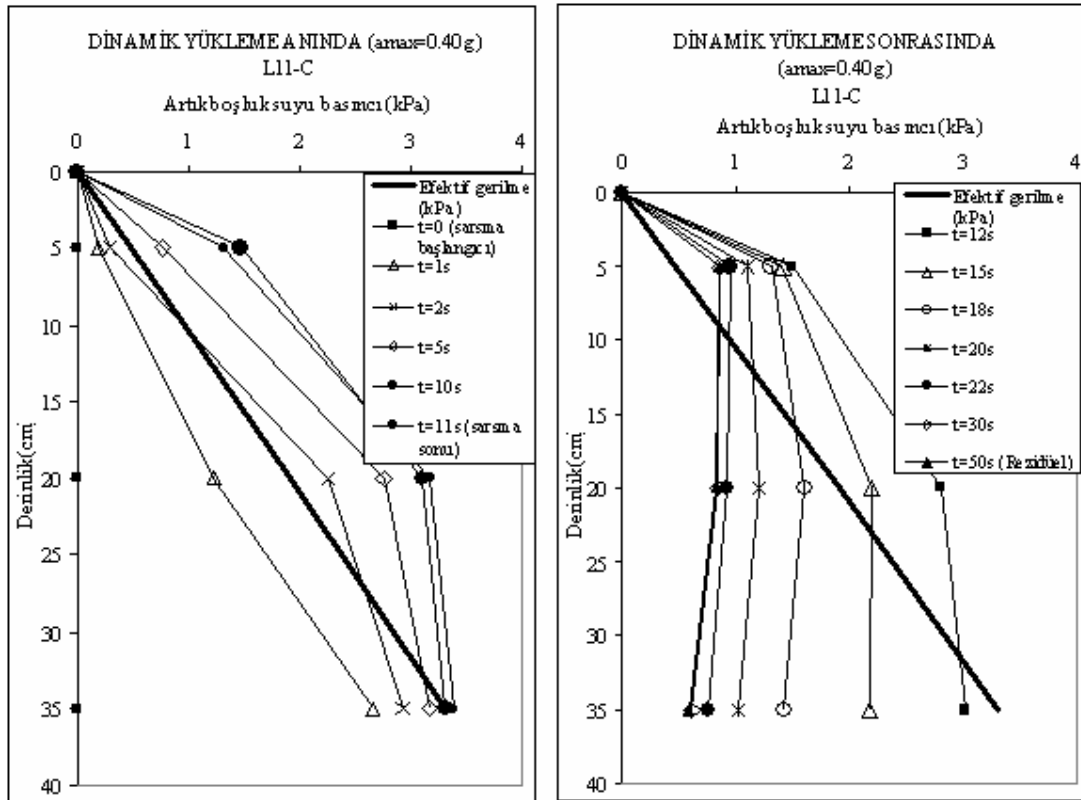
Şekil Ek 2.37 L10-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



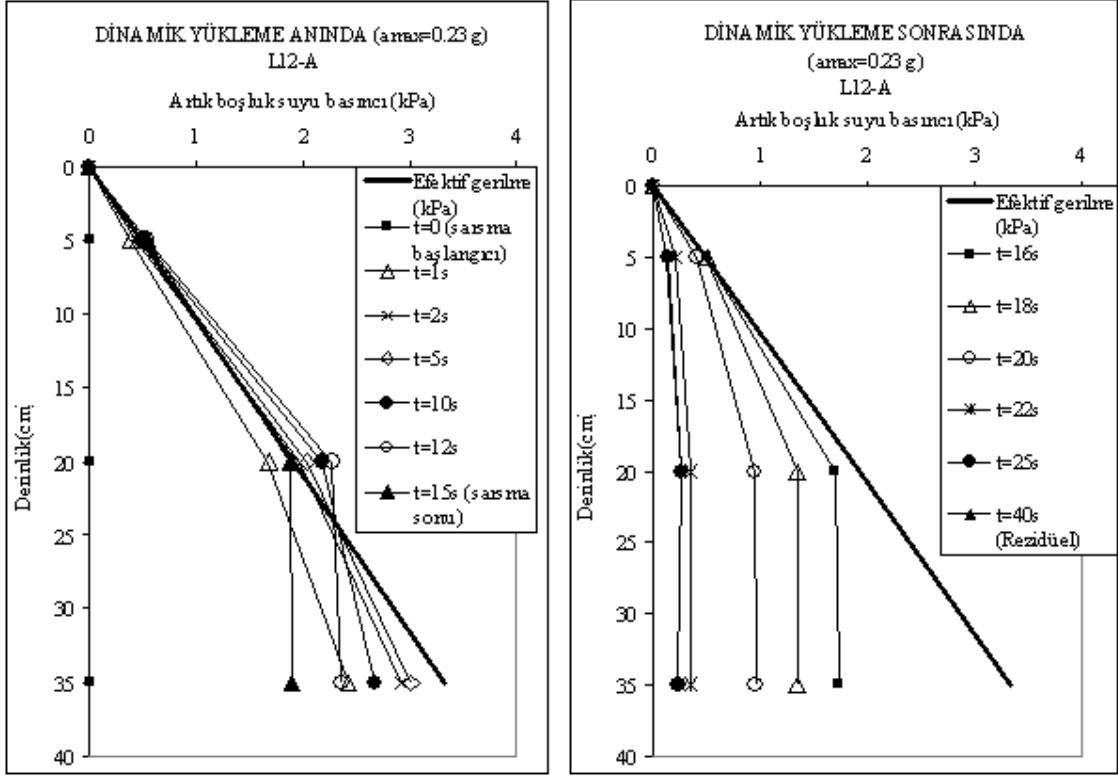
Şekil Ek 2.38 L10-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



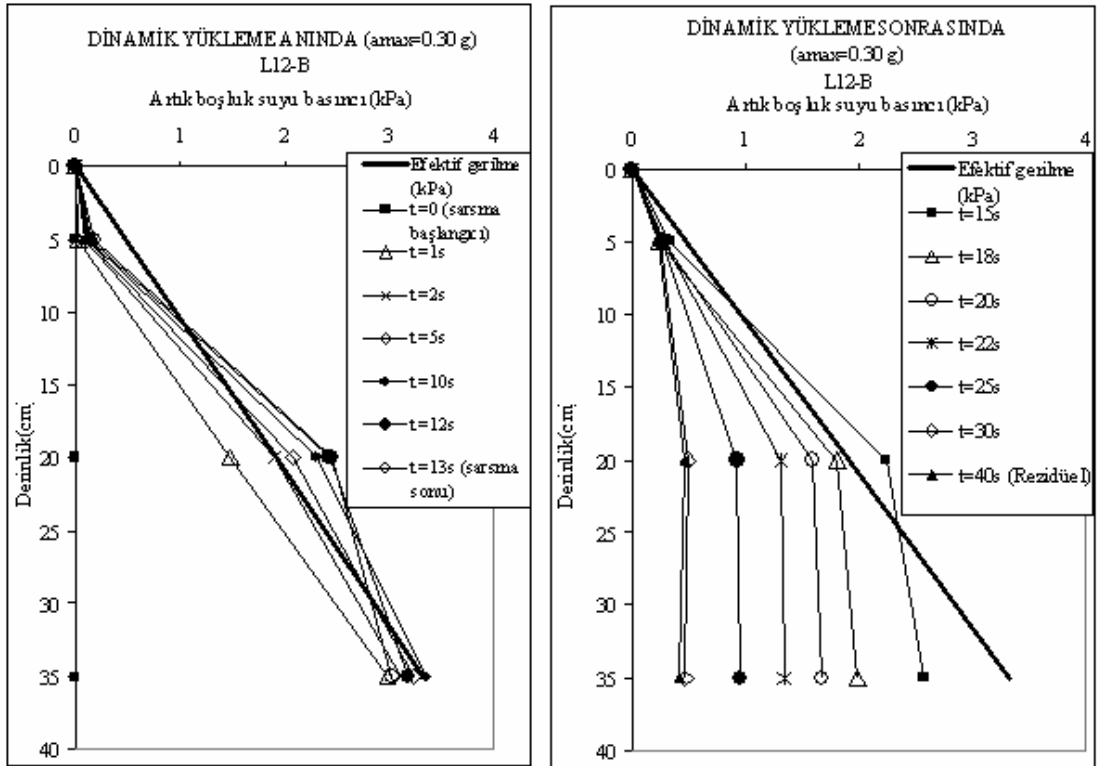
Şekil Ek 2.39 L11-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



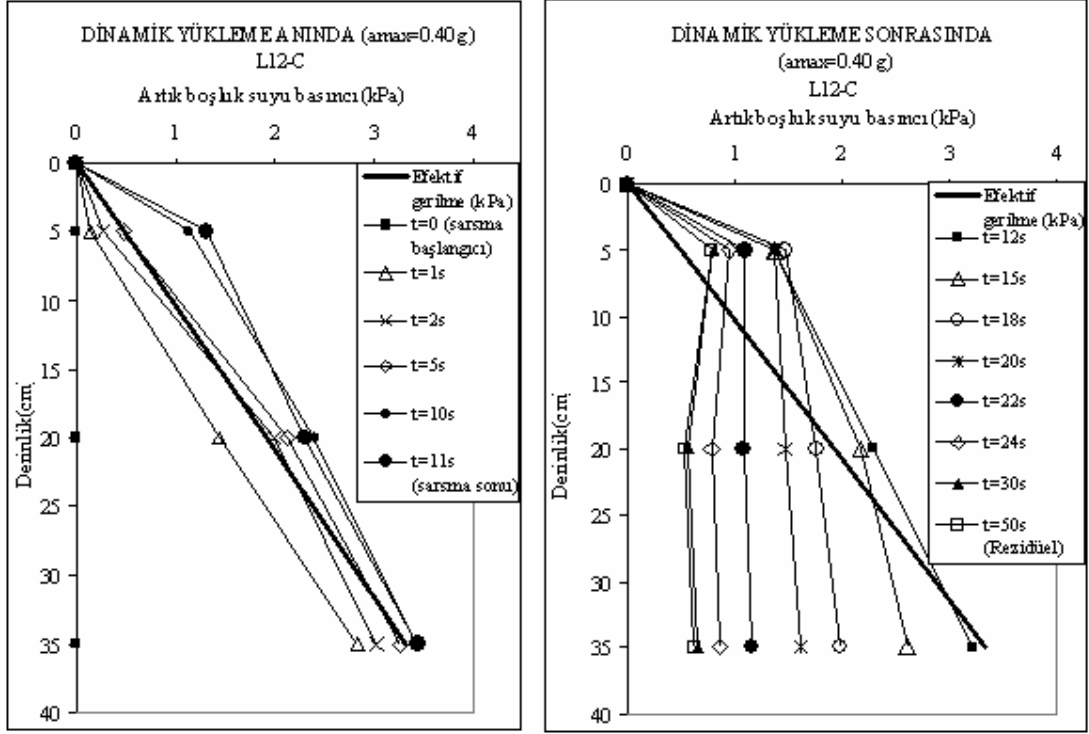
Şekil Ek 2.40 L11-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



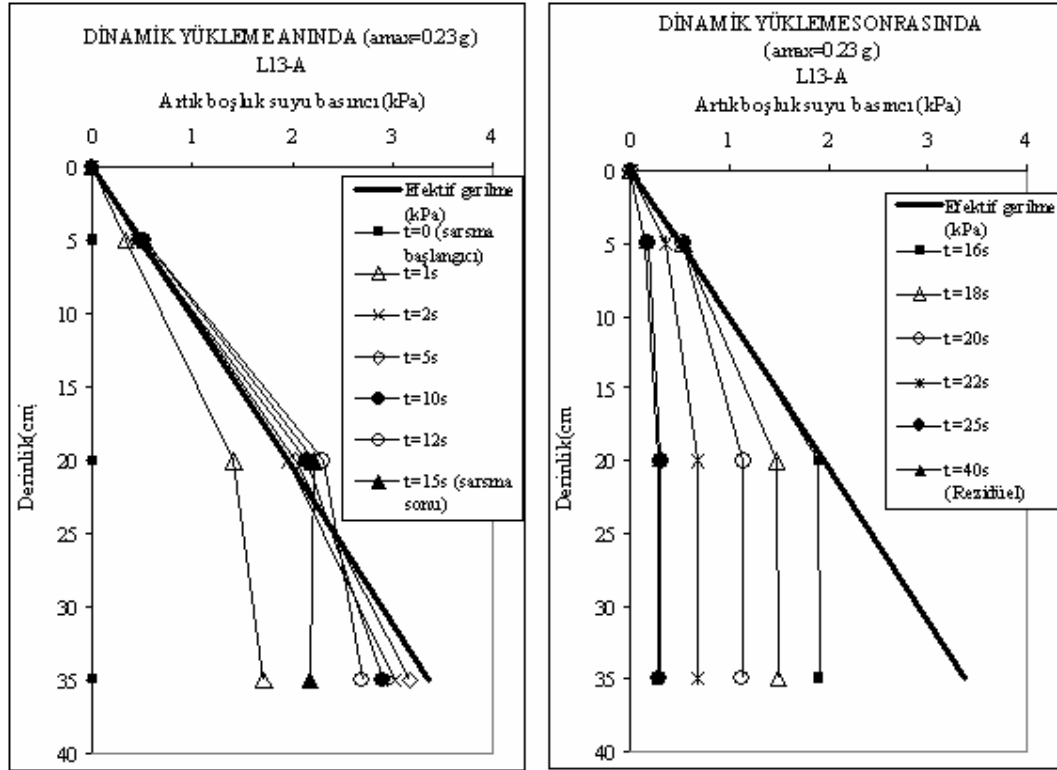
Şekil Ek 2.41 L12-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



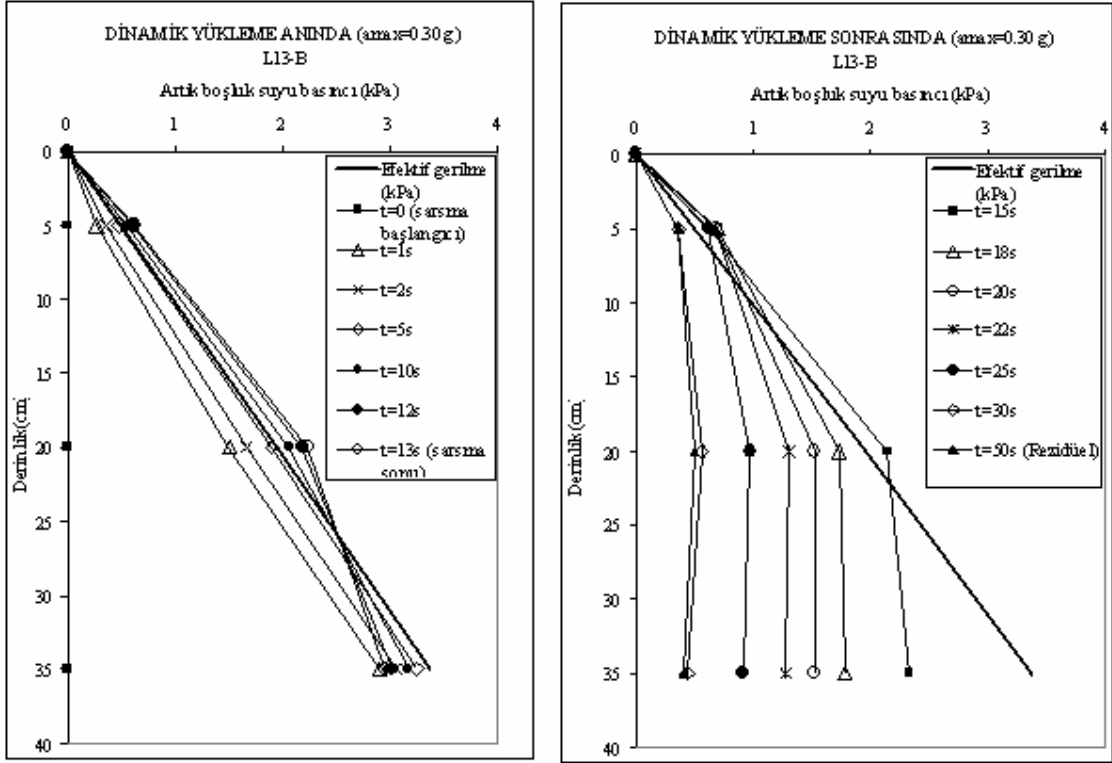
Şekil Ek 2.42 L12-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



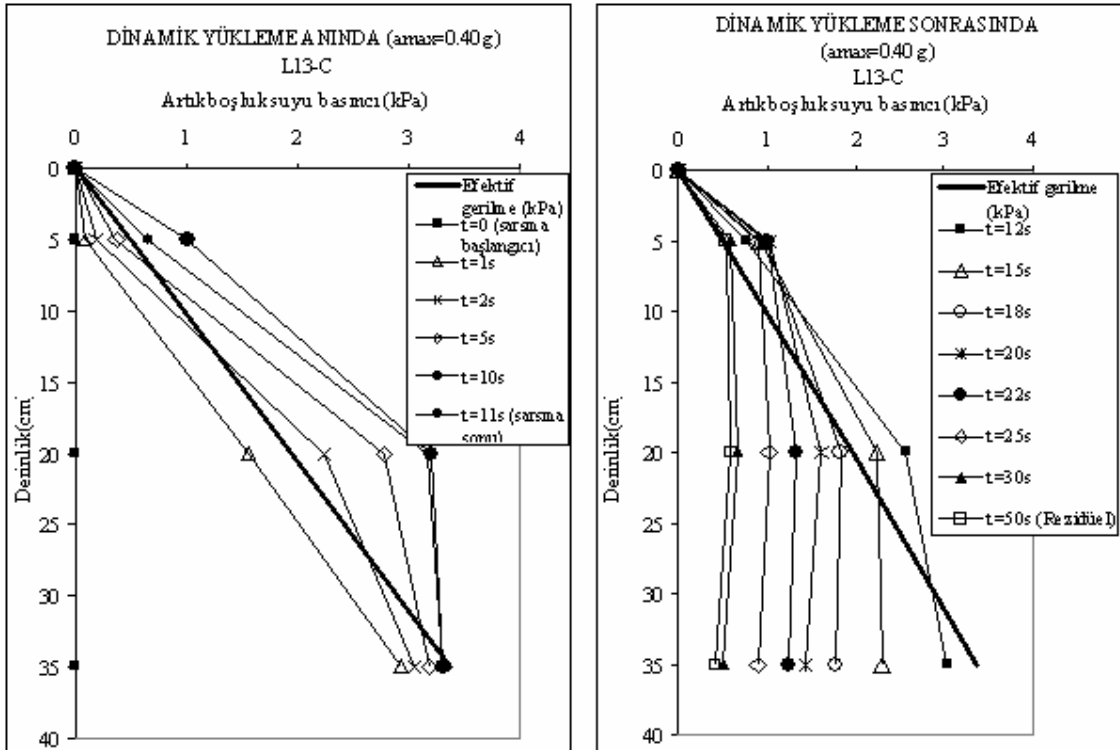
Şekil Ek 2.43 L12-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



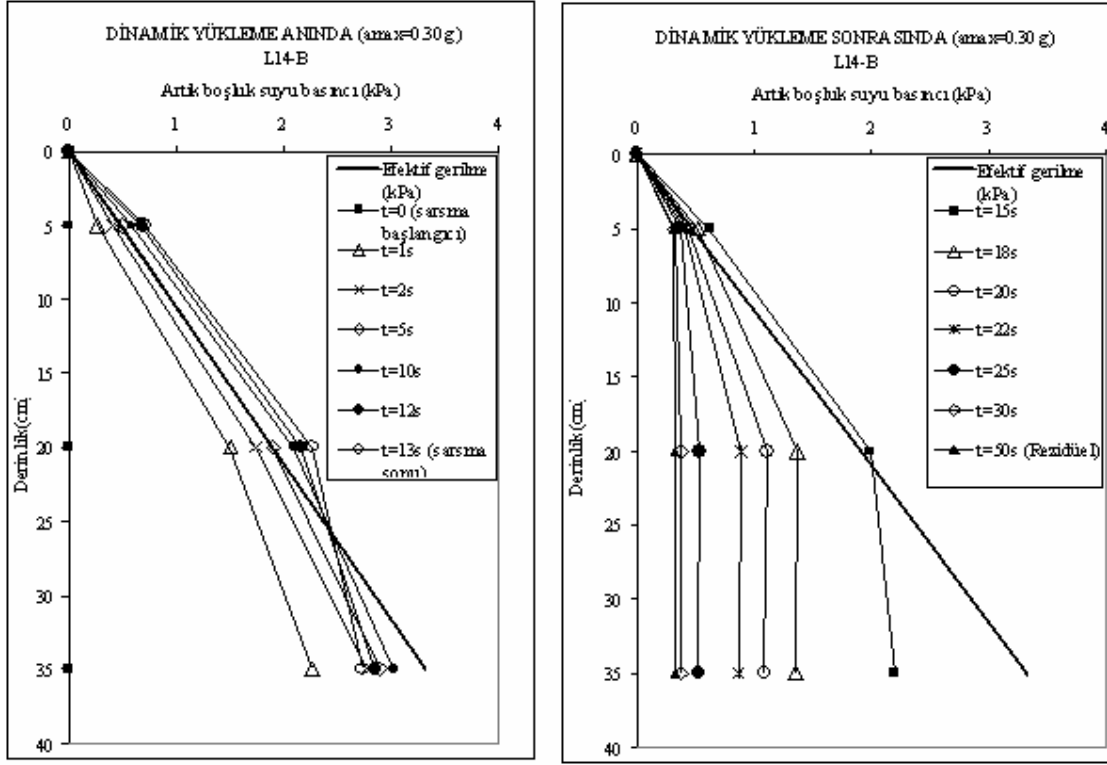
Şekil Ek 2.44 L13-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



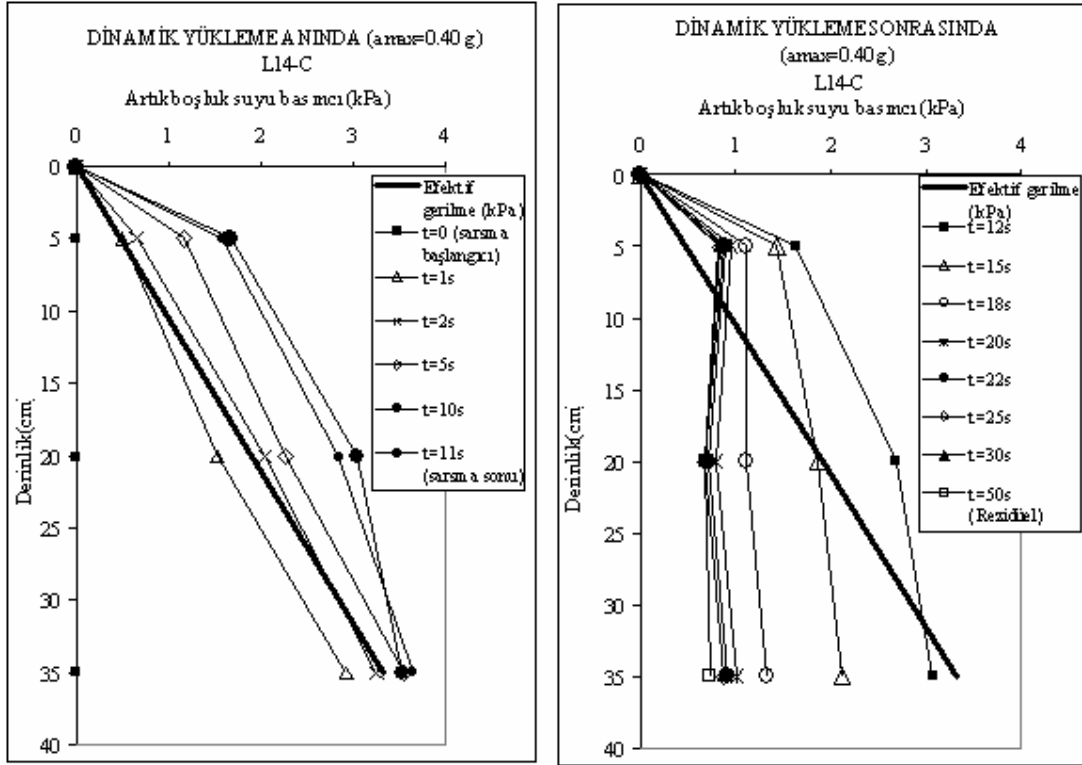
Şekil Ek 2.45 L13-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



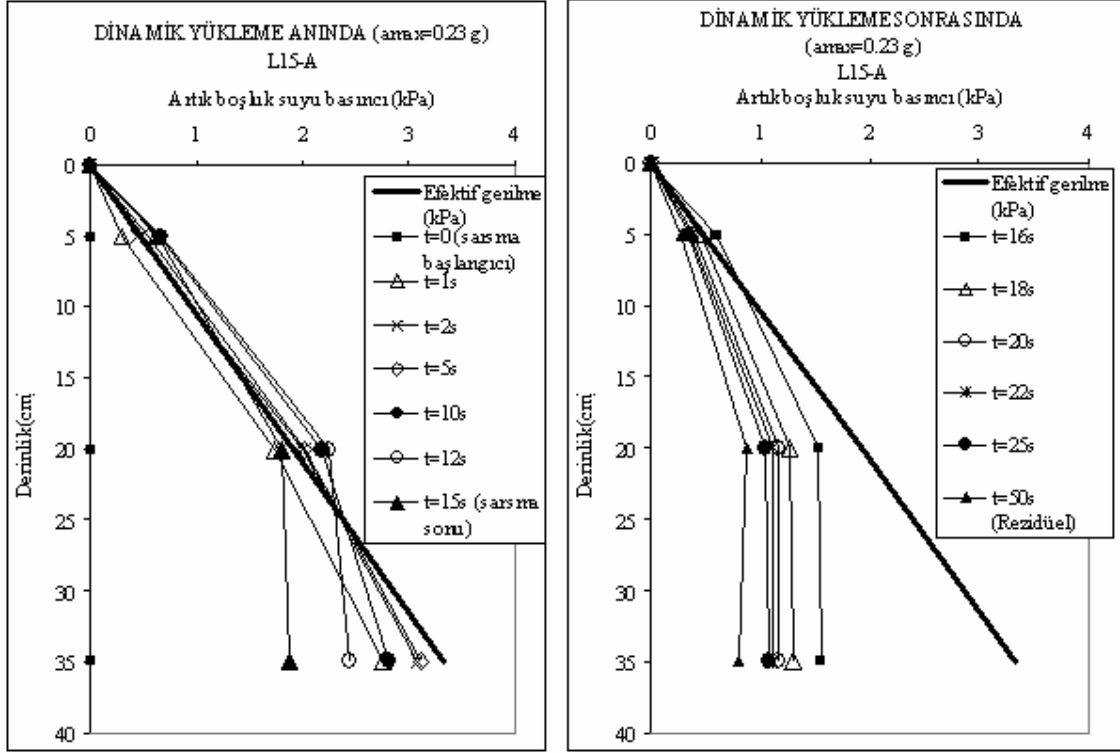
Şekil Ek 2.46 L13-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



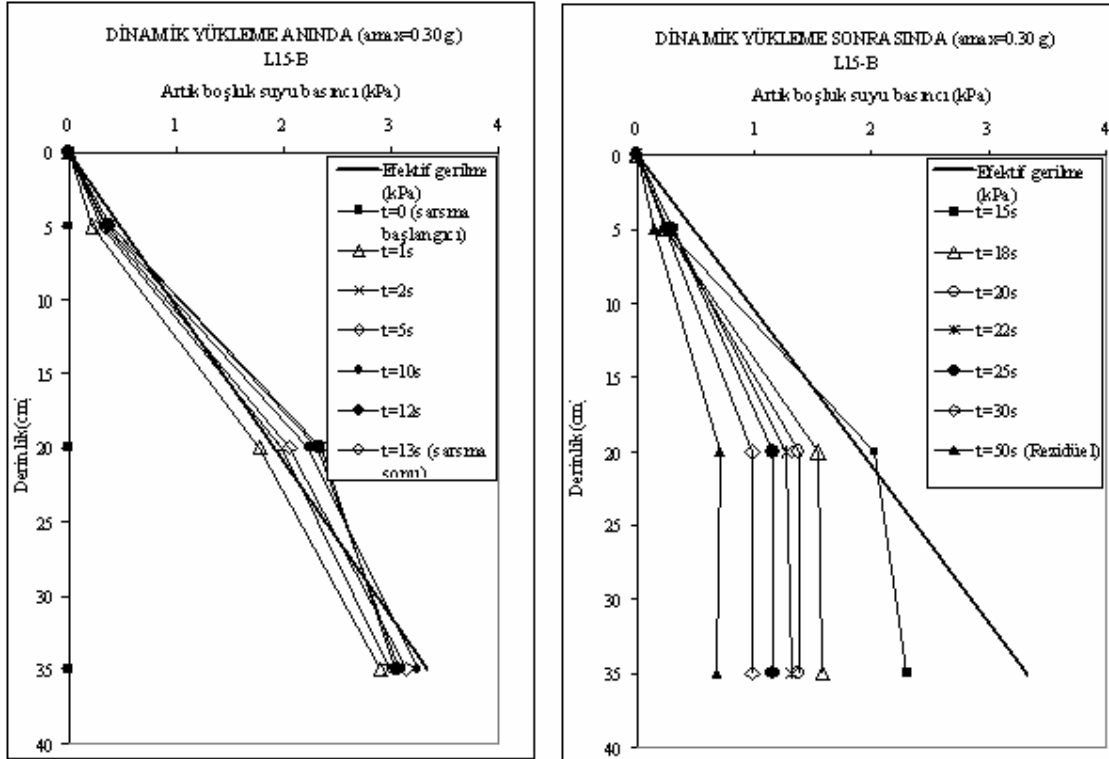
Şekil Ek 2.47 L14-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



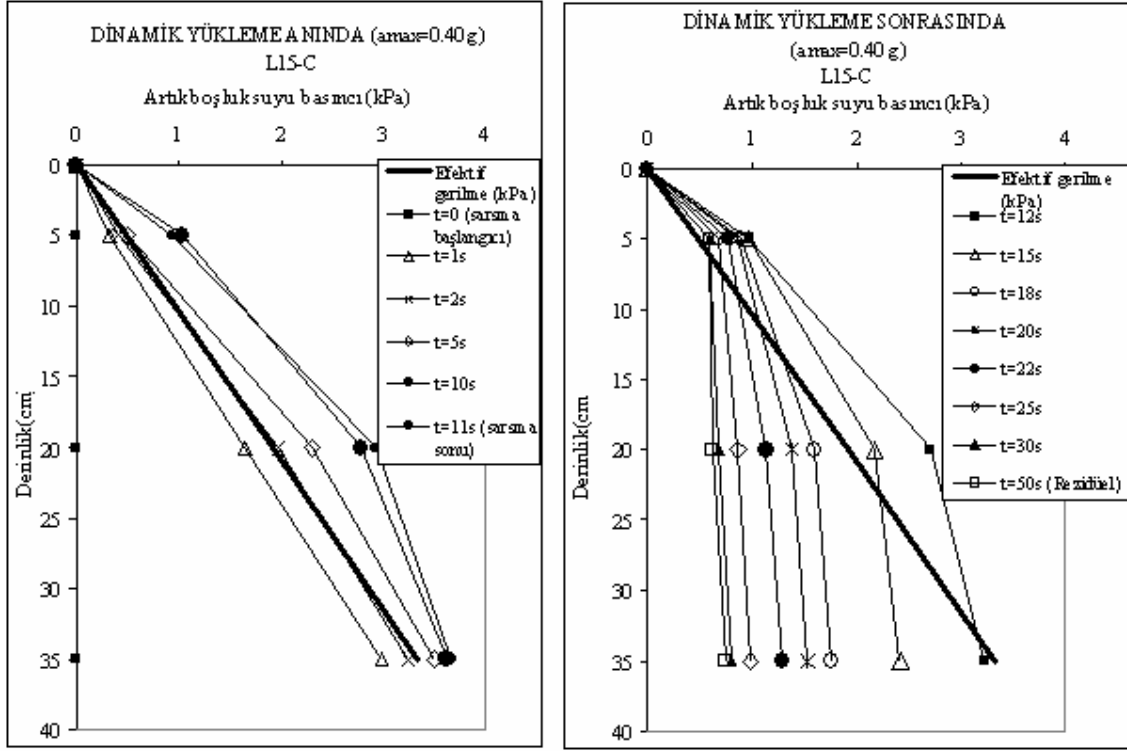
Şekil Ek 2.48 L14-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



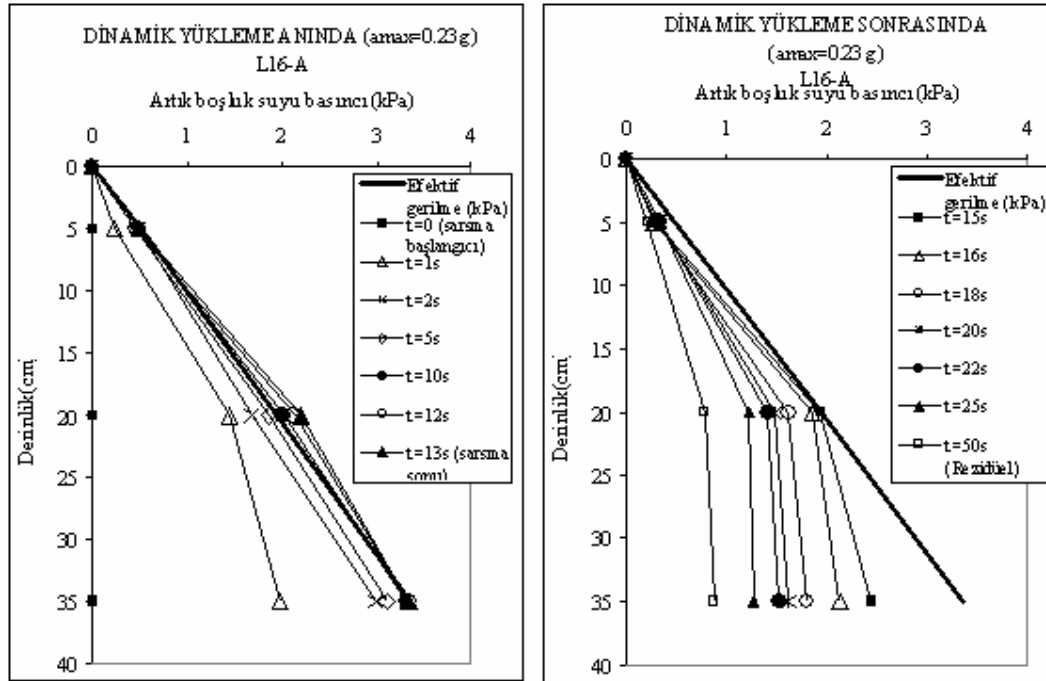
Şekil Ek 2.49 L15-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



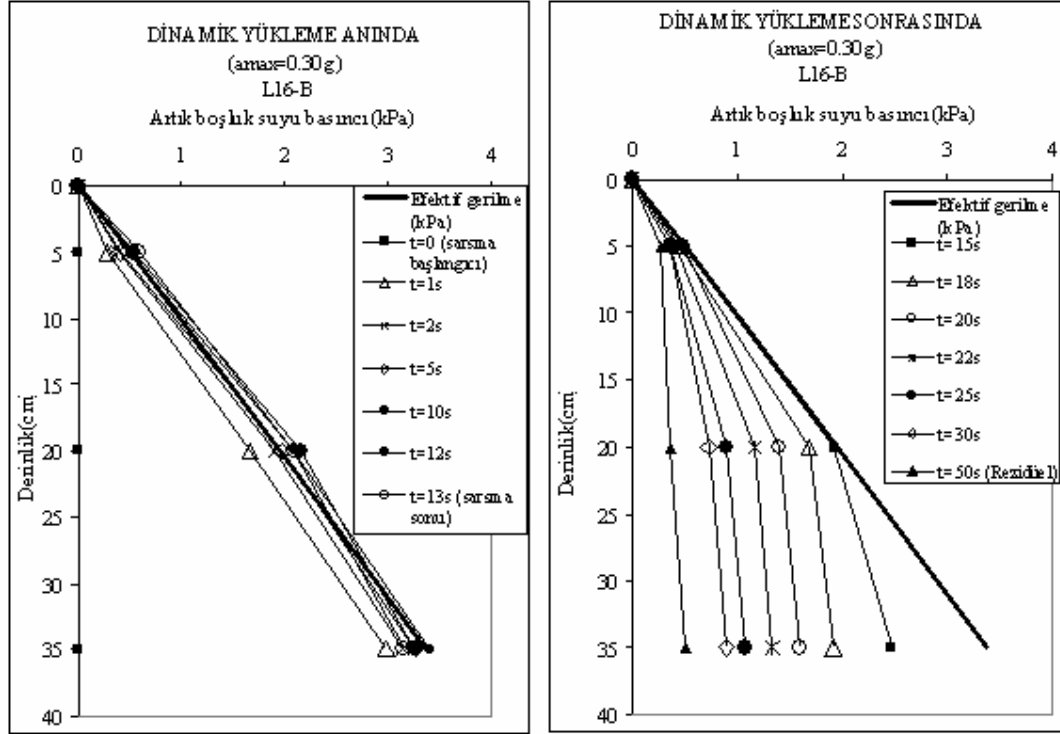
Şekil Ek 2.50 L15-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



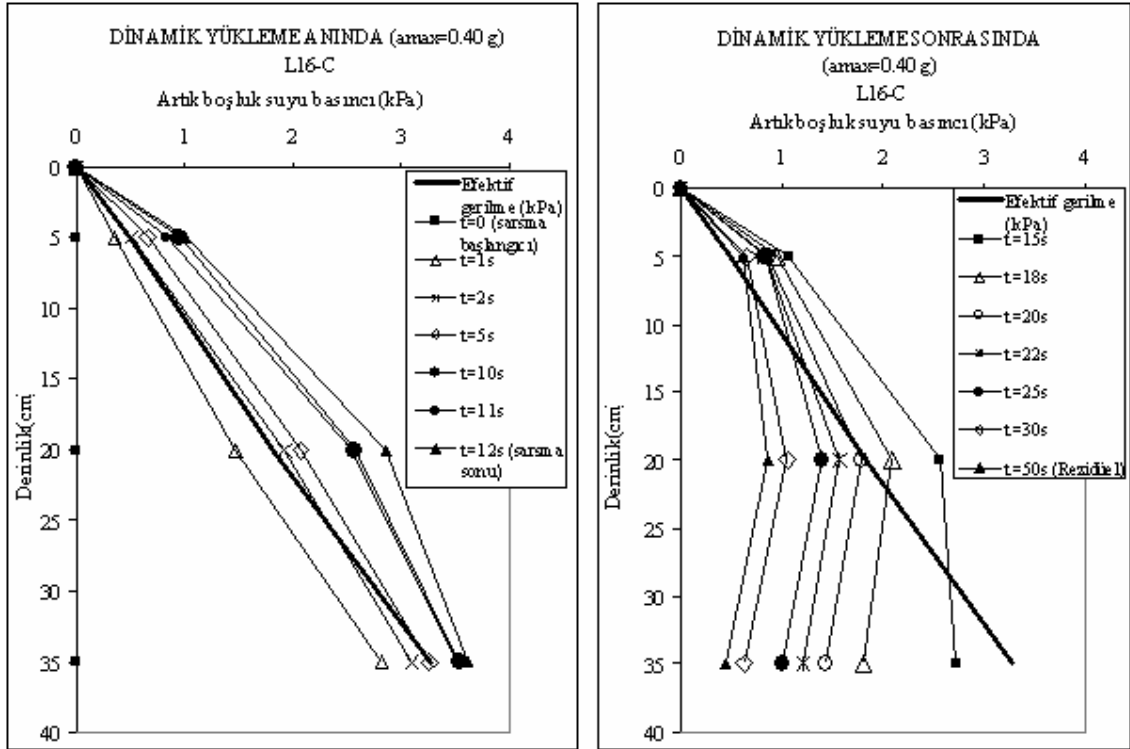
Şekil Ek 2.51 L15-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında



Şekil Ek 2.52 L16-A Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

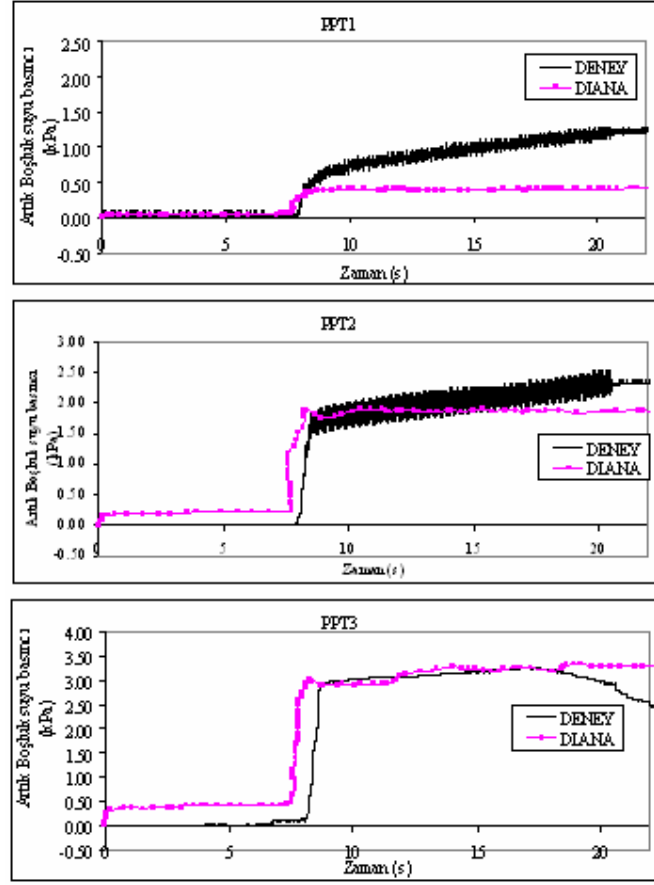


Şekil Ek 2.53 L16-B Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

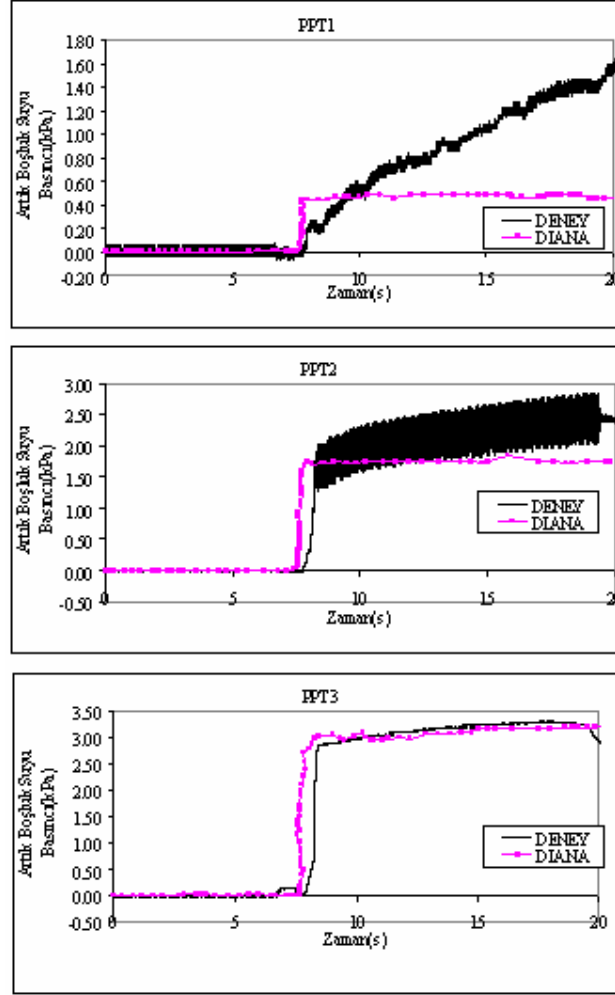


Şekil Ek 2.54 L16-C Model deneyi için artık boşluk suyu basıncı izokronları(a) Dinamik yükleme sırasında (b) Dinamik yükleme sonrasında

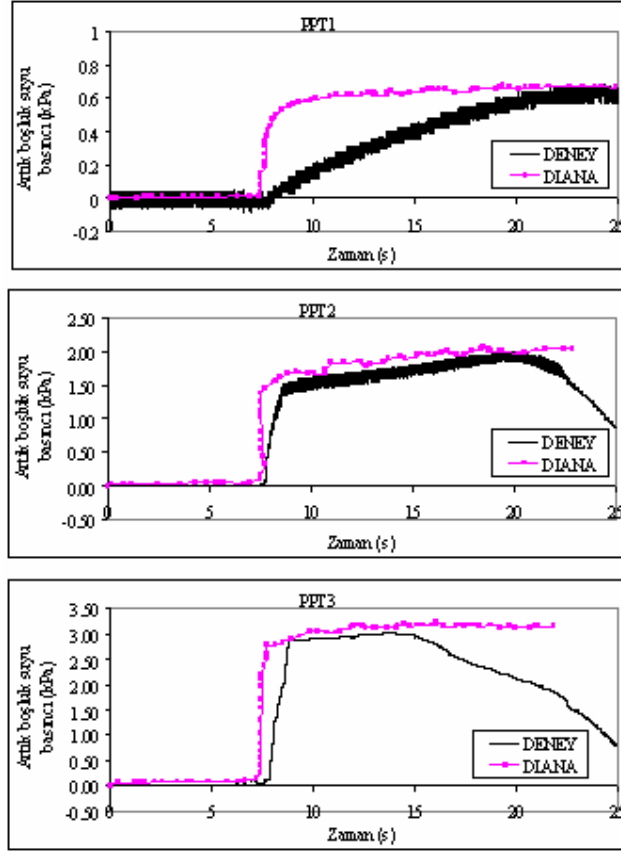
Ek 3. Nümerik Analiz Sonuçları



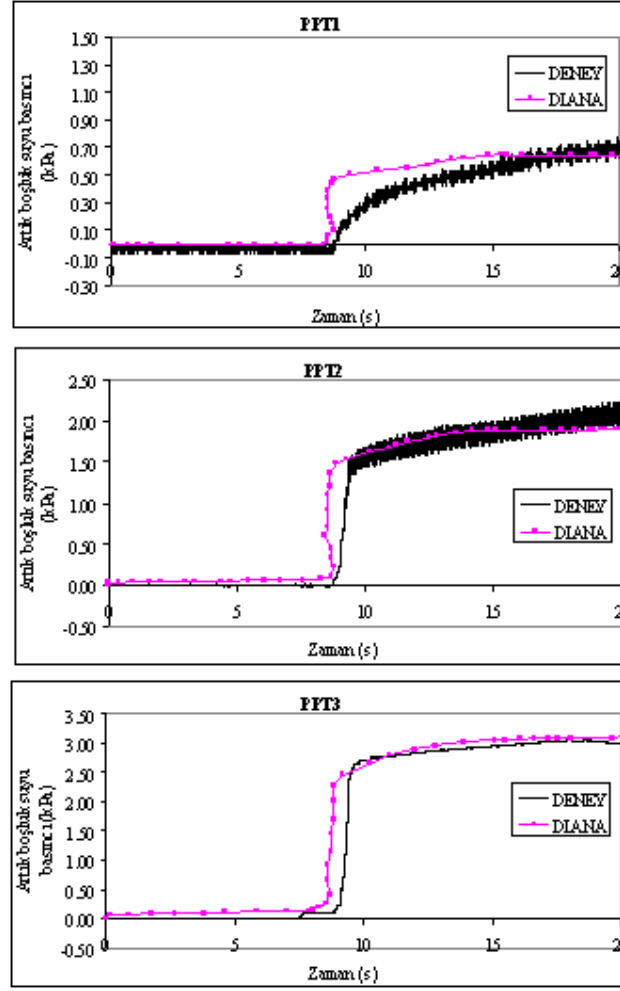
Şekil Ek 3.1 U1-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



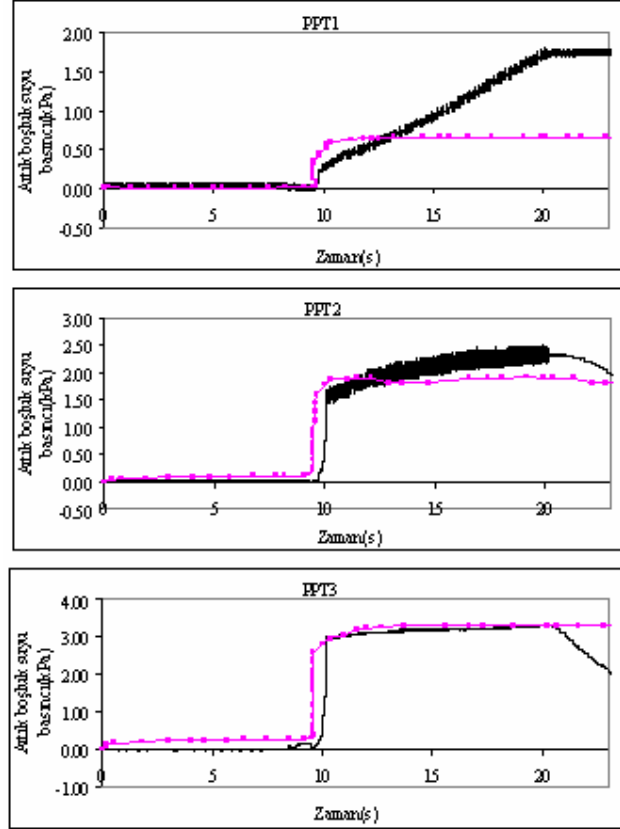
Şekil Ek 3.2 U1-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



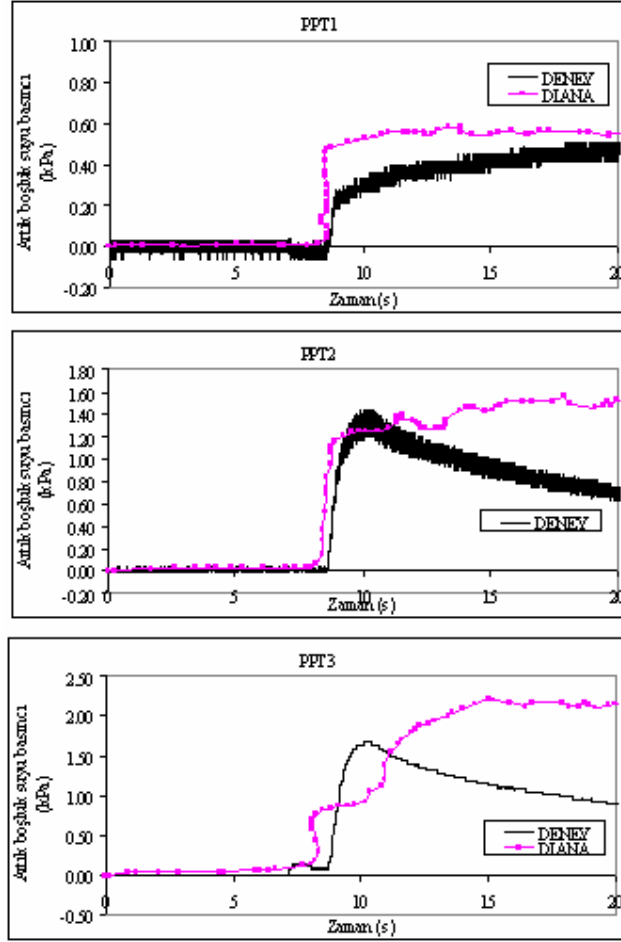
Şekil Ek 3.3 U2-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



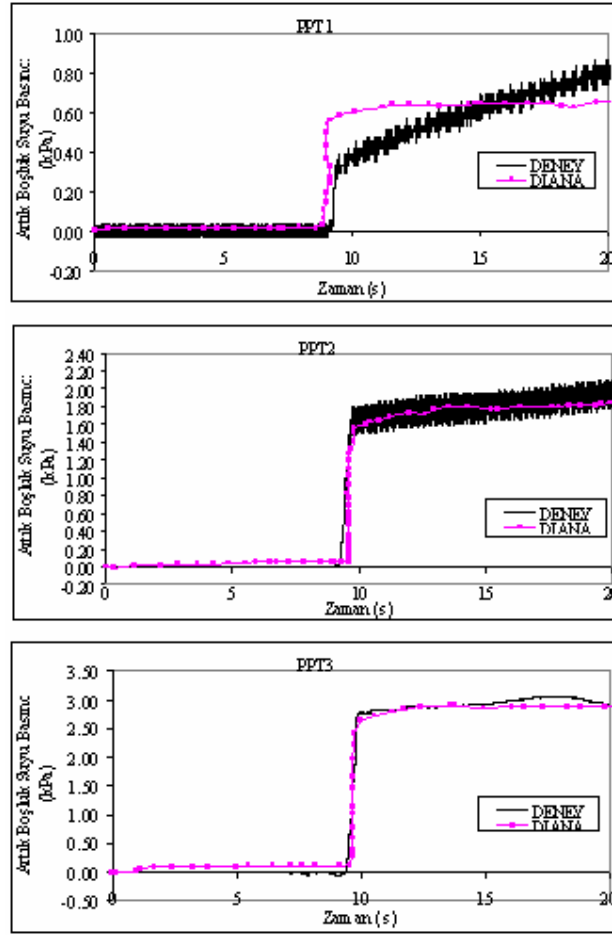
Şekil Ek 3.4 U2-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



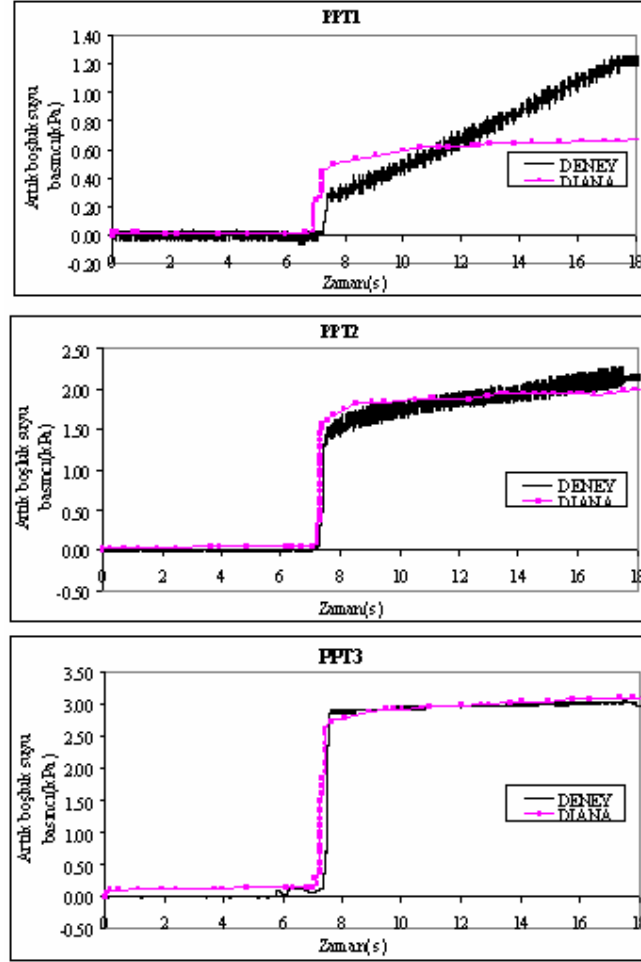
Şekil Ek 3.5 U2-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



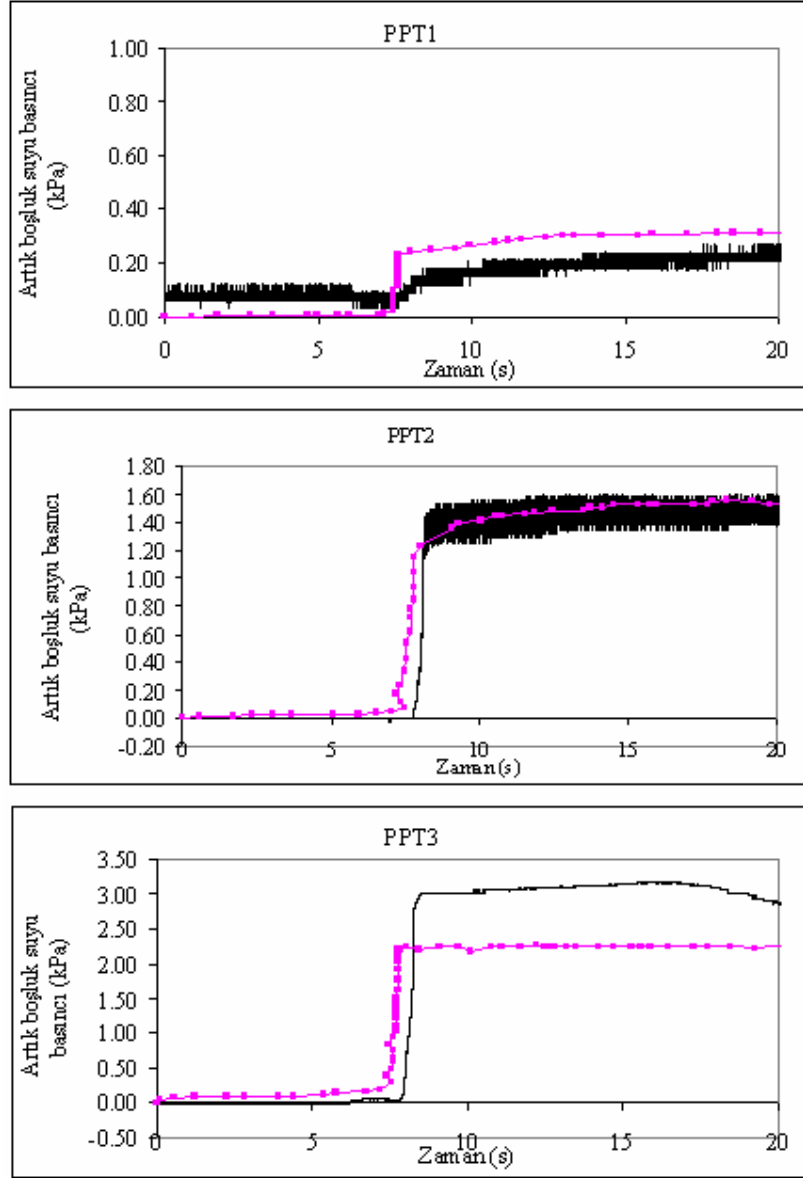
Şekil Ek 3.6 U3-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



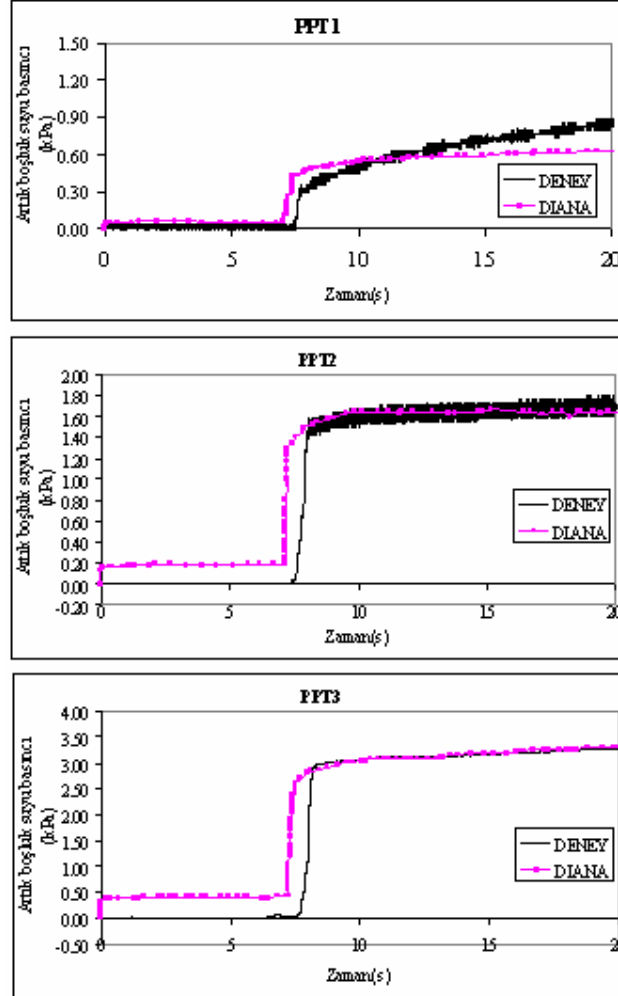
Şekil Ek 3.7 U3-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



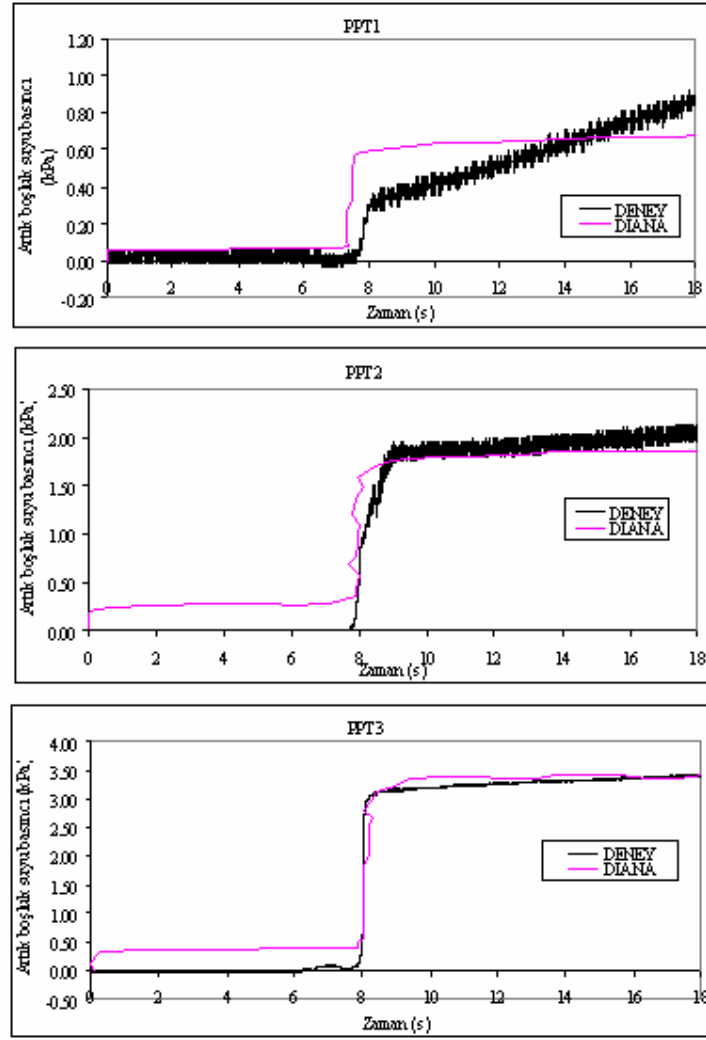
Şekil Ek 3.8 U3-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



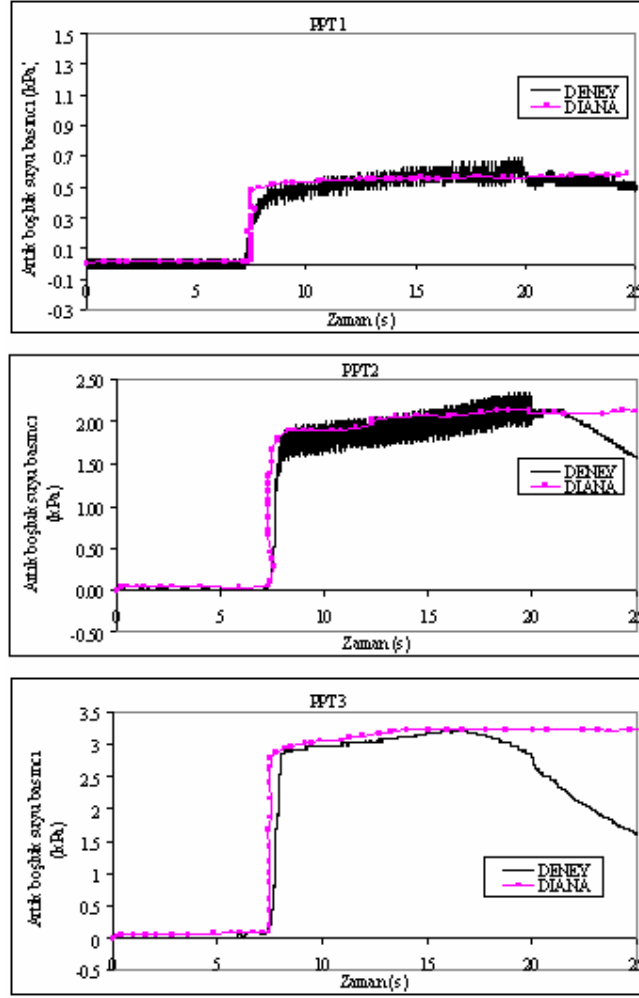
Şekil Ek 3.9 U4-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



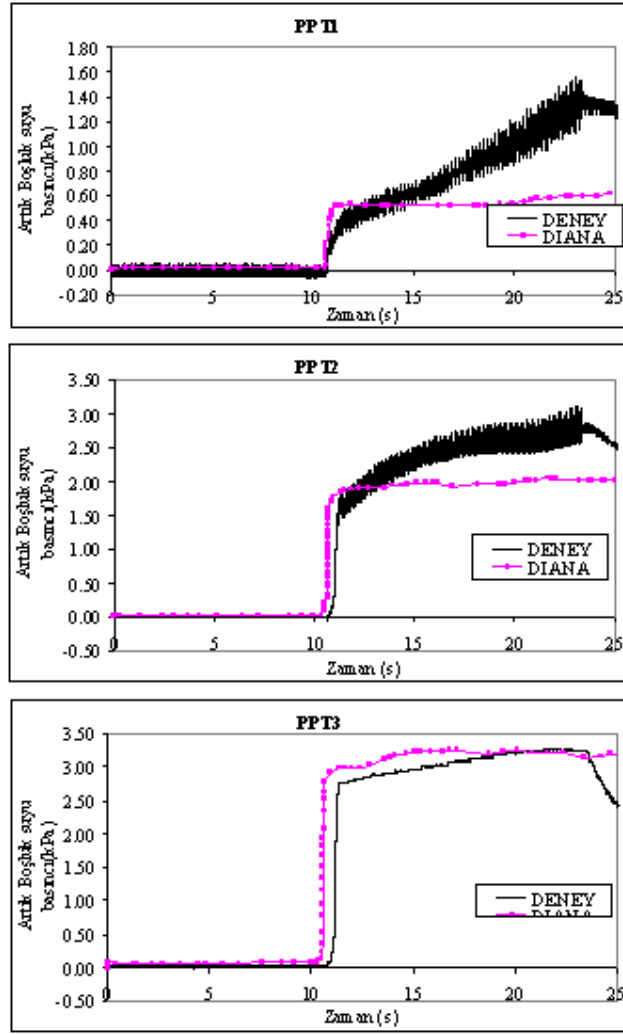
Şekil Ek 3.10 U4-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



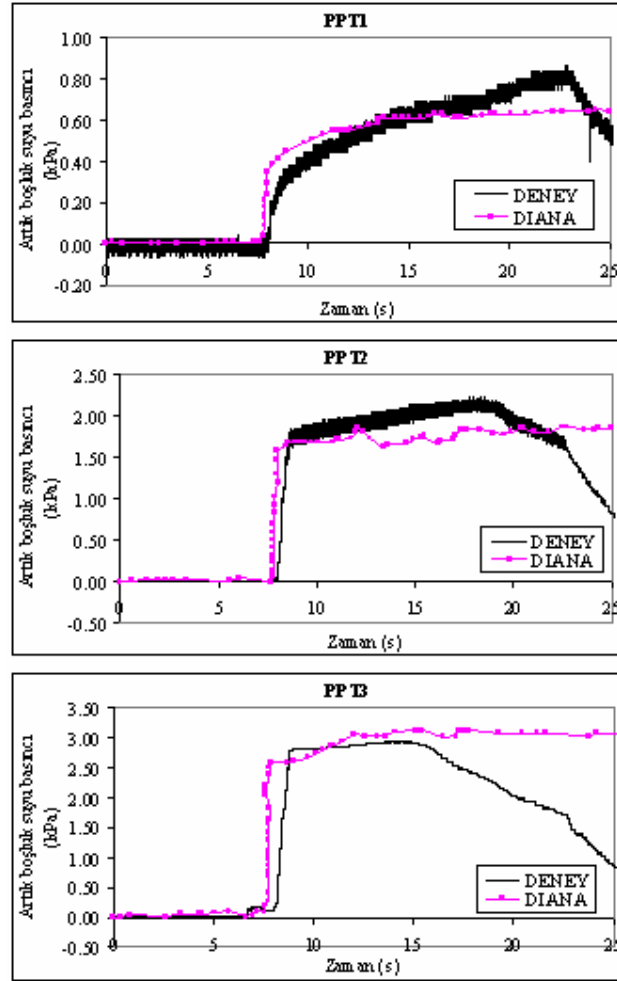
Şekil Ek 3.11 U4-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



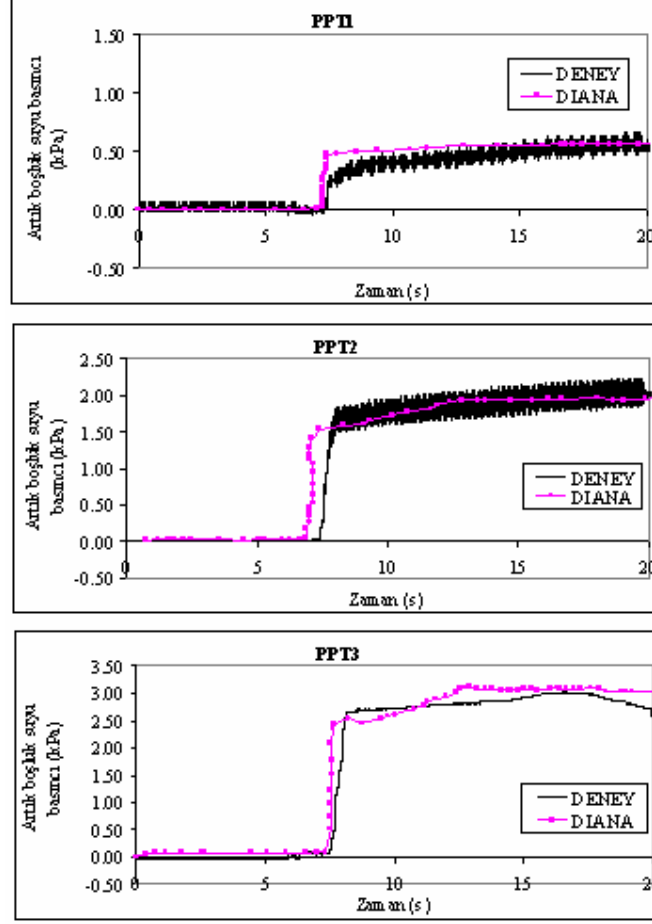
Şekil Ek 3.12 L1-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



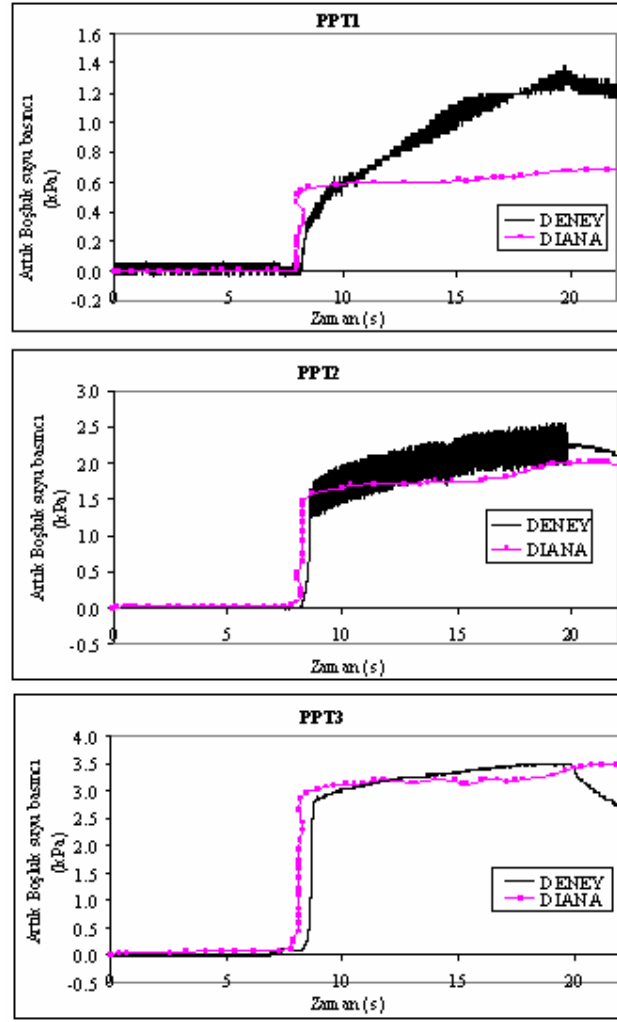
Şekil Ek 3.13 L1-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



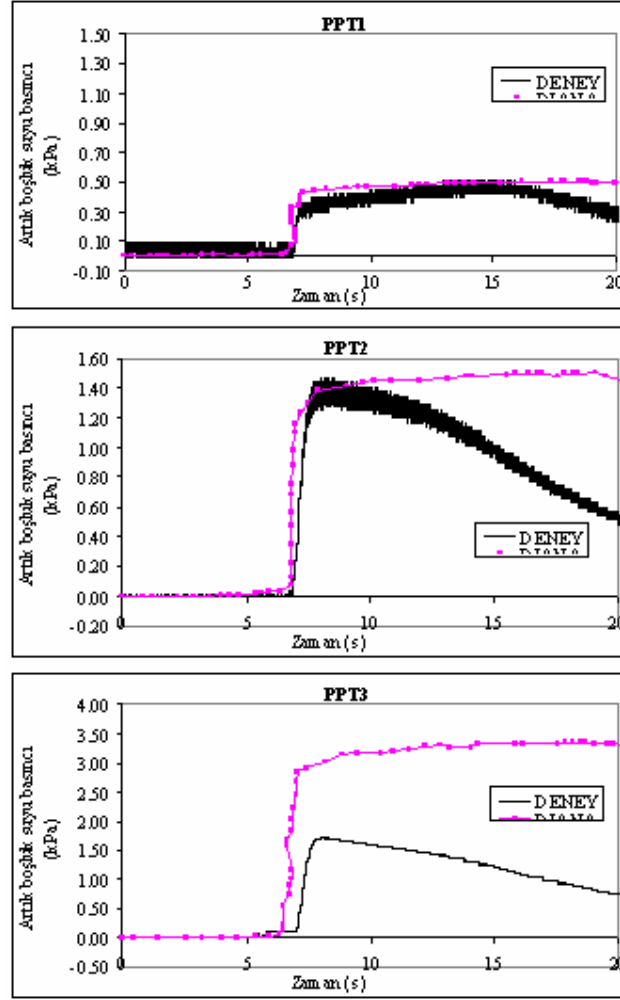
Şekil Ek 3.14 L2-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



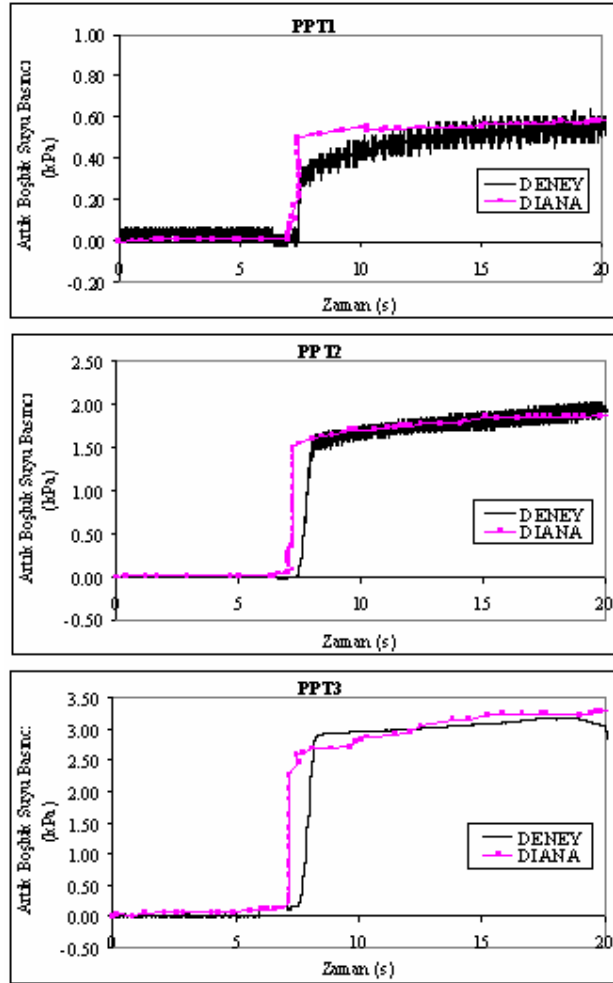
Şekil Ek 3.15 L2-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



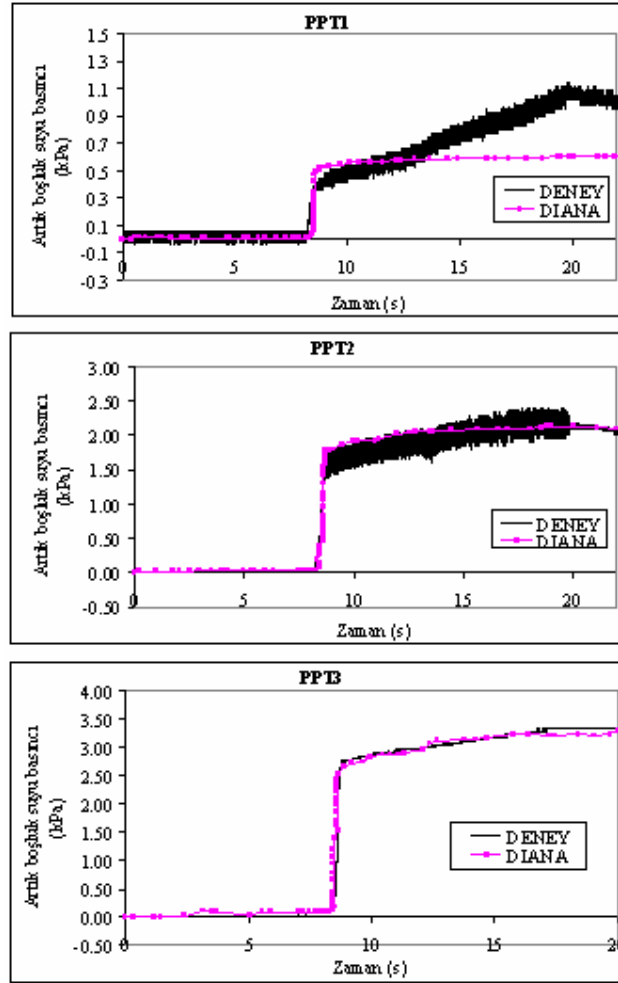
Şekil Ek 3.16 L2-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



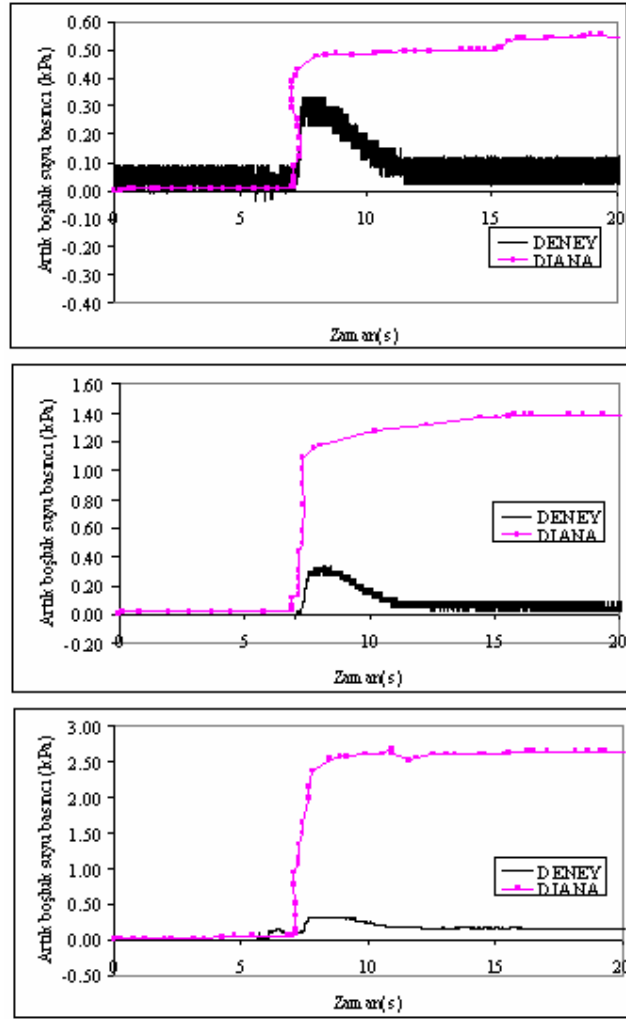
Şekil Ek 3.17 L3-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



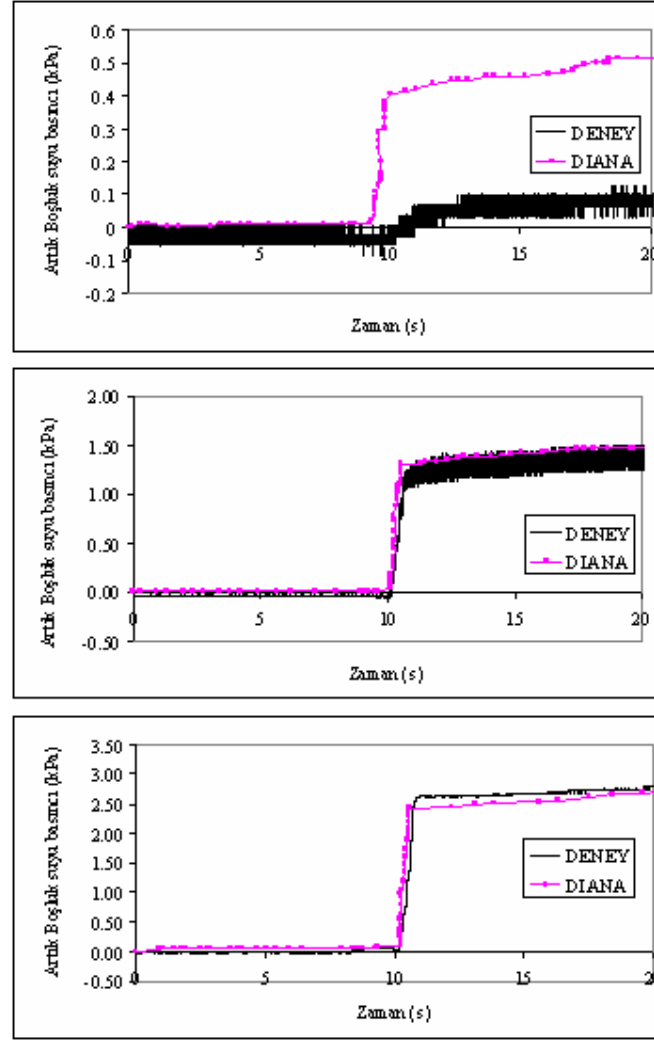
Şekil Ek 3.18 L3-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



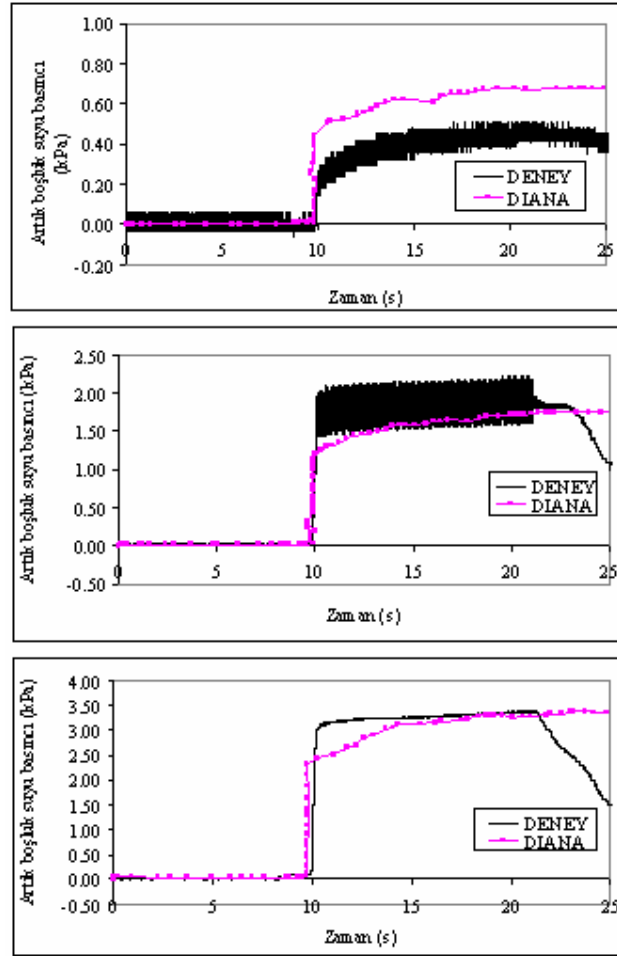
Şekil Ek 3.19 L3-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



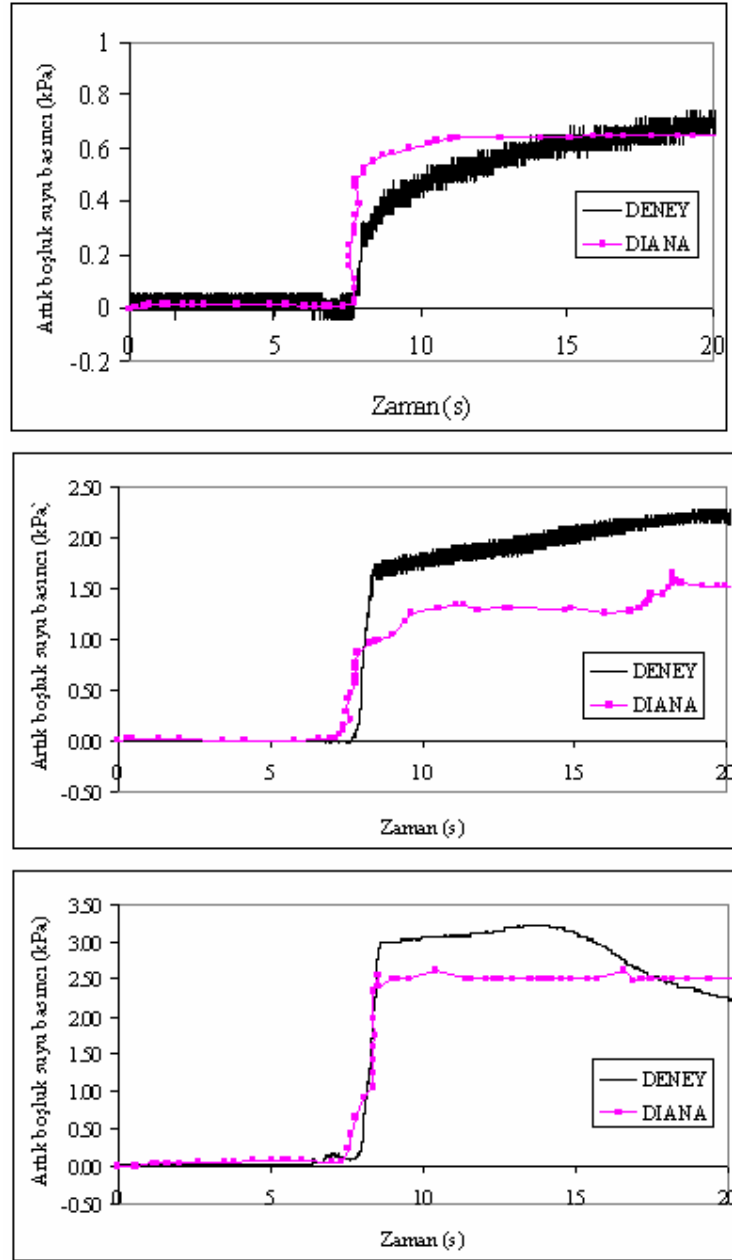
Şekil Ek 3.20 L4-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



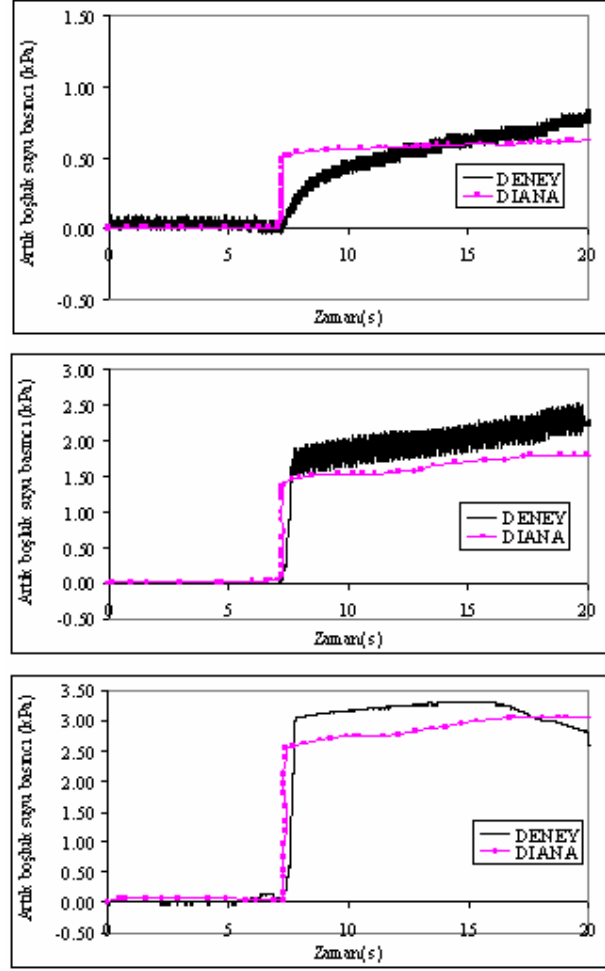
Şekil Ek 3.21 L4-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



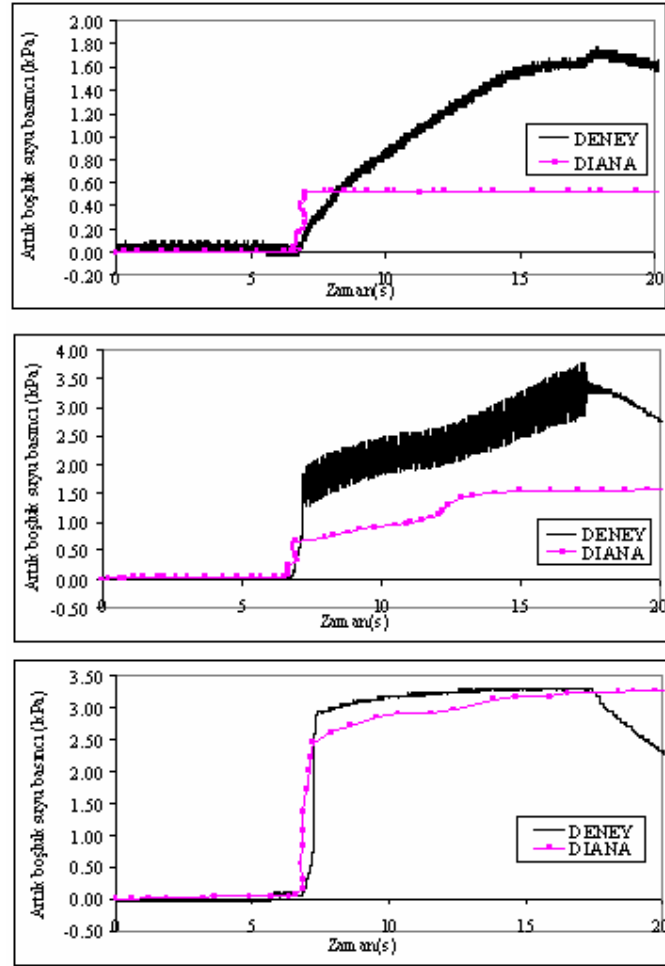
Şekil Ek 3.22 L4-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



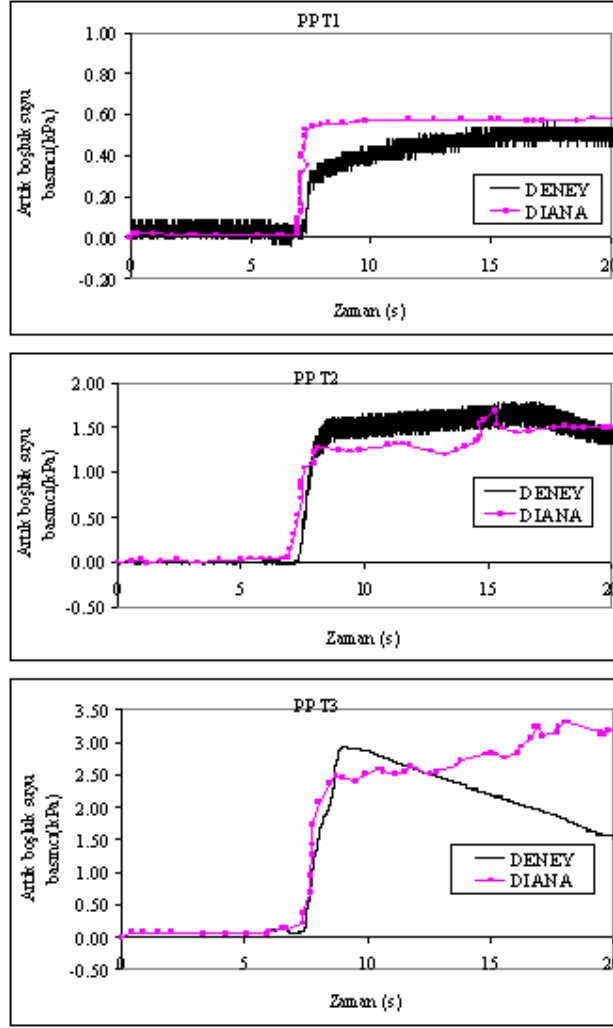
Şekil Ek 3.23 L5-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



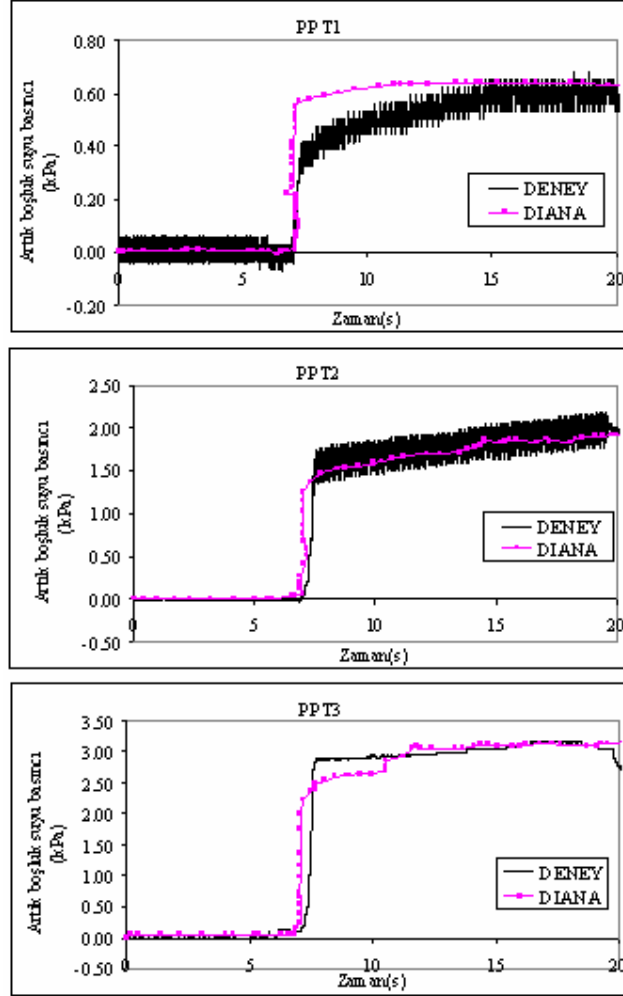
Şekil Ek 3.24 L5-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



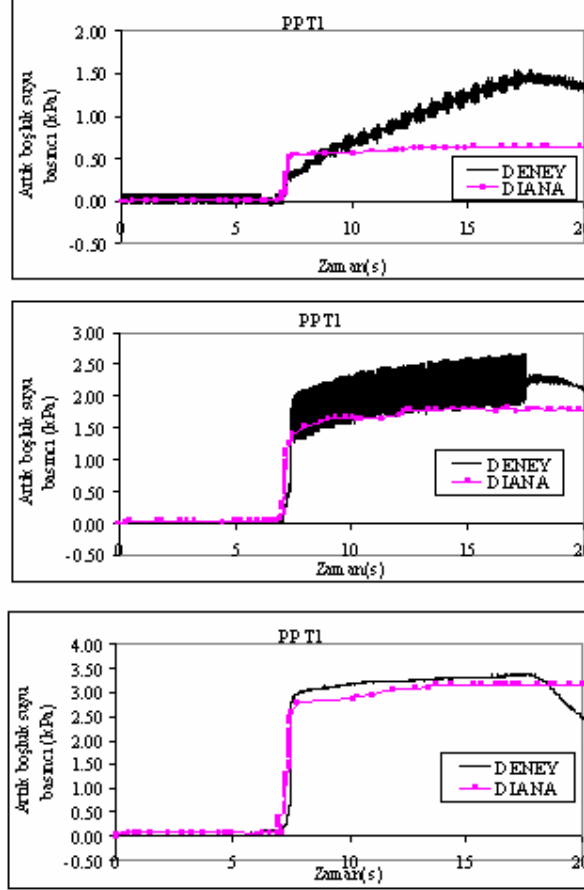
Şekil Ek 3.25 L5-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



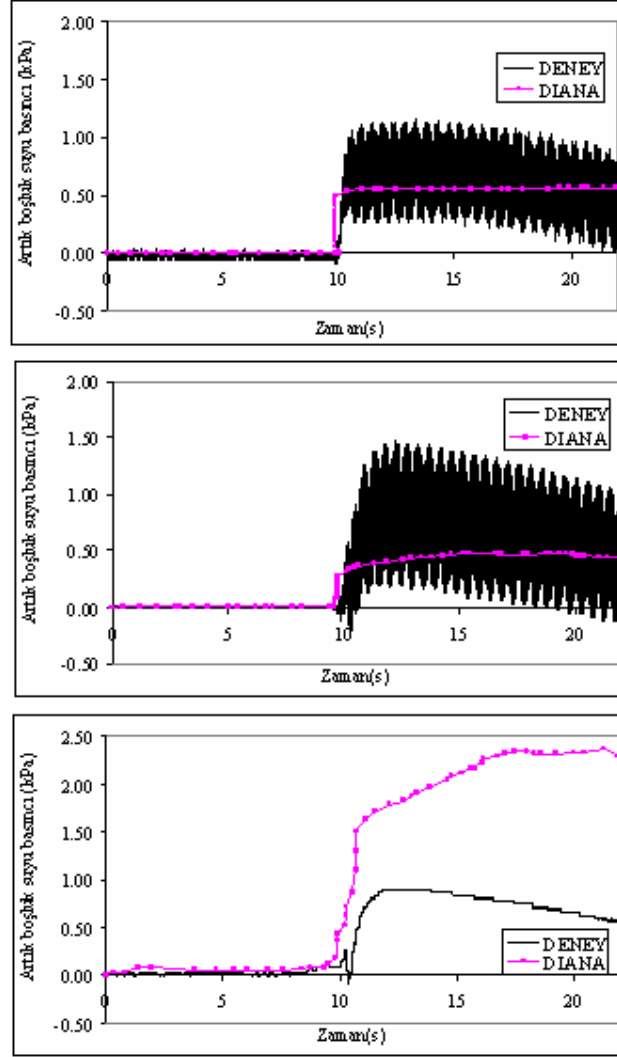
Şekil Ek 3.26 L6-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



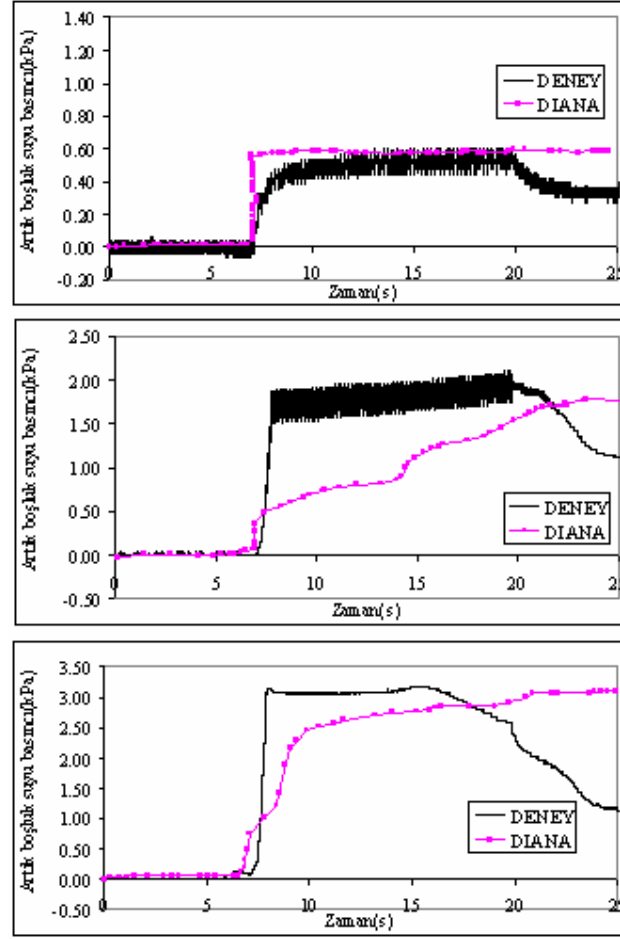
Şekil Ek 3.27 L6-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



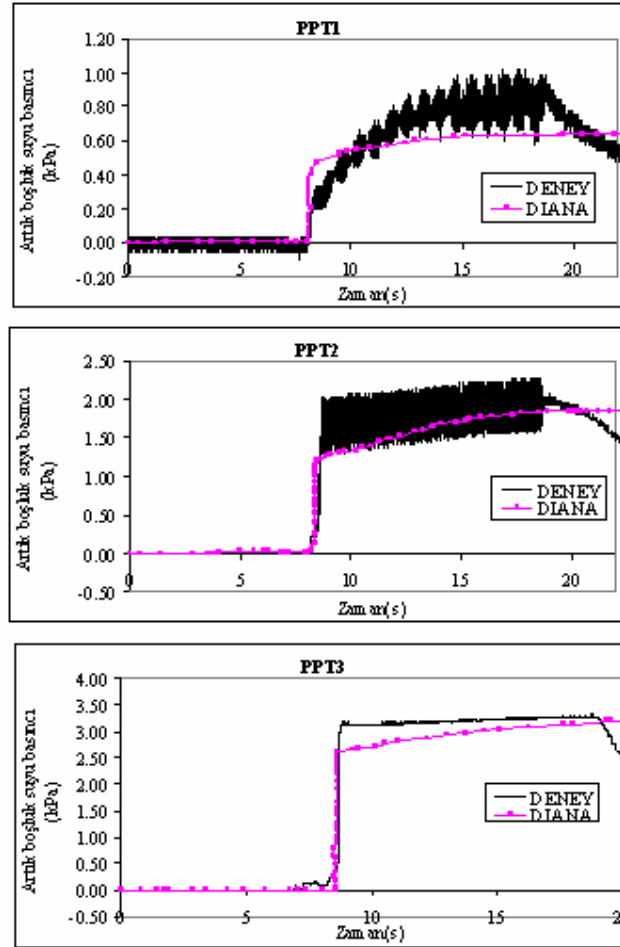
Şekil Ek 3.28 L6-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



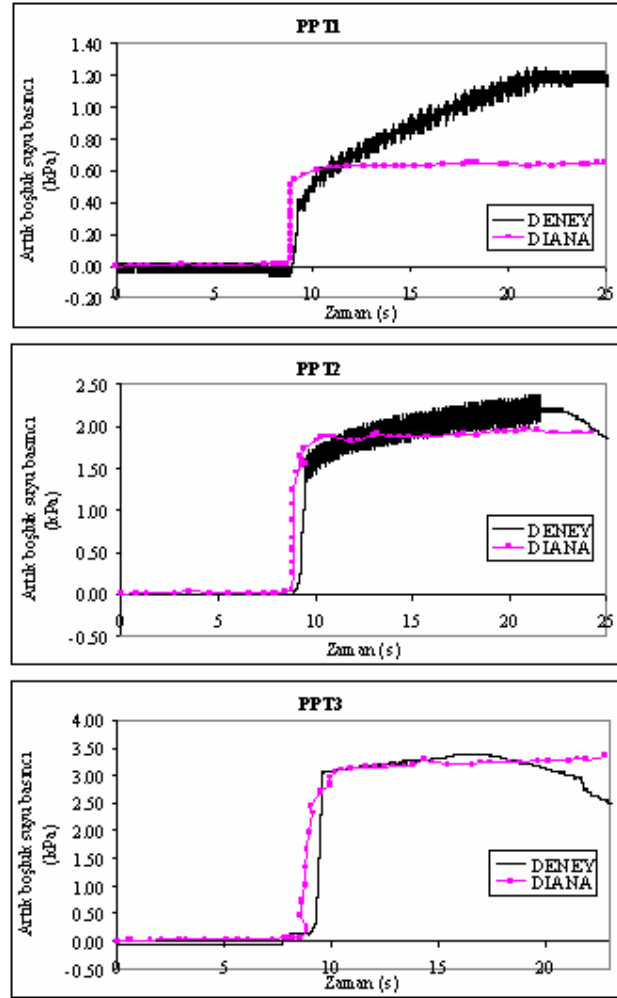
Şekil Ek 3.29 L7-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



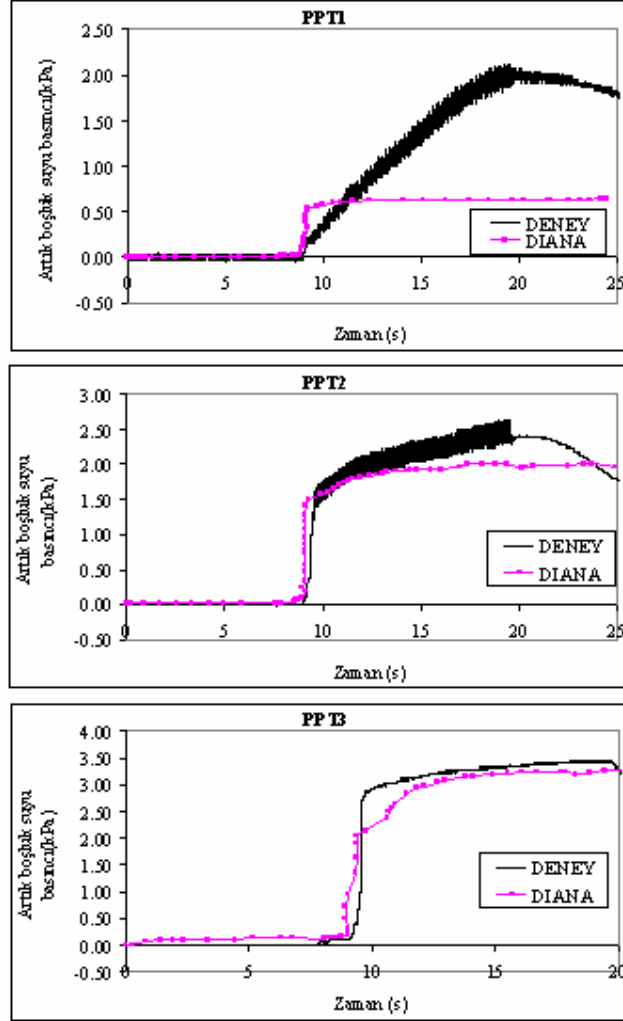
Şekil Ek 3.30 L7-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



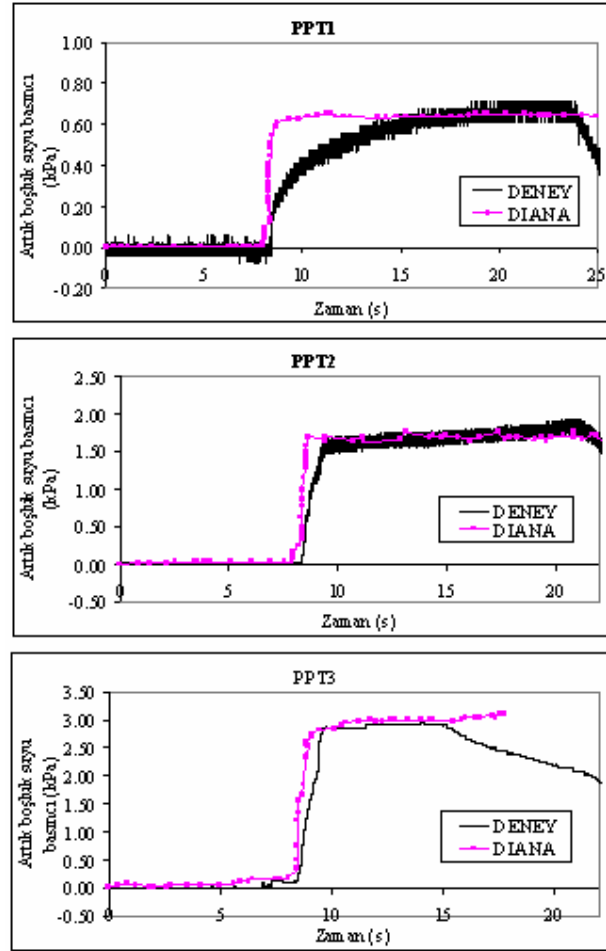
Şekil Ek 3.31 L7-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



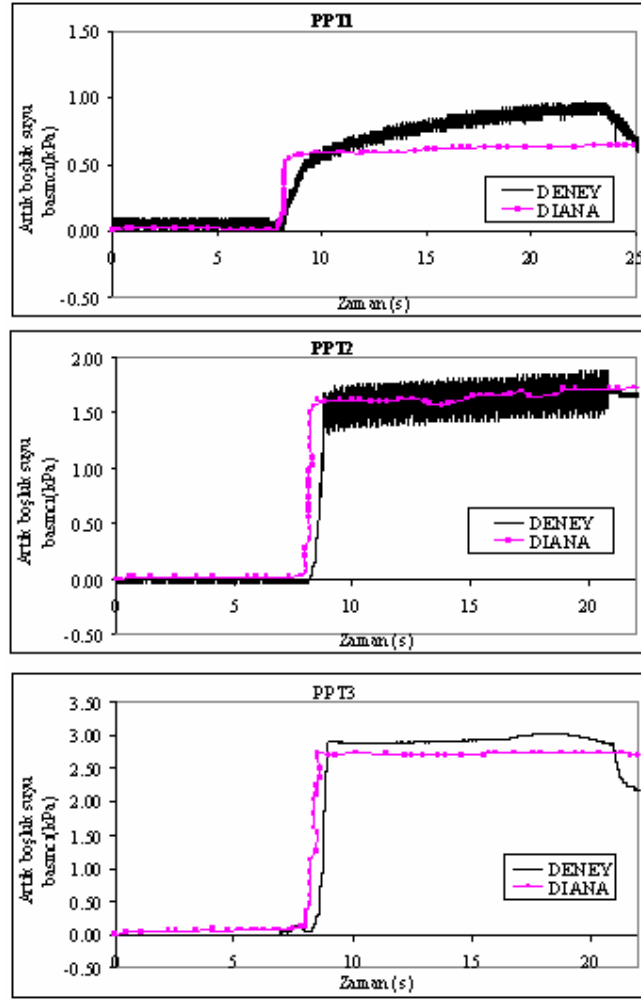
Şekil Ek 3.32 L8-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



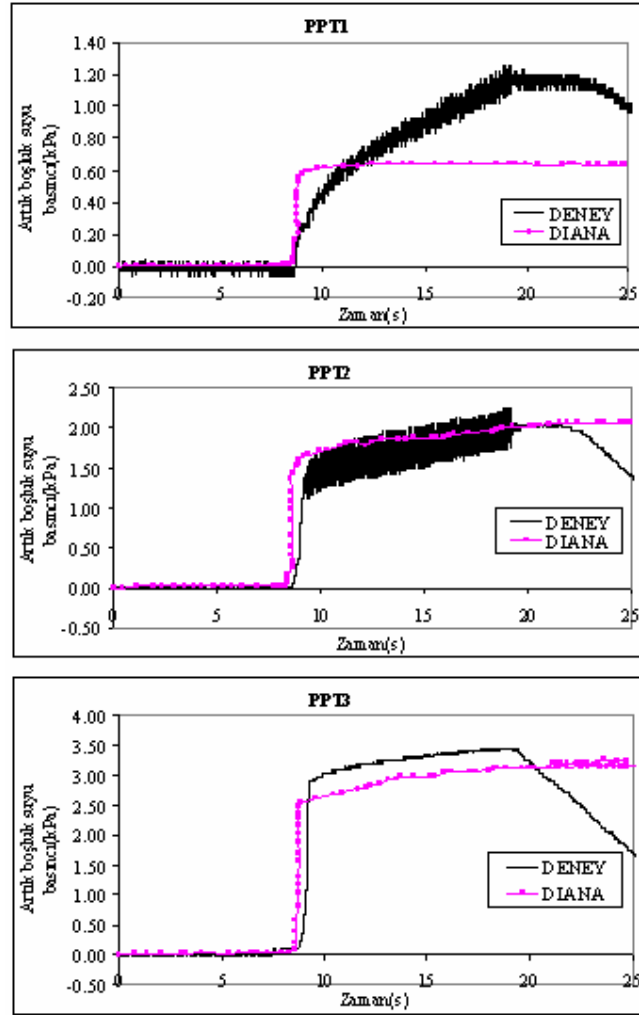
Şekil Ek 3.33 L8-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



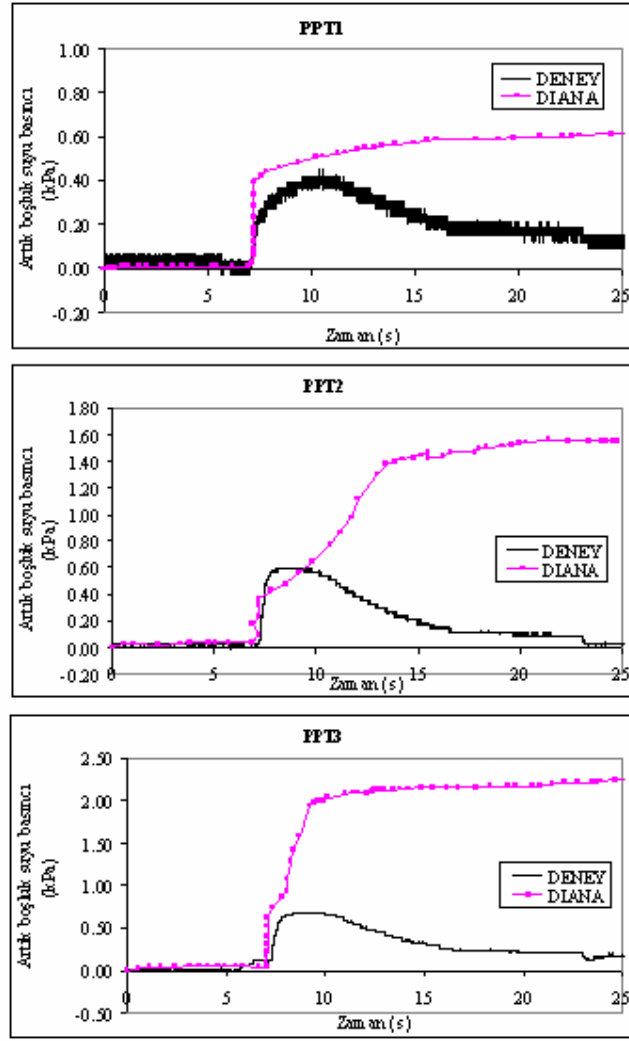
Şekil Ek 3.34 L9-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



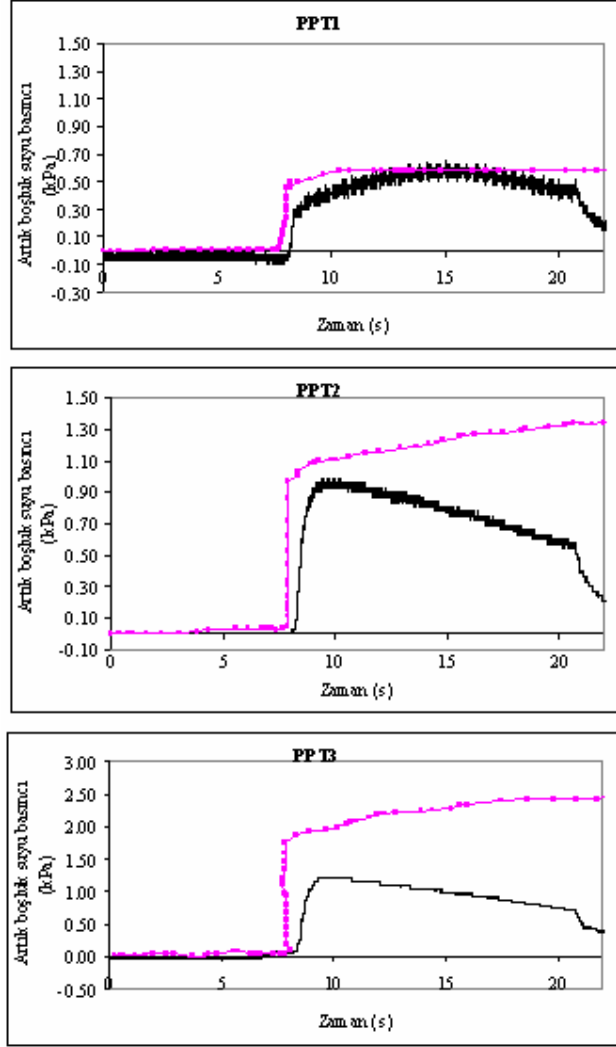
Şekil Ek 3.35 L9-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



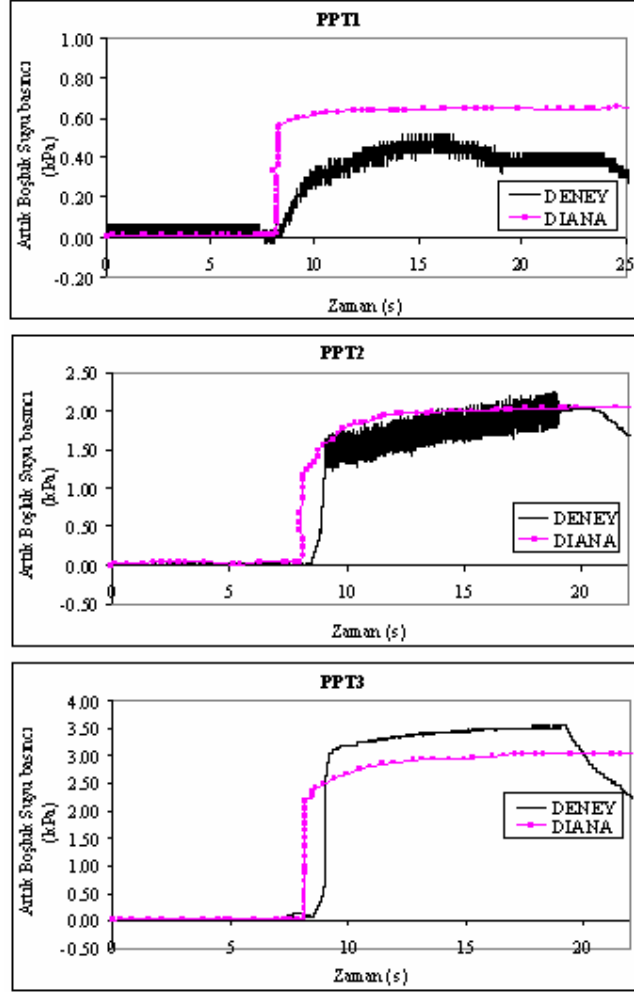
Şekil Ek 3.36 L9-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



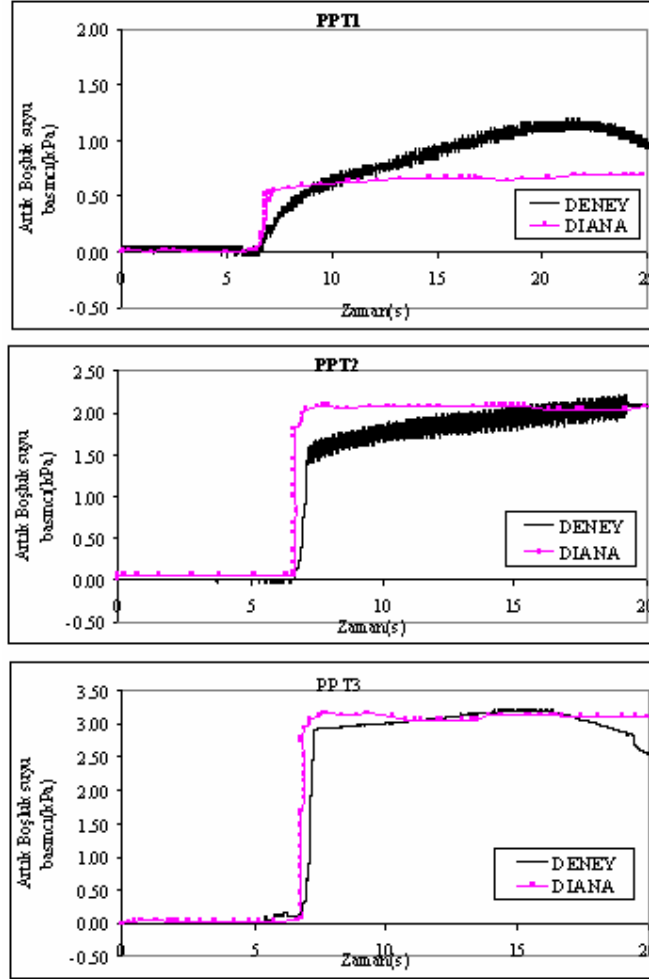
Şekil Ek 3.37 L10-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



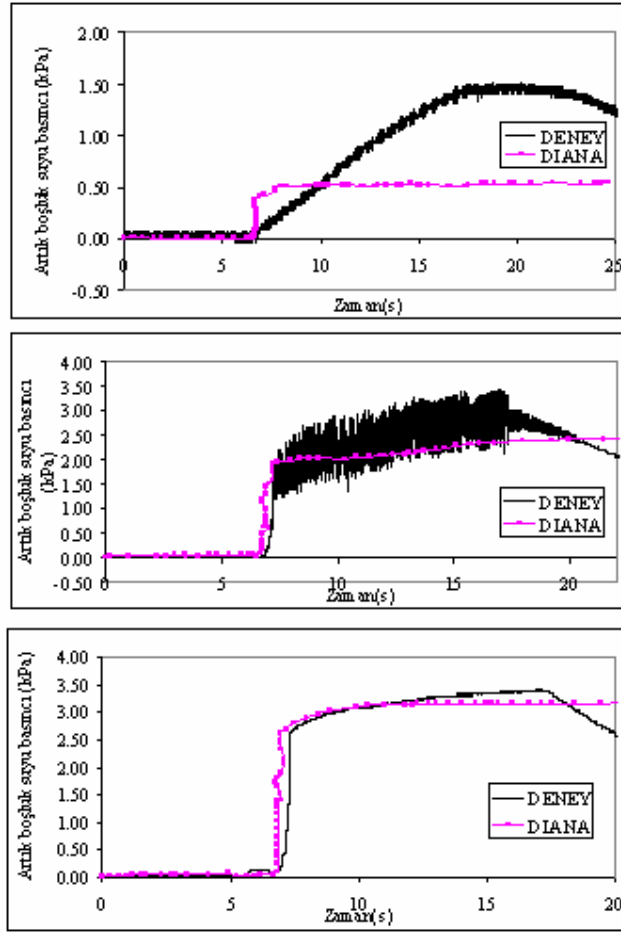
Şekil Ek 3.38 L10-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



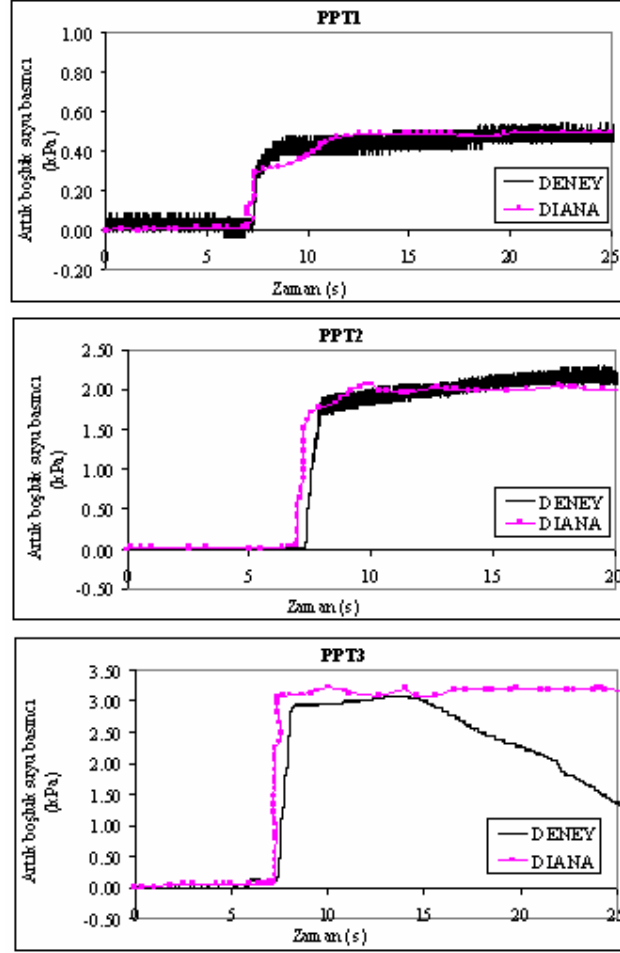
Şekil Ek 3.39 L10-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



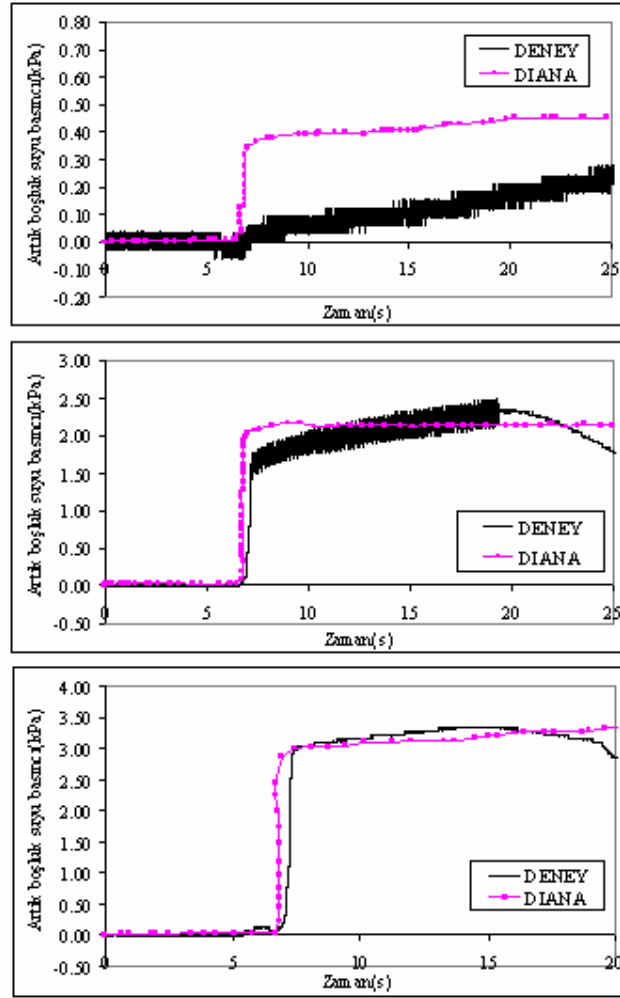
Şekil Ek 3.40 L11-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



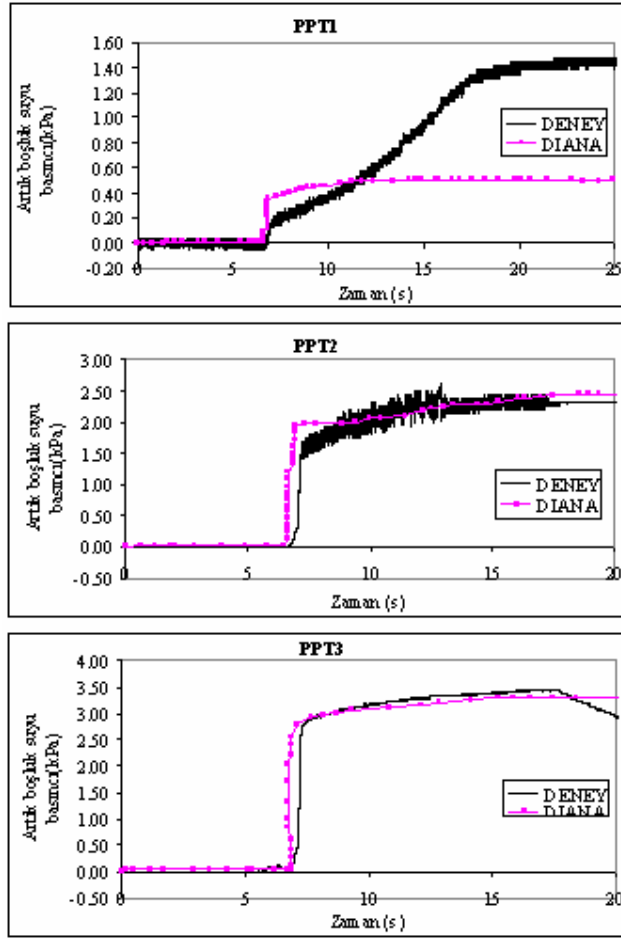
Şekil Ek 3.41 L11-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



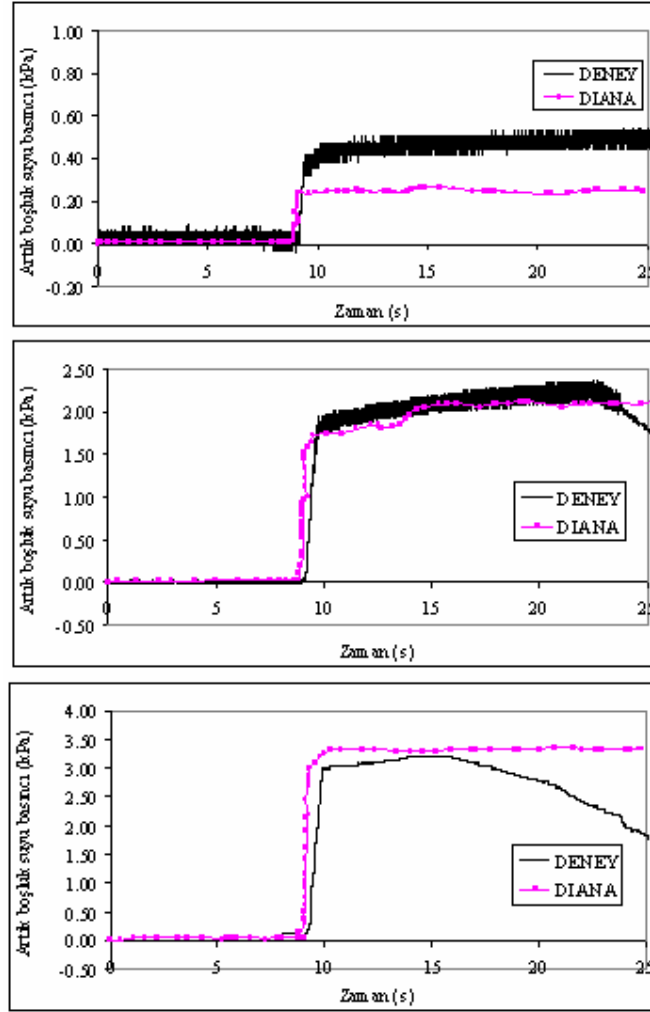
Şekil Ek 3.42 L12-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



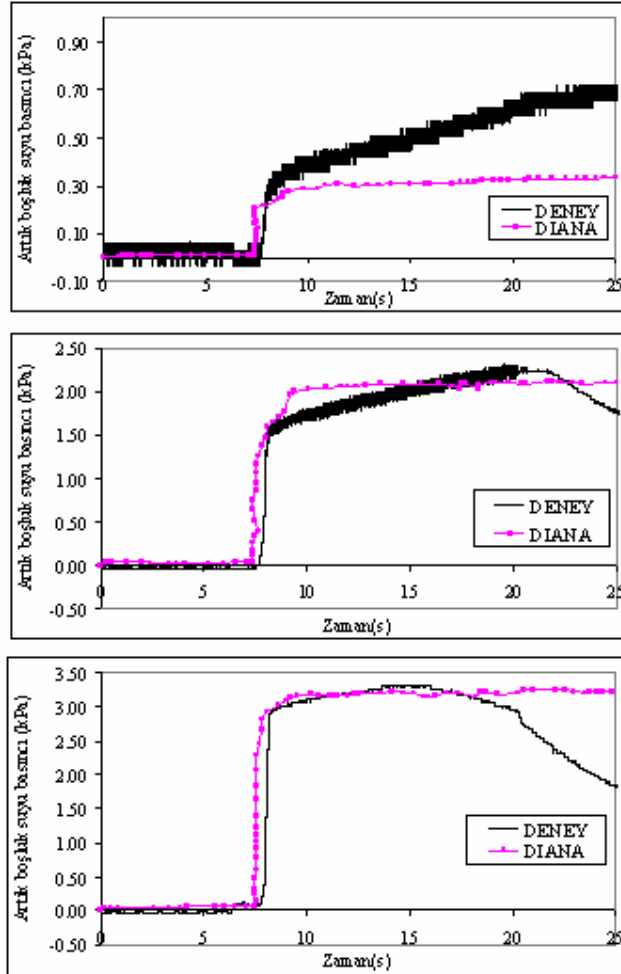
Şekil Ek 3.43 L12-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



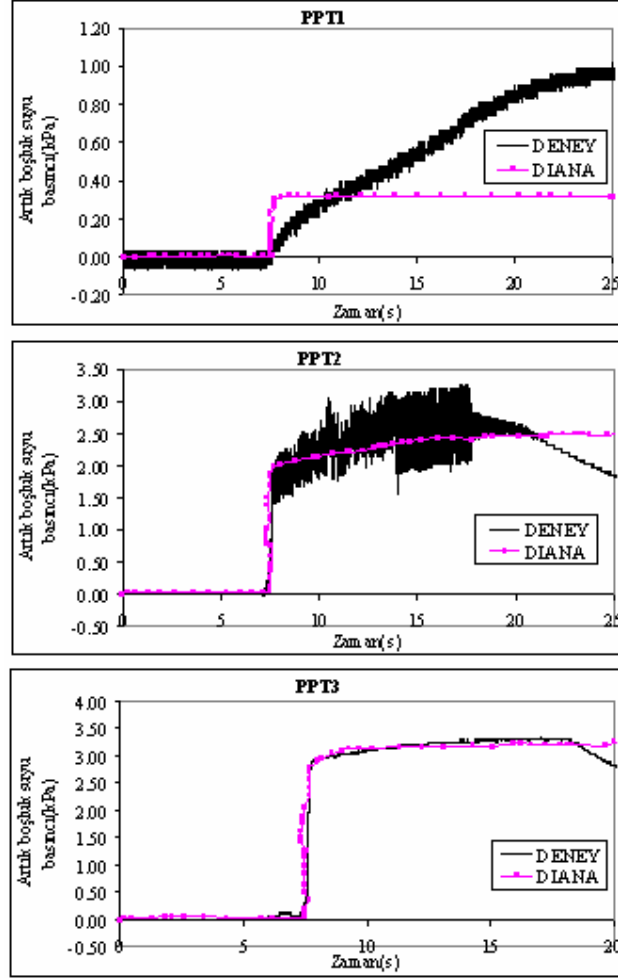
Şekil Ek 3.44 L12-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



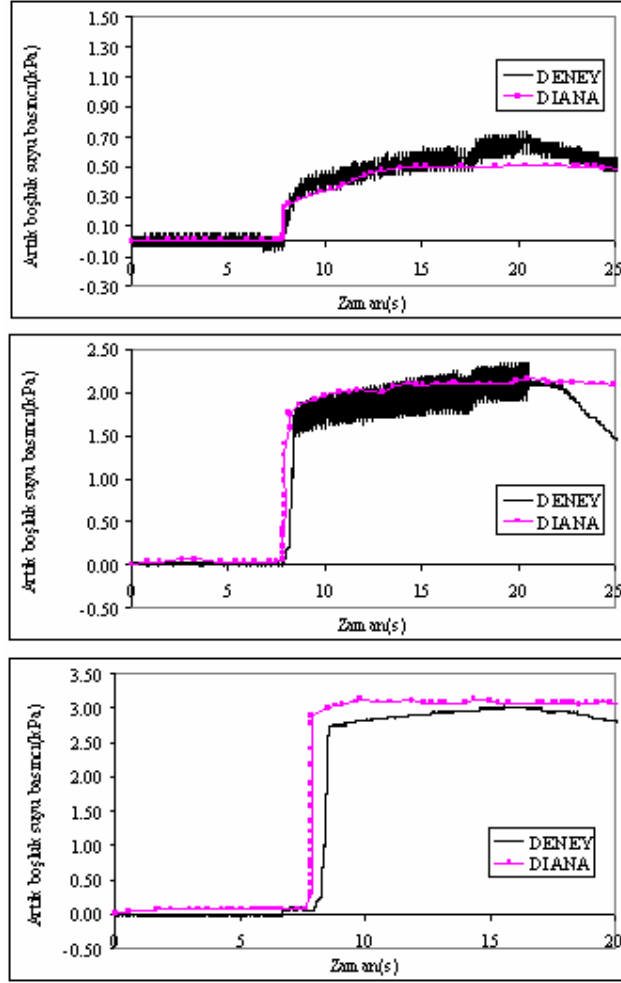
Şekil Ek 3.45 L13-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



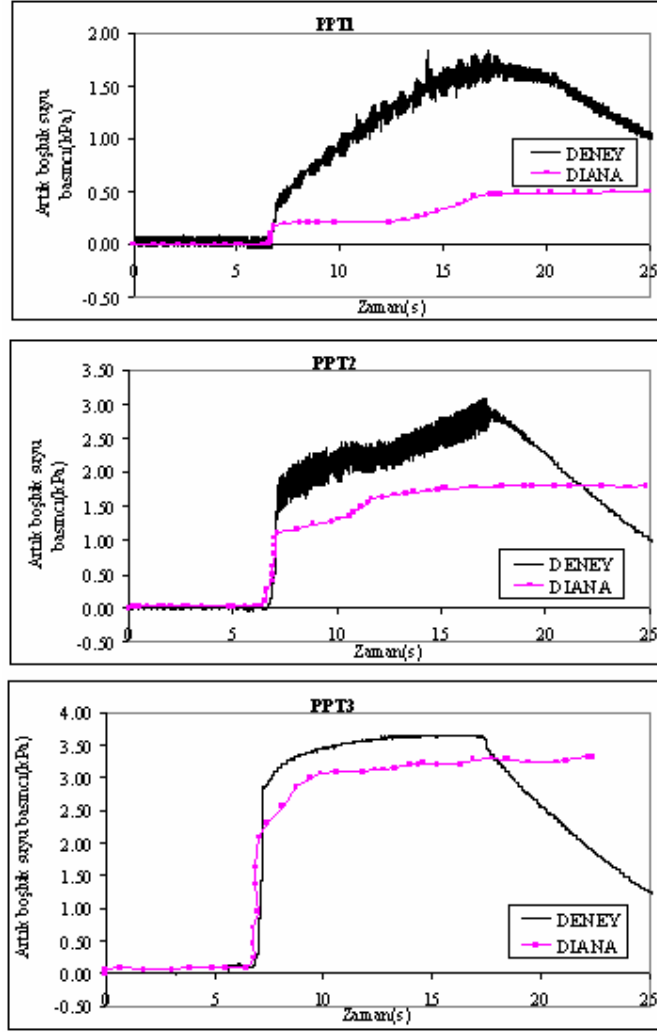
Şekil Ek 3.46 L13-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



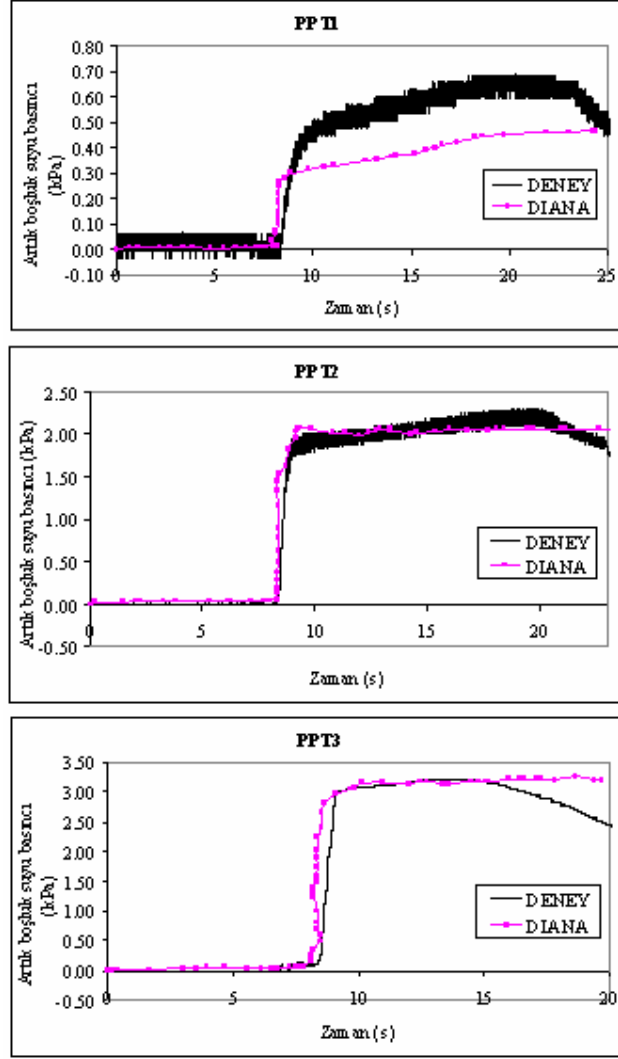
Şekil Ek 3.47 L13-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



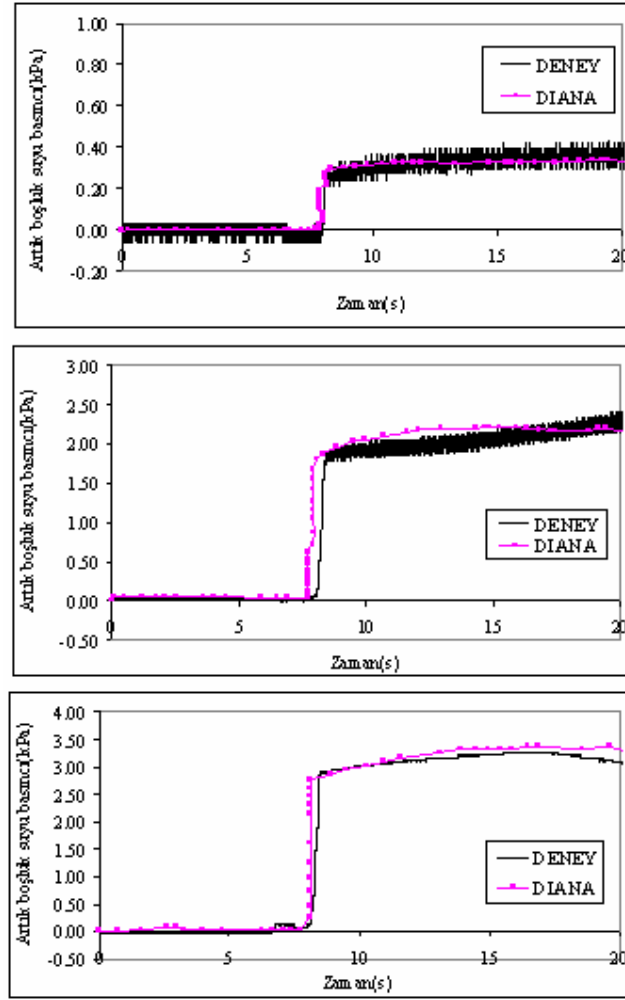
Şekil Ek 3.48 L14-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



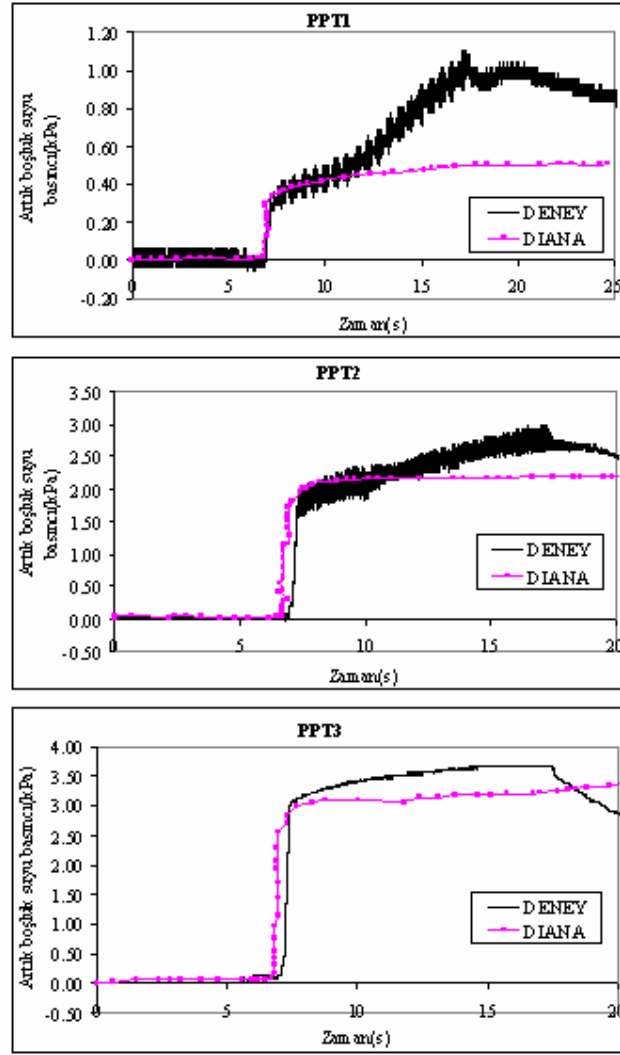
Şekil Ek 3.49 L14-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



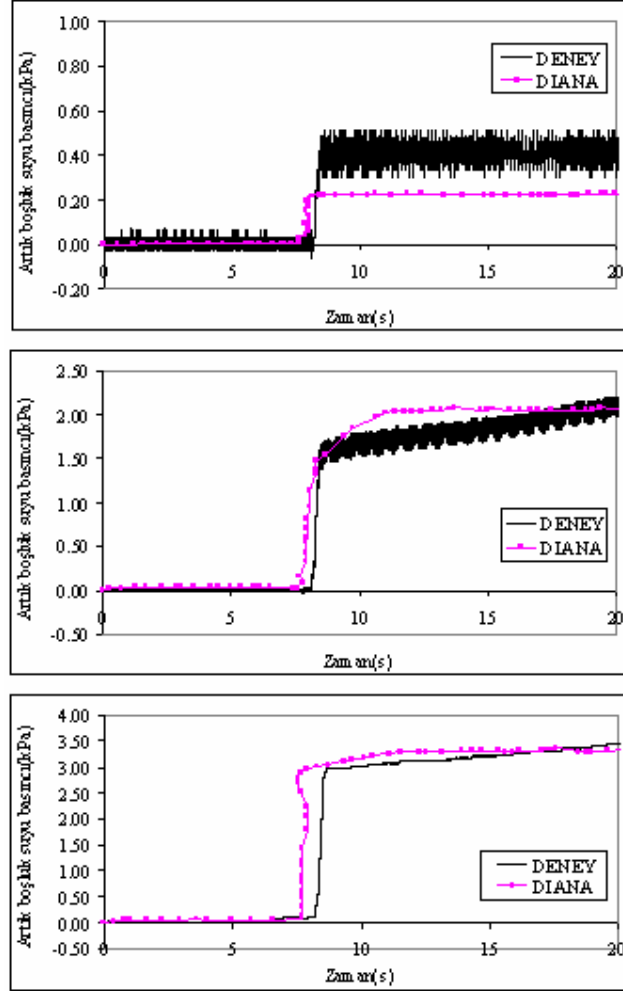
Şekil Ek 3.50 L15-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



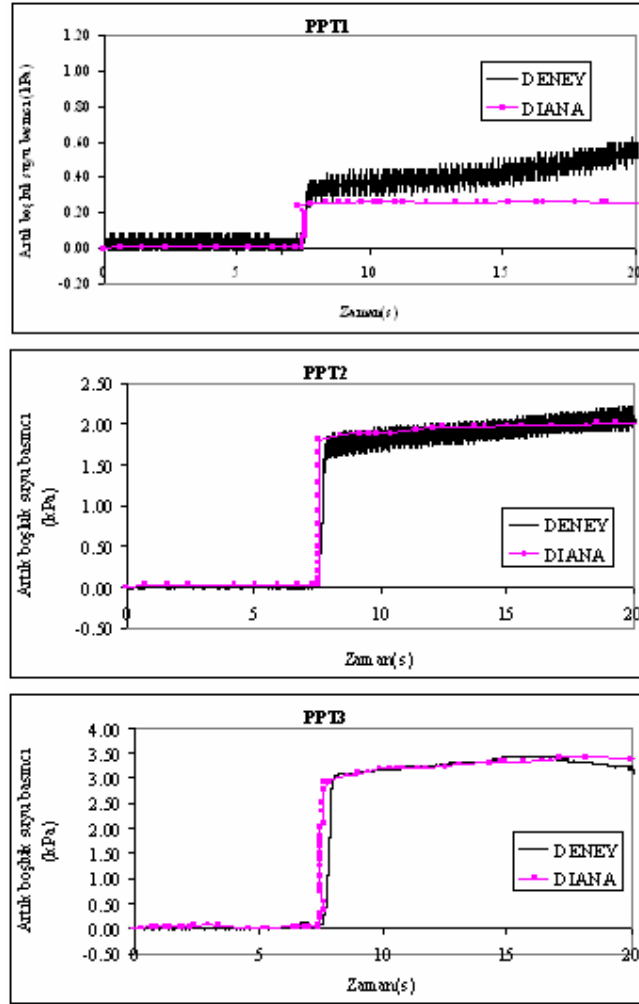
Şekil Ek 3.51 L15-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



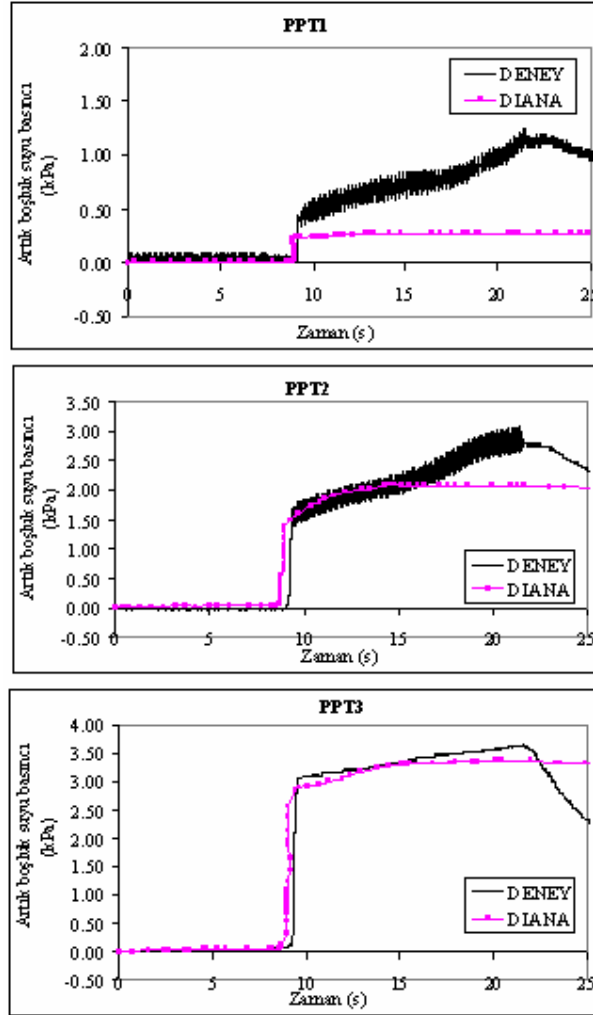
Şekil Ek 3.52 L15-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması



Şekil Ek 3.53 L16-A Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

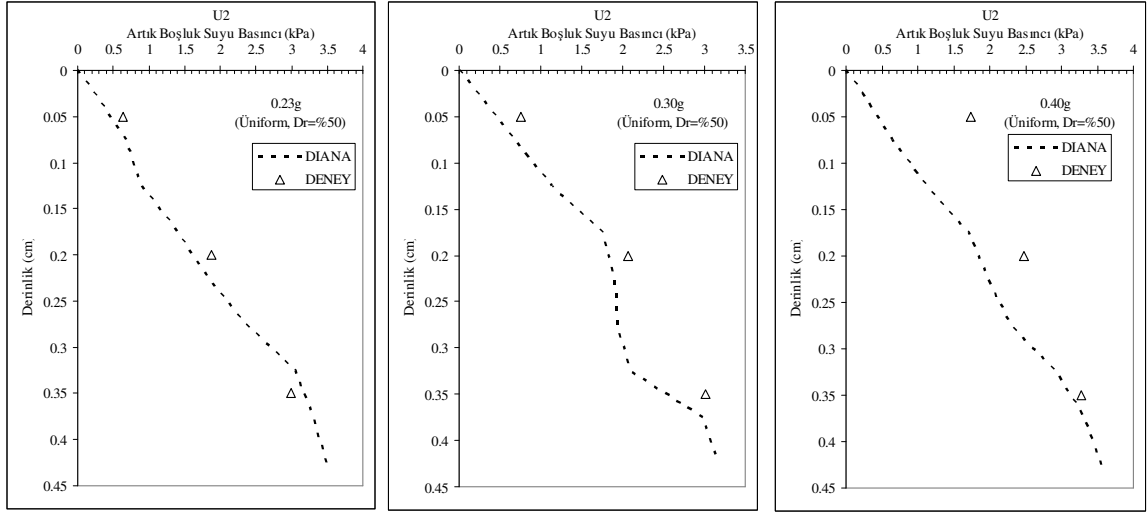


Şekil Ek 3.54 L16-B Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

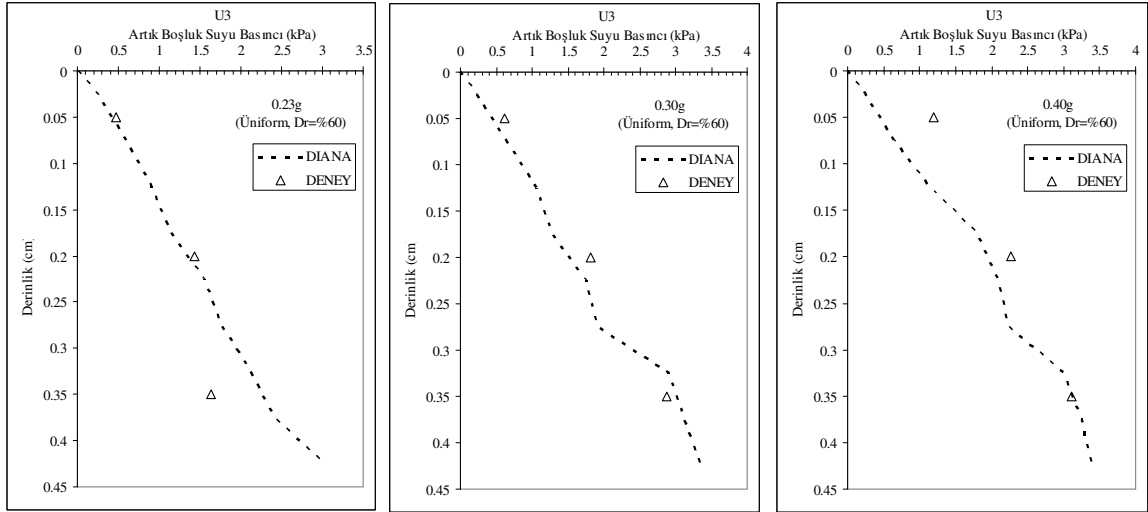


Şekil Ek 3.55 L16-C Model deneyi için nümerik analizden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen artık boşluk suyu basınçlarının karşılaştırılması

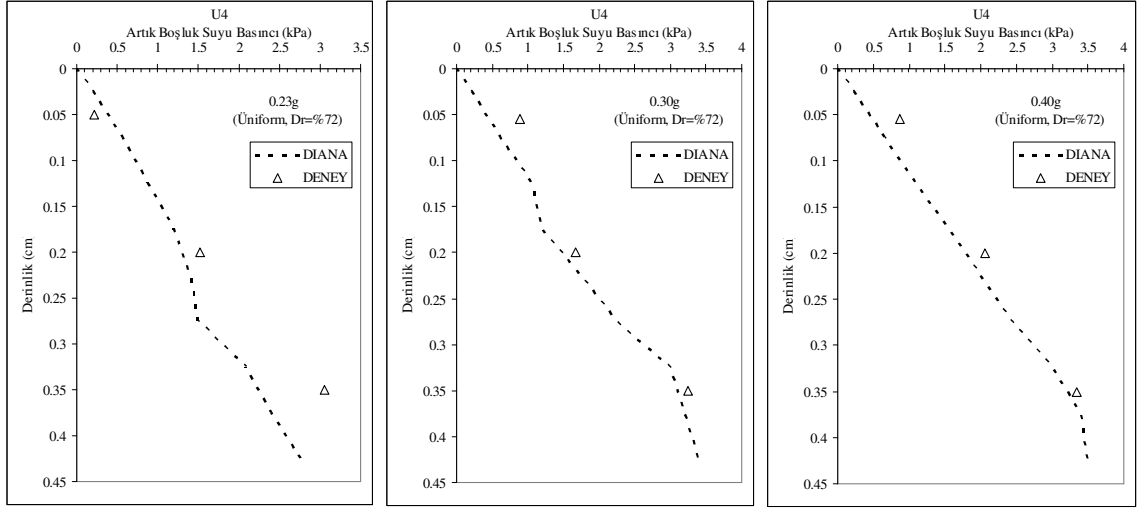
Ek 4. Maksimum Artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimleri



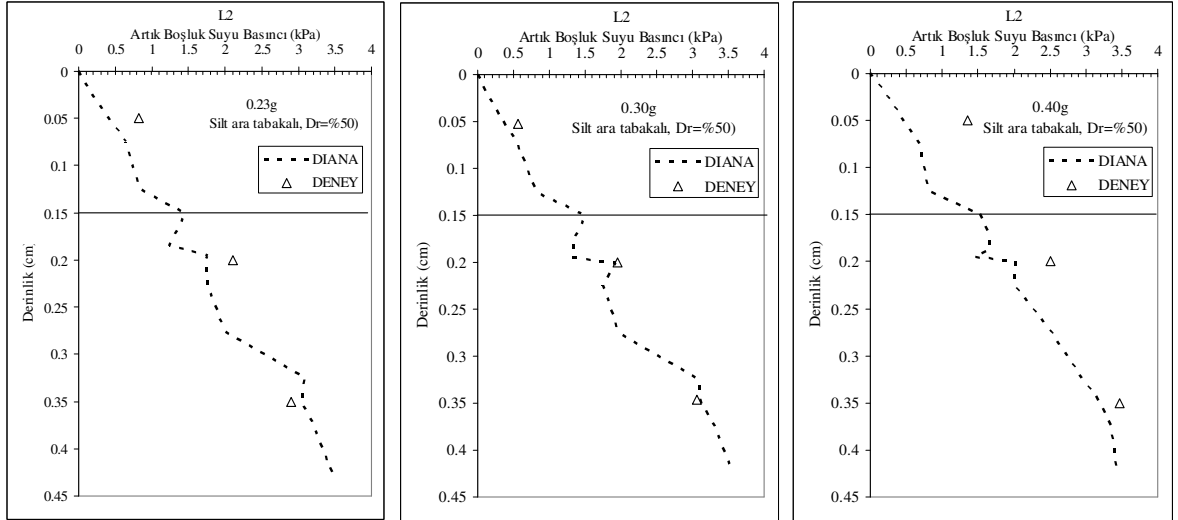
Şekil Ek 4.1 $Dr=50\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



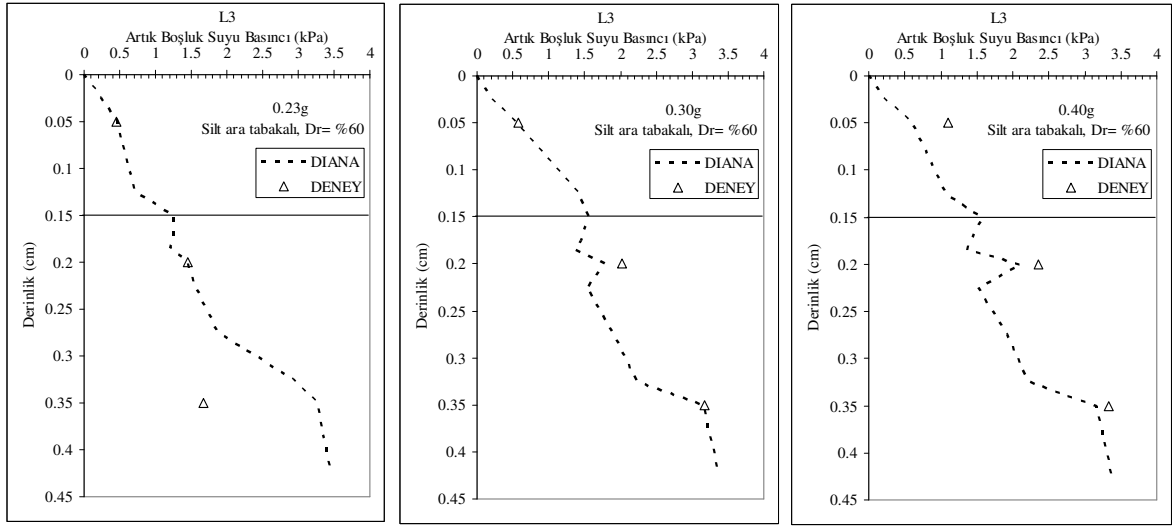
Şekil Ek 4.2 $Dr=60\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



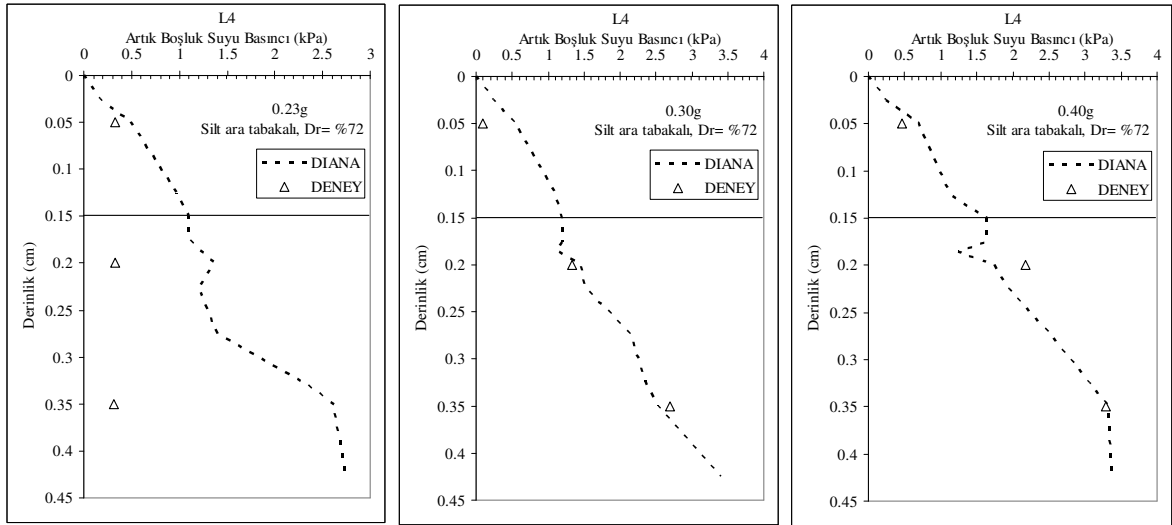
Şekil Ek 4.3 $Dr=72\%$ sıklıkta uniform kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



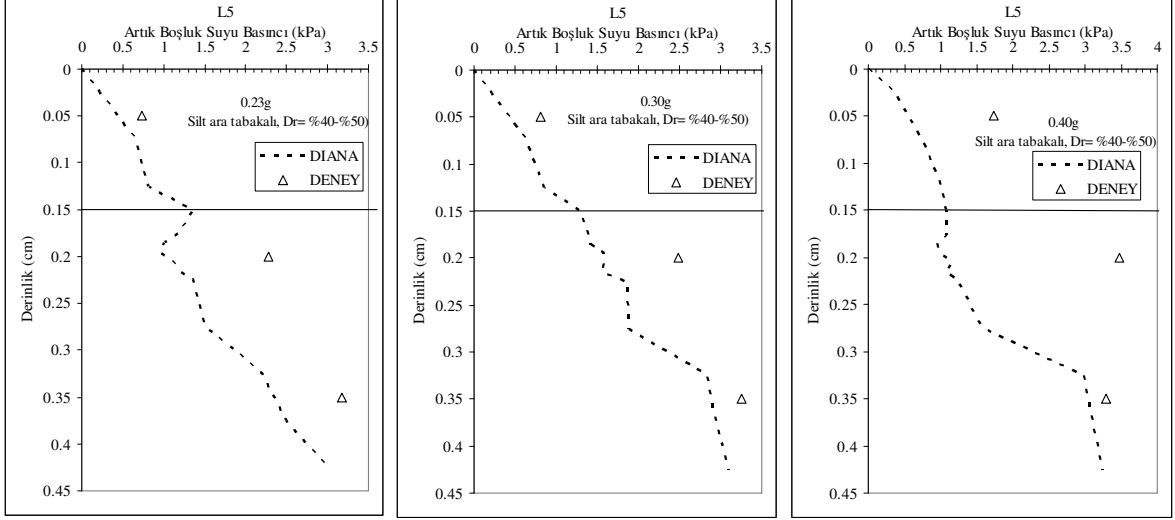
Şekil Ek 4.4 $Dr=50\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



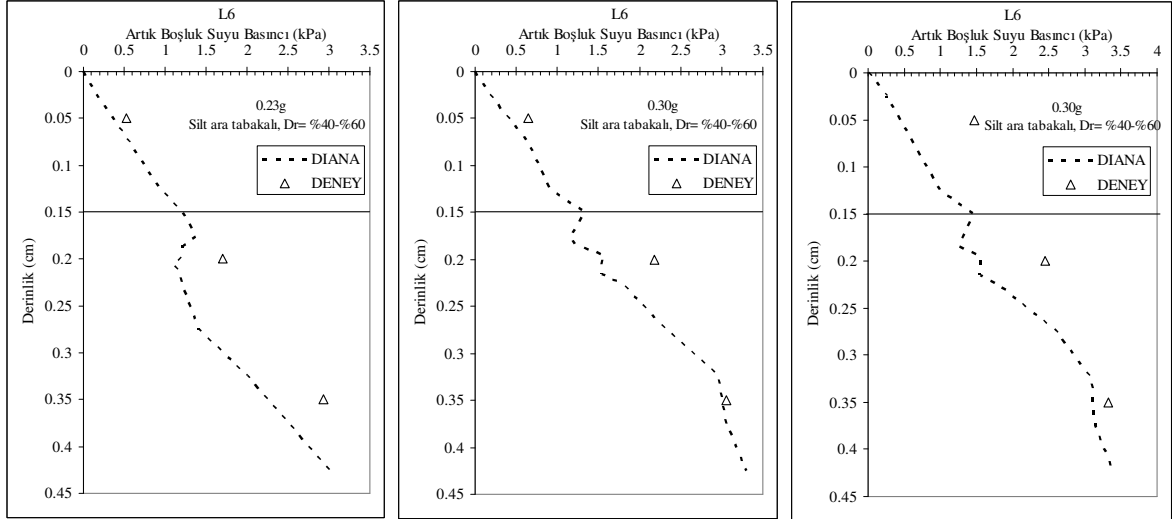
Şekil Ek 4.5 $D_r=60\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



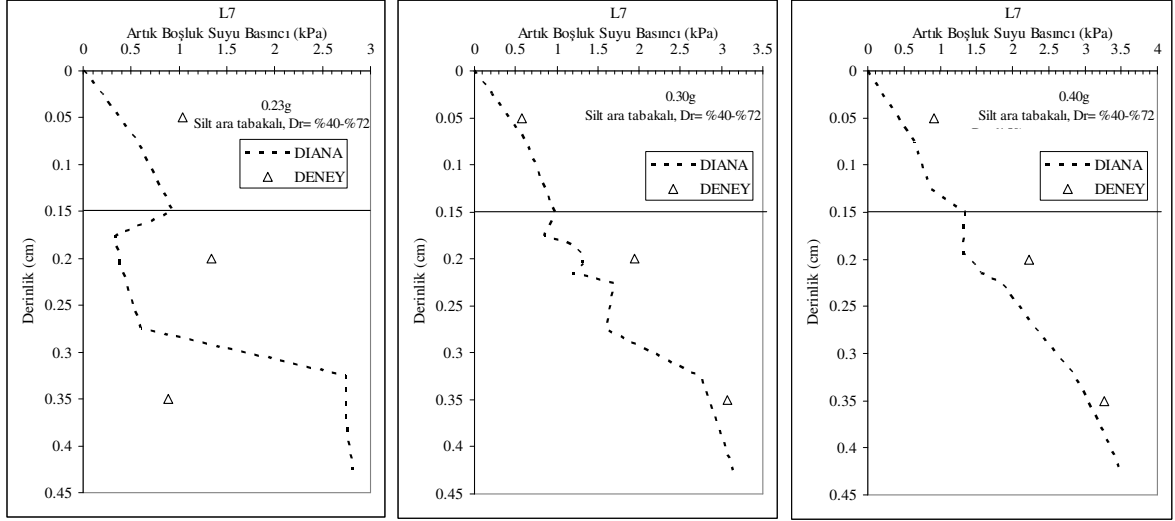
Şekil Ek 4.6 $D_r=72\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



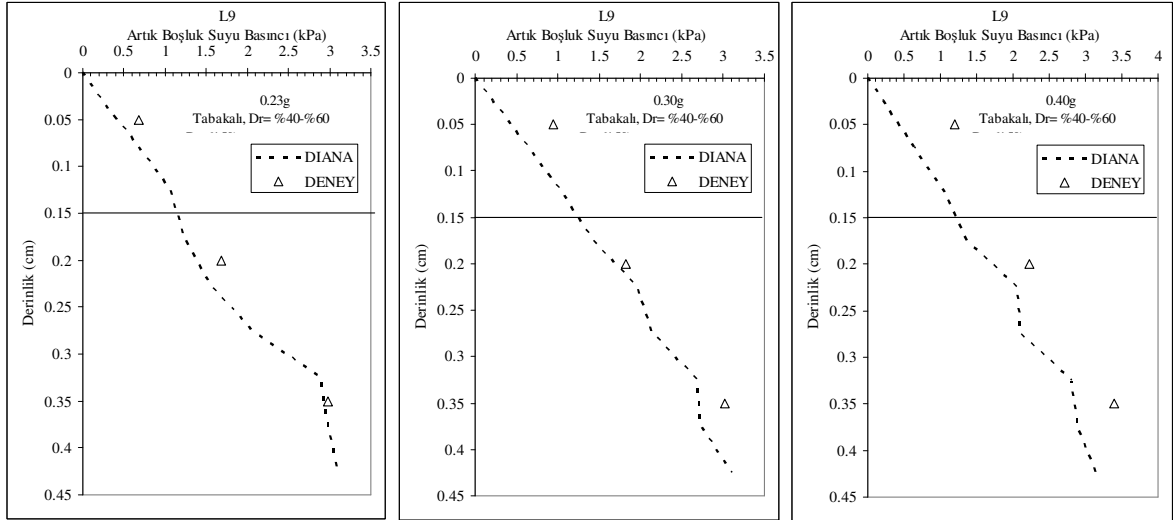
Şekil Ek 4.7 $D_r = 40\%/50\%$ sıkılıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



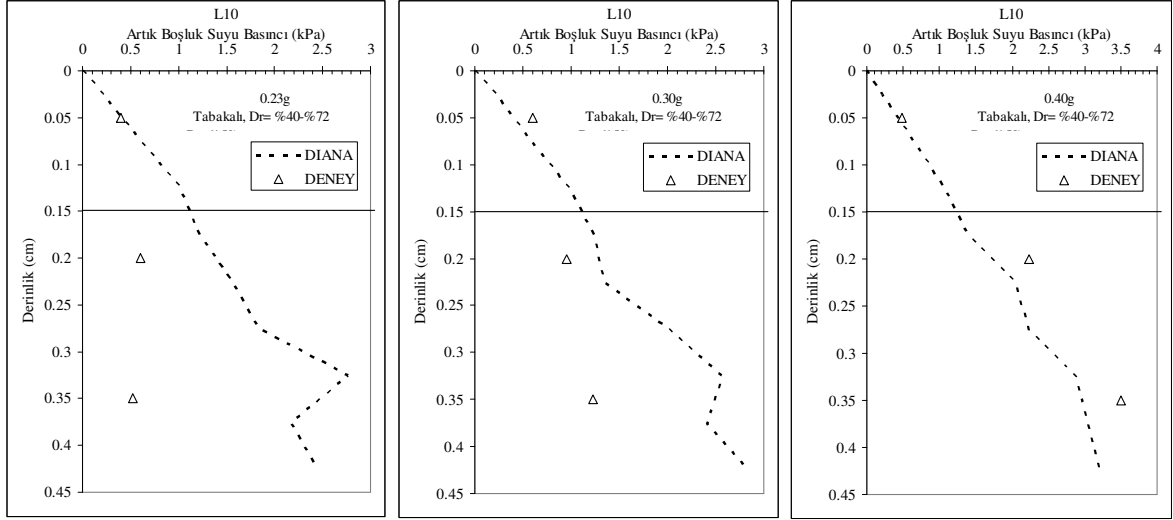
Şekil Ek 4.8 $D_r = 40\%/60\%$ sıkılıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



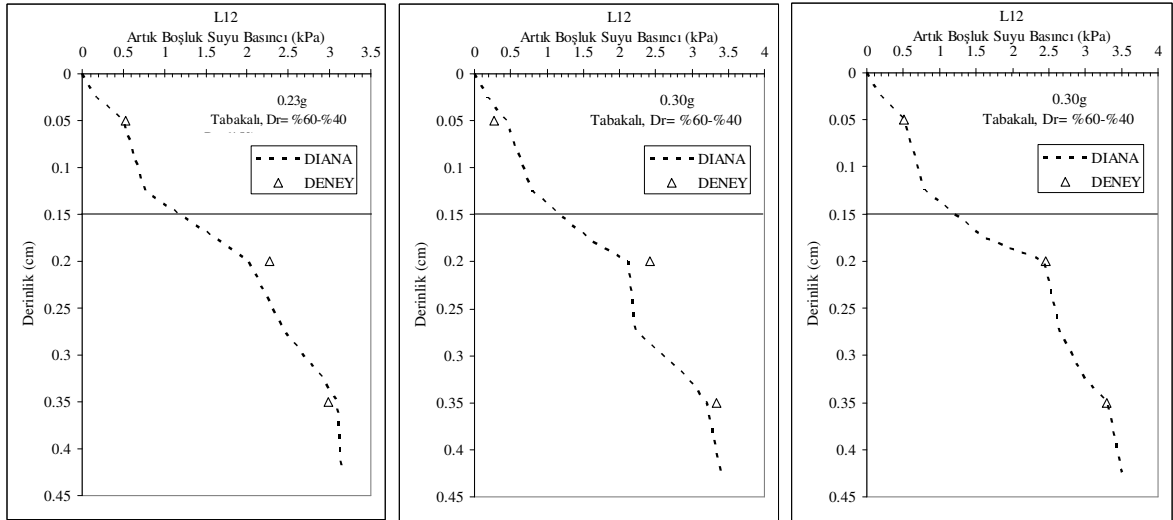
Şekil Ek 4.9 $D_r=40\%/72$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



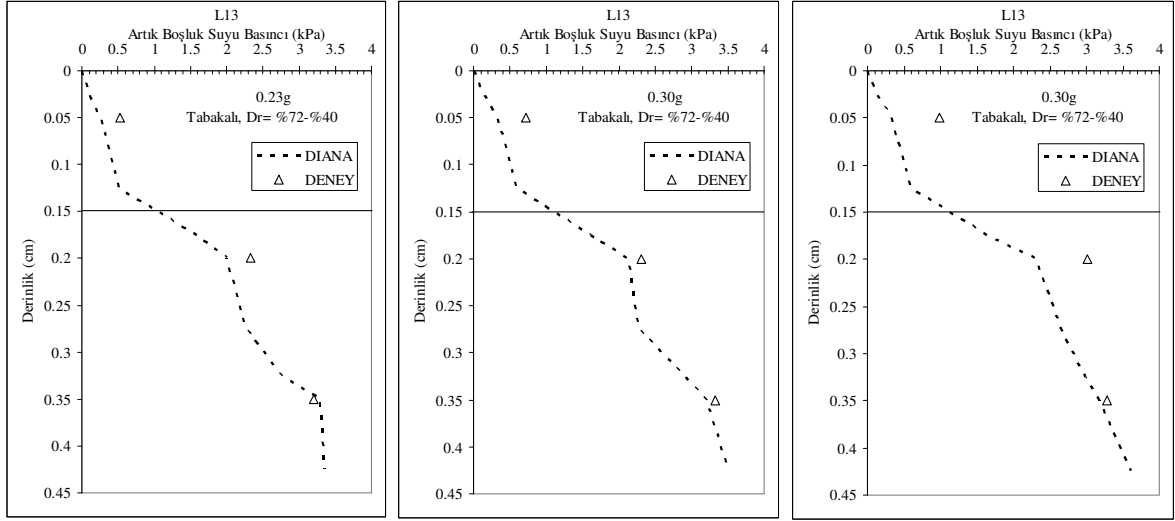
Şekil Ek 4.10 $D_r=40\%/60$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



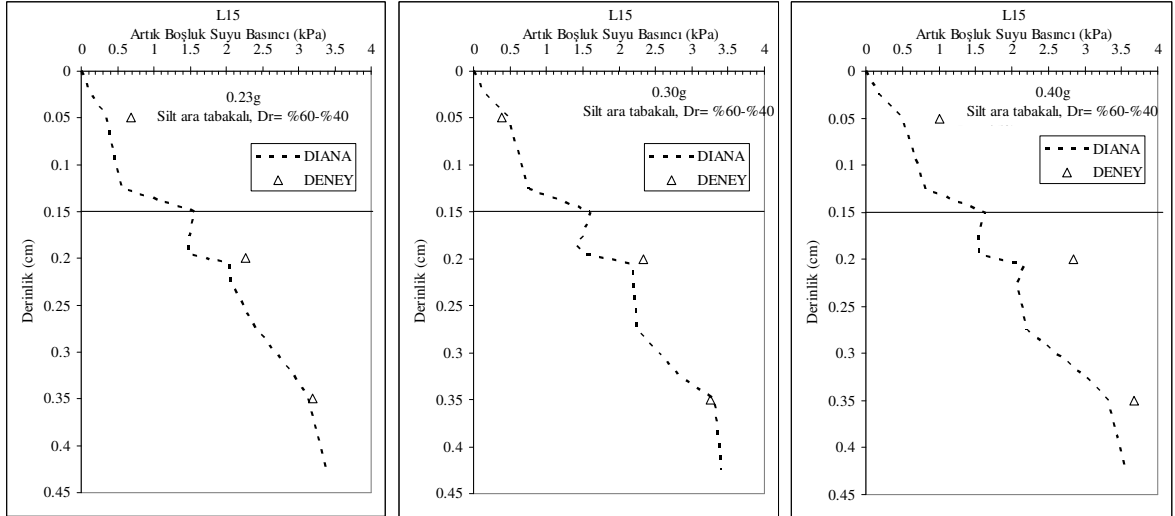
Şekil Ek 4.11 $Dr=40\%/72$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



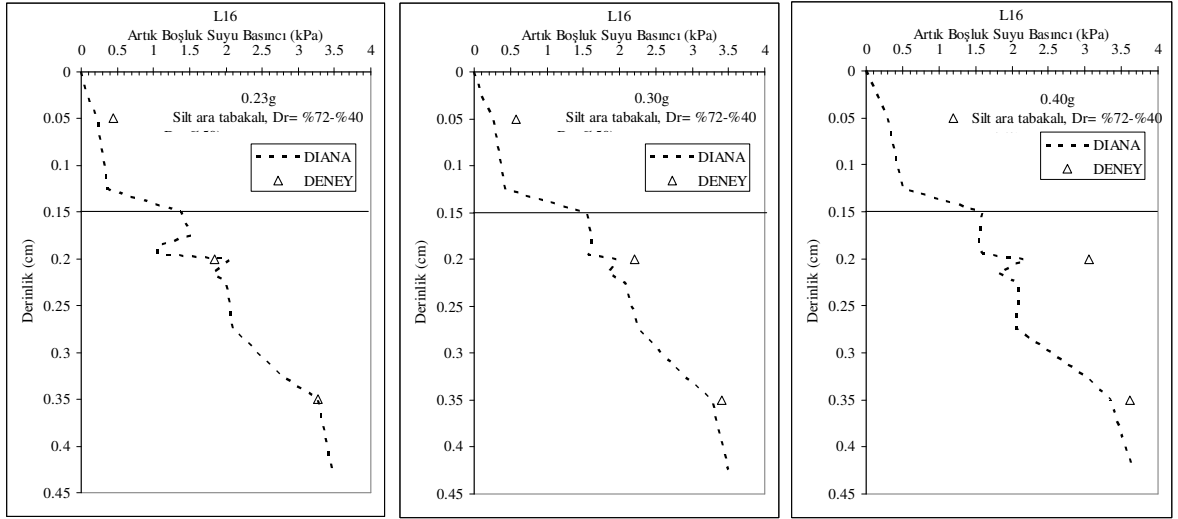
Şekil Ek 4.12 $Dr=60\%/40$ sıklıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil Ek 4.13 $Dr=72/40$ sıkılıkta tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil Ek 4.14 $Dr=60/40$ sıkılıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması



Şekil Ek 4.15 $D_r = 72-40\%$ sıklıkta silt ara tabakalı kum modelinin nümerik analizinden hesaplanan ve deney ölçümlerinden elde edilen maksimum artık boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimlerinin karşılaştırılması

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	03.02.1976	
Doğum yeri	Erzurum	
Lise	1987-1992 1992-1994	Erzurum Anadolu Lisesi Antalya Anadolu Lisesi
Lisans	1994-1998	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı
Doktora	2001-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Geoteknik Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1999-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Araştırma Görevlisi

TEŞEKKÜR

Bu doktora çalışması YTÜ Araştırma Fonu'na desteklenen 24.05.01.01 No'lu ve TÜBİTAK tarafından desteklenen İÇTAG: 1726 No'lu “ Depremde Tabakalı Kum Zeminde Oluşan Sıvılaşma ve Sıvılaşma Sonrası Davranışın Model Deneylerle Araştırılması” isimli projeye sağlanan maddi katkılar sayesinde gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK ve YTÜ Araştırma Fonu Başkanlığı'na katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.